مقاله‌نامه





ارائه‌های پوستری

سی امین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران

و شانزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران

دانشگاه دامغان

۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

مطالعه ابتدا به ساکن خواص الکترونی و اپتیکی آلومنیوم نیترید

ساحل، ابراهیمی؛ بابک، مینائی ؛ سید احمد، کتابی
دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان
sahel.eb1986@gmail.com

در این مقاله، خواص الکترونی و اپتیکی ساختار دوتایی AlN با استفاده از نظریه‌تابعی چگالی، تقریب GW و حل معادله بته سالپیتر بررسی می‌شود. نتایج ما نشان می‌دهد که ساختار آلومینیوم نیترید تک لایه دارای یک گاف نواری غیرمستقیم است که این گاف نواری غیرمستقیم به علت تصحیحات خودانرژی ناشی از برهم کنش الکترون-الکترون به مقدار ۴/۷۸ الکترون ولت افزایش می‌یابد. خواص اپتیکی و اثرات اکسیتونی این ساختار،با بکارگیری رویکرد معادله بته-سالپیتر و استفاده از تقریب‌های G_0W_0+RPA و G_0W_0+BSE بررسی شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در نظر گرفتن برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژی‌های پایین‌ترمی‌شود. علاوه بر این، محاسبات ما نشان می دهد که ساختار نیمرسانای دو تایی آلومینیوم نیترید، با داشتن گاف نواری پهن و همچنین انرژی بستگی بالا می‌تواند در طراحی و ساخت وسایل اپتوالکترونیکی مفید باشد.

کلید واژه- اثرات اکسیتونی ، خواص الکترونی و اپتیکی، گاف نواری، نظریه تابعی چگالی

Ab-initio Study of Electronic and Optical Properties of Aluminum Nitride (AlN)

Sahel, Ebrahimi; Babak, Minaie; Seyed Ahmad, Ketabi

School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran
sahel.eb1986@gmail.com

In this paper, using density functional theory (DFT), GW approximation, and solving the Bethe-Salpeter equation the electronic and optical properties of two-dimensional AlN structure are investigated. Our results show that the single-layer aluminum nitride structure has an indirect band gap, which increases by 4.78 eV due to self-energy corrections resulting from electron-electron interaction. We study the optical properties and excitonic effects of this binary semiconductor using the Bethe-Salpeter equation approach and applying the G0W0+RPA and G0W0+BSE approximations. Our results indicate that considering the electron-hole interaction causes the absorption spectrum to shift towards lower energies. In addition, our calculations show that the aluminum nitride single layer, with its wide band gap and high binding energy, can be useful in the design and construction of optoelectronic device.

Keywords: Excitonic effects, Electronic and Optical Properties, Band Gap, DFT.

مقدمه

بدنبال کوچک‌سازی قطعات الکترونیکی، تلاش‌های بسیاری برای طراحی و ساخت قطعات الکترونیکی نانو مقیاس با استفاده از مواد دو بعدی شده است. گرافن به عنوان معروف-ترین ماده تک لایه در اواخر سال ۲۰۰۴ توسط گروهی از پژوهشگران با استفاده از روش‌های لایه‌برداری مکانیکی ساخته شد [۱]. علیرغم ویژگی‌های شگفت انگیز، رفتار شبه فلزی (گاف نواری صفر) گرافن به طور قابل توجهی کاربرد مستقیم آن در دستگاه های نانو الکترونیکی و فناوری نانو را محدود می‌کند . در کنار نیمرساناهای کربنی، نیمرساناهای دوبعدی ترکیبی گروه III-V، متشکل از اتم-های گروه سوم و پنجم جدول تناوبی بخاطر ویژگی‌های الکترونی و اپتیکی قابل ملاحظه توجه زیادی از پژوهشگران را به خود جلب کرده است، این نیمرساناهای ترکیبی در مقایسه با موارد مشابه کربنی، با داشتن ویژگی هایی مانند، گاف نواری پهن، نقطه ذوب بالا و خواص مکانیکی خوب گزینه‌ای مناسبی برای ساخت وسایل اپتوالکترونیکی می-باشند[۲]. در میان ساختارهای نیمرساناهای ترکیبی III-V، ترکیبات نیتروژن‌دار از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. یکی از ترکیبات دوتایی نیتروژن‌دار این گروه ، آلومینیوم نیترید (AlN) می‌باشد، این ماده با داشتن ویژگی‌های جذابی همچون گاف نواری پهن ۶ الکترون ولتی، مقاومت الکتریکی بالا و رسانندگی گرمایی عالی توجه بسیاری از محققان را به منظور کاربرد در وسایل اپتوالکترونیکی به خود جلب نموده است[۳].

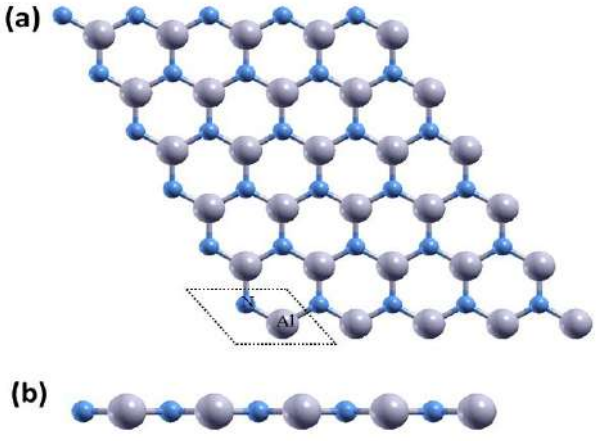
ولدبیگی و همکاران. [۴] خواص الکترونیکی و اپتیکی تک لایه AlN را با استفاده از محاسبات اصول اول بر اساس روش FP-LAPW مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که آلومینیوم نیترید یک نیمرسانا با گاف نواری غیر مستقیم به میزان eV ۲/۹۳ است. ما در این پژوهش در نظر داریم خواص الکترونی و اپتیکی آلومینیوم نیترید تک لایه را با در نظر گرفتن آثار بس‌ذره‌ای که تا کنون کمتر مورد توجه بوده است مورد بحث و بررسی قرار دهیم. ما امیدواریم که مطالعات نظری انجام شده در این مقاله بتواند الهام‌بخش مطالعات تجربی آینده برای درک خواص و همچنین سنتز این ساختار برای کاربرد در قطعات نانوالکترونیک و دستگاه‌های اپتیکی باشد.

رهیافت محاسباتی

خواص الکترونی حالت‌های پایه ساختار آلومینیوم نیترید تک لایه بر پایه‌ی نظریه تابعی چگالی DFT و استفاده از تقریب GGA تعیین می‌شود. محاسبات با استفاده از بسته نرم افزاری Quantum Espresso انجام شده است. برای تعیین حالت‌های برانگیخته از تقریب GW در نظریه اختلال بس‌ذره‌ای بر پایه رهیافت تابع گرین و مفهوم شبه ذرات استفاده می‌کنیم. اجرای این بخش از محاسبات با استفاده از بسته محاسباتی Yambo انجام گردیده است [۵]. شبه پتانسیل بکار رفته در محاسبات، از مدل مارتین-تیلور است که از نوع هنجار-پایسته می‌باشد. پارامتر انرژی قطع مناسب را به ازای این ساختار ۴۰Ry در نظر گرفته ایم.

نتایج و بحث

مطابق شکل ۱، سلول واحد ساختار بهینه شده‌ی آلومینیوم نیترید تک لایه در دو راستای مختلف نشان داده شده است. سلول واحداین ساختار از یک اتم آلومنیوم و یک اتم نیتروژن تشکیل شده است. ثابت شبکه ساختار و طول پیوند Al-N به ترتیب ۳٫۱۱ و ۱/۷۷ آنگستروم می‌باشند که با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مطابقت دارد[۶] .

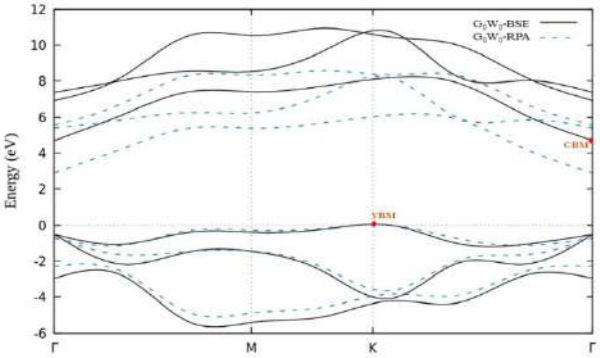


شکل ۱: ساختار آلومینیوم نیترید تک لایه. a) نمای بالایی و b) نمای جانبی

خواص الکترونی

به منظور بررسی خواص الکترونی آلومینیوم نیترید تک لایه، ساختار نواری آن را با استفاده از دو تقریب LDA و GGA-

PBE در سطح DFT و تقریب GGA-PBE در سطح G_0W_0 محاسبه نمودیم. در شکل(۲) ساختار نواری آلومینیوم نیترید تک لایه نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، در سطح DFT-GGA آلومینیوم نیترید، یک نیمرسانا با گاف نواری غیر مستقیم در حدود ۲/۹۷۸ eV است. باتوجه به شکل واضح است که استفاده از تقریب G_0W_0 باعث افزایش گاف نواری می‌شود که این گاف نیز غیر مستقیم بوده و مقدار آن ۴/۷۷۶ eV می‌باشد، این افزایش گاف نواری به علت تصحیحات خود-انرژی ناشی از اعمال برهم کنش الکترون-الکترون است. نتایج بدست آمده در این پژوهش در تطابق خوبی با نتایج حاصل از دیگر مطالعات است که در جدول ۱ این نتایج مقایسه شده است.



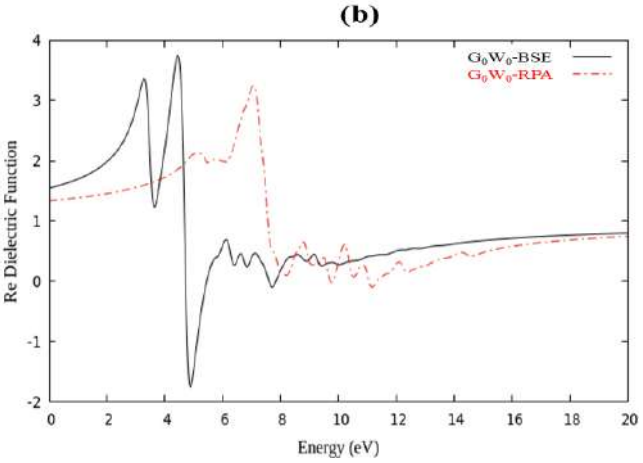
شکل۲: ساختارنواری آلومینیوم نیترید a) تقریب DFT-GGA و b) تقریب G_0W_0 (خطوط سیاه) و DFT-LDA (خطوط آبی) ، تراز فرمی در انرژی صفر در نظر گرفته شده است.

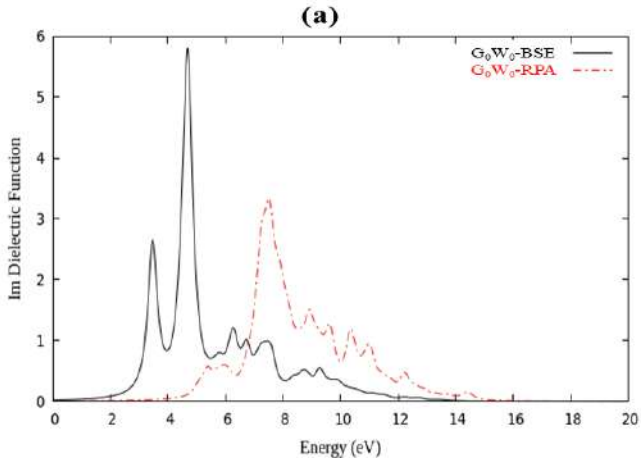
جدول ۱: میزان گاف نواری بدست آمده برای ساختار آلومینیوم نیترید در این پژوهش در مقایسه با نتایج حاصل از کارهای دیگران.

ساختار	گاف نواری محاسبه شده در این پژوهش	گاف نواری حاصل از نتایج دیگران
آلومینیوم نیترید تک‌لایه	DFT-LDA ۳/۰۳ eV DFT-GGA ۲/۹۷ eV GW ۴/۷۷ eV	LDA ۲/۹۳ eV [۶] GGA ۳/۰۴ eV [۷] GW ۵/۳۶ eV [۶]

خواص اپتیکی

محاسبه تابع دی الکتریک به عنوان تابعی شامل دو سهم حقیقی و موهومی($\varepsilon_M = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$) نقطه شروع برای توصیف خواص اپتیکی یک ساختار می‌باشد. ابتدا از تقریب فاز تصادفی بر پایه انرژی شبه ذرات استفاده می‌کنیم، که در این تقریب تنها برهمکنش‌های کولنی استتار شده الکترون –الکترون درنظر گرفته خواهد شد (G_0W_0-RPA). سپس از رهیافت معادله بته-سالپیتر بر اساس تابع گرین دوذره‌ای استفاده می‌کنیم، که در این روش علاوه بر برهم کنش‌های الکترون-الکترون، برهم کنش‌های الکترون-حفره نیز در نظر گرفته می‌شود (G_0W_0-BSE). به منظور بررسی خواص اپتیکی آلومینیوم نیترید ، در این پژوهش از قطبش نور در راستای موازی با ورقه آلومینیوم نیترید استفاده شده است. در شکل ۳ قسمت موهومی(طیف جذب) و قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک برای ساختار آلومینیوم نیترید نشان داده شده است. باتوجه به شکل، اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژیهای کمتر در مقایسه با طیف جذب بدست آمده از تقریب (G_0W_0-RPA) می‌شود که اثرفیزیکی مهم ناشی از این کار، ظهور تعدادی اکسیتون مقید زیر گاف نواری حاصل از تقریب GW می‌باشد. گاف اپتیکی آلومینیوم نیترید که با اولین قله تشدید در طیف جذب نشان داده می‌شود و مطابق با اکسیتون مقید است در ۳/۴۵ eV قرار دارد، انرژی بستگی این اکسیتون برابر با ۱/۳۲eV می‌باشد. با توجه به شکل ۳ مقدار حقیقی تابع دی‌الکتریک، هنگام اعمال تقریب G_0W_0-RPA در همه انرژیها بالای صفر است ولی با اعمال برهم کنش الکترون-حفره، مقدار آن در نزدیکی انرژی ۵ eV، منفی می‌شود که بدین معنی است در این گستره انرژی، نوری منتشر نمی‌شود. مقدار ثابت دی‌الکتریک برای تقریب G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE به ترتیب برابر با ۱/۳۴۸ eV و ۱/۵۹۴eV بدست آمد که این نشان دهنده افزایش ثابت دی‌الکتریک هنگام استفاده از تقریبG_0W_0-BSE در مقایسه با تقریب G_0W_0-RPA می‌باشد، که چنین اثری در کارهای پژوهشی دیگر نیز مشاهده شده است[۸].





شکل۳: (a): قسمت موهومی (طیف جدب) و (b): قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک آلومینیوم نیترید برای قطبش نور موازی با صفحه (E||X) در حضور برهم کنش الکترون-حفره(رنگ سیاه) و در غیاب برهم کنش الکترون-حفره(رنگ قرمز).

جمع‌بندی

به طور خلاصه ما در این پژوهش با استفاده از محاسبات نظری پیشرفته و بکارگیری نظریه اختلال بس ذره‌ای در چارچوب نظریه تابعی چگالی و رهیافت GW ، به بررسی خواص الکترونی و اپتیکی ساختار آلومینیوم نیترید پرداخته ایم. نتایج در سطح DFT-GGA نشان می دهد که آلومینیوم نیترید یک نیمرسانا با گاف نواری غیر مستقیم در حدود ۲/۹۷۸ eV می‌باشد و استفاده از تقریب G_0W_0 باعث افزایش گاف نواری ساختار می‌شود، که این گاف غیر مستقیم بوده و مقدار آن ۴/۷۷۶ eV می‌باشد، همچنین برای محاسبه خواص اپتیکی از دو سطح G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE استفاده شده است تا تفاوت طیف های مختلف اپتیکی هنگام حضور یا عدم حضور برهم کنش های الکترون-حفره بررسی شود. نتایج نشان میدهند که اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژیهای کمتردر مقایسه با طیف جذب بدست آمده از تقریب (G_0W_0-RPA) می‌شود اثرفیزیکی مهم ناشی از این کار، ظهور تعدادی اکسیتون مقید زیر گاف نواری حاصل از تقریب GW می‌باشد. نتایج بدست آمده از محاسبات ما نشان می دهد که ساختار آلومینیوم نیترید ، با داشتن گاف نواری و همچنین انرژی بستگی بالا کاندیدایی مناسب برای طراحی و ساخت قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی می‌باشد

مرجع‌ها

[16] Novoselov, Kostya S., et al. "Electric field effect in atomically thin carbon films." *science* 306.5696 (2004): 666-669.

[17] P. Rinke, M. Winkelnkemper, A. Qteish, D. Bimberg, J. Neugebauer, M. Scheffler, Physical Review B 77, 075202 (2008).

[18] Khan, Asif, Krishnan Balakrishnan, and Tom Katona. "Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides." *Nature photonics* 2.2 (2008): 77-84.

[19] Valedbagi, Sh, A. Fathalian, and S. Mohammad Elahi. "Electronic and optical properties of AlN nanosheet: an ab initio study." *Optics Communications* 309 (2013): 153-157.

[20] MARINI, Andrea, et al. Yambo: an ab initio tool for excited state calculations. *Computer Physics Communications*, 2009, 180.8: 1392-1403.

[21] D. V. Fakhrabad, N. Shahtahmasebi, M. Ashhadi, Superlattices Microstruct. 79, 38-44 (2015).

[22] L. Xiaoling, S. He, H. Lian, S. Lv, Y. Shen, W. Dong, Q. Duan, Applied Surface Science 531,147262 (2020)..

[23]] Shahrokhi, Masoud. "Quasi-particle energies and optical excitations of ZnS monolayer honeycomb structure." *Applied Surface Science* 390 (2016): 377-384.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

پارامترهای اپتیکی نانوورقه پنتاگرافن: محاسبات اصول اولیه آثار بس ذره ای

بابک، مینائی[۱] ؛ سید احمد، کتابی[۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان
babminaie@std.du.ac.ir ; saketabi@du.ac.ir

در این مقاله، ما به بررسی خواص اپتیکی و اثرات اکسیتونی نانو ورقه پنتاگرافن پرداخته‌ایم. برخی از پارامترهای اپتیکی این ماده، از جمله ضریب شکست، ضریب خاموشی، طیف جذب و طیف بازتابندگی، در چارچوب نظریه اختلال بس ذره ای مبتنی بر نظریه تابع گرین دوذره‌ای و با استفاده از رویکرد معادله بته-سالپیتر بررسی شده‌اند. همچنین، دو تقریب G0W0+RPA (که برهم کنش الکترون-الکترون را در نظر می‌گیرد ولی برهم کنش الکترون-حفره را نادیده می‌گیرد) و G0W0+BSE (که هم برهم کنش الکترون-الکترون و هم برهم کنش الکترون-حفره را در نظر می‌گیرد) استفاده شده‌اند. نتایج ما نشان می‌دهد که اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژی‌های پایین‌تر (انتقال سرخ) شده است. به طوری که اولین قله جذب تشدیدی در انرژی eV ۲/۴۹ رخ می‌دهد که مربوط به اکسیتون‌های مقید با انرژی بستگی eV ۳/۰۴ است. علاوه بر این، حضور برهم‌کنش الکترون-حفره باعث افزایش ثابت دی‌الکتریک در مقایسه با مقدار بدست آمده در سطح G0W0+RPA می‌شود.

کلید واژه- اکسیتون، پنتاگرافن، پارامترهای اپتیکی، انرژی بستگی، معادله بته-سالپیتر.

Optical Parameters of Penta-Graphene Nano Sheet: First-Principles Calculations of Many-Body Effects

Babak, Minaie[1] ; Seyed Ahmad, Ketabi[1]

[1]School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran

babminaie@std.du.ac.ir ; saketabi@du.ac.ir

In this paper, we examine the optical properties and excitonic effects of pentagraphene nanosheets. Some of the optical parameters of this material, including the refractive index, extinction coefficient, absorption spectrum, and reflectance spectrum, are investigated within the framework of many-body perturbation theory based on tow particles Green Function theory using the Bethe-Salpeter equation approach. Furthermore, two approximations, G0W0+RPA (which considers electron-electron interaction but neglects electron-hole interaction) and G0W0+BSE (which considers both electron-electron and electron-hole interactions), are employed. Our results indicate that the inclusion of electron-hole interaction leads to a redshift in the absorption spectrum, such that the first intense absorption peak occurs at an energy of 2.49 eV, corresponding to bound excitons with a binding energy of 3.04 eV. Moreover, the presence of electron-hole interaction results in an increase in the dielectric constant compared to the value obtained at the G0W0+RPA level.

Keywords: Exciton, Penta-Graphene, Optical Parameters, Binding Energy, Bethe–Salpeter Equation.

مقدمه

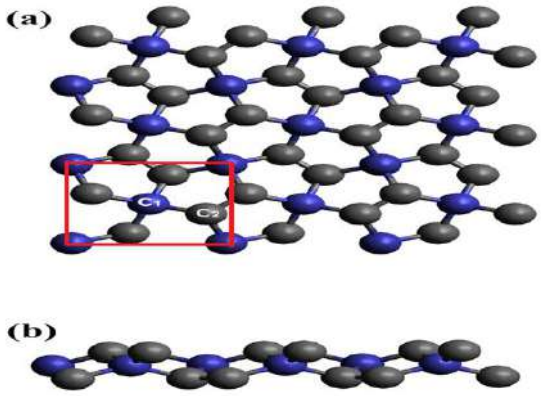
تحقیقات در موردگرافن و نانو مواد مبتنی بر گرافن در زمینه کاربرد آنها در اپتیک و اپتوالکترونیک از سال ۲۰۰۸ شاهد پیشرفت چشمگیری بوده است. تحقیقات و بررسی کاربردهای عملی گرافن در زمینه های مختلف در تمام جوامع علمی، با علاقه زیادی دنبال می‌شود[۱]. علی رغم ویژگیهای منحصربفرد گرافن، این ساختار توانایی جذب اپتیکی کمی در حدود ۲ تا ۳ درصد ازکل طیف فرودی را در محدوده بسیار وسیع ، (فروسرخ تا فرا بنفش) دارد [۲]. این محدودیت در جذب نور موجب عدم کارایی گرافن خالص به طور مستقیم در کاربردهای اپتوالکترونیکی می‌شود. به همین علت برای غلبه بر چالش های ساختاری و رفع محدودیت‌های کاربردی، میل به مطالعات نظری و تجربی فراوانی برای تنظیم‌پذیر کردن گاف نواری این ساختار بوجود آمده است[۳]. یکی از پیشنهادات، طراحی ساختارهای جدید بر پایه گرافن است. بر این اساس در سال ۲۰۱۵، پنتاگرافن (PG) یکی دیگر از آلوتروپ‌های دو بعدی کربن که تنها از بلوک‌های پنج ضلعی تشکیل شده است پیشنهاد شد[۲]. مطالعات نظری تایید می‌کنند که پلی‌مورف کربن جدید نه تنها از نظر دینامیکی و مکانیکی پایدار است، بلکه می‌تواند دمایی تا ۱۰۰۰ درجه کلوین را نیز تحمل کند. ورقه پنتاگرافن بر خلاف گرافن، دارای گاف نواری در حدود ۳/۲۵ eV است که این ویژگی‌ها، پنتاگرافن را به عنوان یک ماده با کاربرد فراوان در حوزه نانوالکترونیک و اپتوالکترونیک مورد توجه قرار داده است[۳].در سال۲۰۱۶، وانگ و همکارانش[۴] به طور مفصل به بررسی خواص الکترونی و اپتیکی سه آلوتروپ مختلف کربن، یعنی پنتاگرافن تک لایه، دو لایه و کربن T12، با استفاده از نظریه تابعی چگالی وتقریب GGA-PBE، پرداختند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که به دلیل اثرات برانگیختگی، شروع جذب طیف حاصل از حل معادله BSE زیر گاف نواری شبه ذره است. ما معتقدیم که مطالعات نظری انجام شده در این مقاله می‌تواند الهام‌بخش مطالعات تجربی بر روی پنتاگرافن باشد و می‌تواند به عنوان یک جایگزین بالقوه برای نسل آینده قطعات نانوالکترونیک و دستگاه‌های اپتیکی مورد استفاده قرار گیرد.

رهیافت محاسباتی

محاسبات مربوط به حالت‌های پایه ساختار پنتاگرافن بر پایه‌ی نظریه تابعی چگالی DFT و استفاده از بسته نرم افزاری Quantum Espresso انجام شده است. همچنین محاسبات مربوط به حالت های برانگیخته از تقریب GW استفاده میکنیم، که اجرای این محاسبات در پژوهش حاضر با استفاده از بسته محاسباتی Yambo انجام خواهد گرفت[۵].پارامتر انرژی قطع مناسب را به ازای این ساختار ۵۰Ry در نظر گرفته ایم. تعداد نقاط بهینه K برای پنتاگرافن برابر با ۱×۱۴×۱۴ نظر گرفته شده است. آستانه همگرایی انرژی کل در حدود 10^{-3} eV/atom و آستانه همگرایی نیرو در حدود 10^{-2} eV/Å مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

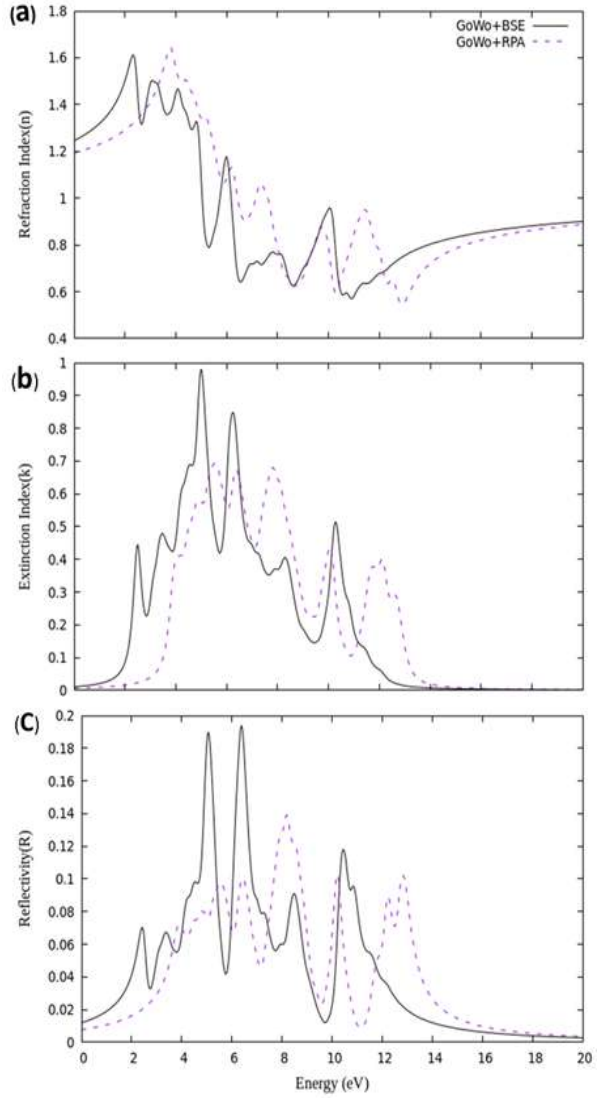
مطابق شکل ۱، سلول واحد ساختار نانوورقه پنتاگرافن از ۶ اتم کربن با هیبریداسیون sp^2 و sp^3 تشکیل شده،که در شکل، C_1 اتمهای با هیبریداسیون sp^3 و C_2 اتمهای با هیبریداسیون sp^2 نشان داده شده است. طول پیوند بین اتمهای C_1-C_1 برابر با ۱/۵۵۰ Å و C_2-C_2 برابر با ۱/۳۲۹ Å و همچنین ضخامتی در حدود ۱/۲ Å برای این ساختار بدست آمد. ثابت شبکه ساختار پس از بهینه سازی برابر با مقدار ۳/۶۴ Å بود که با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مطابقت دارد[۶] .



شکل ۱: ساختار نانوورقه پنتاگرافن. (a) نمای بالایی و (b) نمای جانبی (مربع نشان داده شده با خطوط قرمز سلول واحد پنتاگرافن می‌باشد

خواص اپتیکی

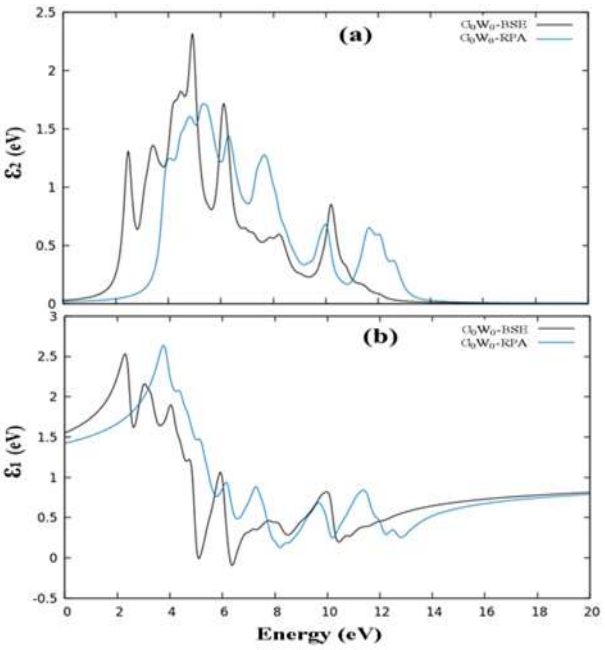
برای دستیابی به خواص اپتیکی یک ساختار باید رفتار کمیت‌های مختلف اپتیکی بر حسب انرژی فوتون فرودی مورد مطالعه قرار گیرد ، محاسبه تابع دی الکتریک به عنوان تابعی شامل دو سهم حقیقی و موهومی ($\varepsilon_M = \varepsilon_1 + i\,\varepsilon_2$) نقطه شروع برای توصیف خواص اپتیکی یک ساختار می‌باشد. شکل ۲ نتایج محاسبه شده را برای ضریب شکست، ضریب خاموشی و طیف بازتابندگی ساختار پنتاگرافن، در حضور برهم کنش الکترون-حفره و نیز در غیاب این برهم کنش نشان می‌دهد. مقدار ضریب شکست در انرژی صفر به عنوان ضریب شکست استاتیک معرفی میشود، که با توجه به شکل (۲-a) این مقدار برای دو تقریب G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE به ترتیب برابر با ۱/۲۰ و ۱/۲۵ می‌باشد. همچنین بیشینه ضریب شکست برای این دو تقریب، در انرژی ۳/۸۱eV برای تقریب G_0W_0-RPA و ۲/۳۱eV برای تقریب G_0W_0-BSE مشاهده شد. ، این موضوع که ضریب شکست استاتیک در سطح G_0W_0-BSE بزرگتر از سطح G_0W_0-RPA می‌باشد در پژوهش‌های دیگر هم مشاهده شده است[۷]، در شکل (۲-b) ضریب خاموشی ساختار پنتاگرافن نشان داده شده است که با توجه به آن میتوان دید که بیشینه ضریب خاموشی برای دو تقریب G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۹۹ است که این مقادیر در انرژی‌های ۵/۵۳ eV و ۴/۹۸ eV مشاهده شدند، در این انرژی‌ها فوتون سریعا جذب می‌شوند. طیف بازتابندگی که نشان دهنده ی میزان بازتاب فوتون های ورودی در هنگام برخورد امواج الکترومغناطیسی به یک ماده است، در شکل (۲-c) نشان داده شده است. بیشینه مقدار بازتابندگی محاسبه شده در تقریب G_0W_0-RPA در انرژی ۸/۱۷ eV مشاهده شد که مقدار آن در حدود ۱۴ درصد است، همچنین برای تقریب G_0W_0-BSE این مقدار برابر با ۱۹ درصد است که در انرژی ۶/۳۵ eV مشاهده شد. با توجه به شکل مشخص است که اعمال برهم کنش های الکترون-حفره باعث انتقال طیف بازتابندگی به سمت انرژیهای کمتر می‌شود.



شکل۲: (a) ضرب شکست n، (b) ضریب خاموشی k، و (c) طیف بازتاب ساختار پنتاگرافن دوبعدی برای قطبش نور موازی با صفحه.

در شکل ۳ قسمت موهومی(طیف جذب) و قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک برای ساختار پنتاگرافن نشان داده شده است. باتوجه به شکل، اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژیهای کمتر(انتقال سرخ) در مقایسه با طیف جذب بدست آمده از تقریب (G_0W_0-RPA) می‌شود که اثرفیزیکی مهم ناشی از این کار، ظهور تعدادی اکسیتون مقید زیر گاف نواری شبه ذرات می‌باشد. گاف اپتیکی پنتاگرافن که با اولین قله تشدید در طیف جذب نشان داده می‌شود و مطابق با اکسیتون مقید است در ۲/۴۶ eV قرار دارد، انرژی بستگی این اکسیتون برابر با ۳/۰۷eV می‌باشد.

با توجه به شکل ۳ مقدار حقیقی تابع دی‌الکتریک، هنگام اعمال تقریب G_0W_0-RPA در همه انرژیها بالای صفر است ولی با اعمال برهم کنش الکترون-حفره، مقدار آن در نزدیکی انرژی۶/۳۷ eV، منفی می‌شود که بدین معنی است در این گستره انرژی، نوری منتشر نمی‌شود و مطابق با شکل (۲-c) بازتاب در این انرژی بیشینه است. مقدار حقیقی تابع دی‌الکتریک در انرژی صفر به عنوان ثابت دی‌الکتریک معرفی می‌شود. مقدار ثابت دی‌الکتریک برای تقریب G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE به ترتیب برابر با ۱/۴۱ eV و ۱/۵۲eV بدست آمد که این بیانگر افزایش ثابت دی‌الکتریک هنگام استفاده از تقریبG_0W_0-BSE در مقایسه با تقریب G_0W_0-RPA می‌باشد، که چنین اثری در کارهای پژوهشی دیگر نیز مشاهده شده است[۷].



شکل۳: (a): قسمت موهومی (طیف جدب) و (b): قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک پنتاگرافن دو بعدی برای قطبش نور موازی با صفحه (E||X) در حضور برهم کنش الکترون-حفره(رنگ سیاه) و در غیاب برهم کنش الکترون-حفره(رنگ آبی).

جمع‌بندی

به طور خلاصه ما در این پژوهش با بکارگیری نظریه اختلال بس ذره‌ای مبتنی بر نظریه تابع گرین دوذره‌ای و با استفاده از رویکرد معادله بته-سالپیتر ، برخی کمیت‌های اپتیکی ساختار پنتاگرافن را محاسبه کرده‌ایم. برای محاسبه خواص اپتیکی از دو سطح G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE استفاده شده است تا تفاوت طیف های مختلف اپتیکی هنگام حضور یا عدم حضور برهم کنش های الکترون-حفره بررسی شود. نتایج نشان می‌دهند که اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژیهای کمتر(انتقال سرخ) در مقایسه با طیف جذب بدست آمده از تقریب (G_0W_0-RPA) می‌شود که اثرفیزیکی مهم ناشی از این کار، ظهور تعدادی اکسیتون مقید زیر گاف نواری حاصل از تقریب GW می‌باشد. همچنین استفاده از تقریب -G_0W_0 BSE باعث افزایش ثابت دی الکتریک در مقایسه با مقدار بدست آمده از تقریب G_0W_0-RPA می‌شود.

نتایج بدست آمده از این محاسبات بیانگر توانایی بالای ساختار پنتاگرافن برای کاربرد در حوزه‌های الکترونیک و اپتوالکترونیک می‌باشد.

مرجع‌ها

[24] Geim, Andre Konstantin. "Graphene: status and prospects." *science* 324.5934 (2009): 1530-1534.

[25] Nair, Rahul Raveendran, et al. "Fine structure constant defines visual transparency of graphene." science 320.5881 (2008): 1308-1308.

[26] Leenaerts, O., et al. "First-principles investigation of graphene fluoride and graphane." *Physical Review B* 82.19 (2010): 195436.

[27] Wang, Zhanyu, et al. "Electronic and optical properties of novel carbon allotropes." *Carbon* 101 (2016): 77-85.

[28] MARINI, Andrea, et al. Yambo: an ab initio tool for excited state calculations. *Computer Physics Communications*, 2009, 180.8: 1392-1403.

[29] ZHANG, Shunhong, et al. Penta-graphene: A new carbon allotrope. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112.8: 2372-2377.

[30] Shahrokhi, Masoud. "Quasi-particle energies and optical excitations of ZnS monolayer honeycomb structure." *Applied Surface Science* 390 (2016): 377-384.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

خواص الکترونی و اپتیکی پنتاگرافن : نظریه اختلال بس‌ذره‌ای

بابک، مینائی ؛ سید احمد، کتابی
دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان
babminaie@std.du.ac.ir

در این مقاله درچارچوب نظریه اختلال بس ذره ای مبتنی بر رهیافت تابعی چگالی، خواص الکترونی و اپتیکی ساختار پنتاگرافن بررسی می‌شود. نتایج ما نشان می‌دهد که پنتاگرافن دارای یک گاف نواری شبه مستقیم است. همچنین مشاهده می‌شود که افزودن برهمکنش الکترون-الکترون باعث افزایش گاف نواری می‌شود. خواص اپتیکی و اثرات اکسیتونی این ساختار، با بکارگیری رویکرد معادله بته-سالپیتر و استفاده از تقریب‌های G_0W_0+RPA و G_0W_0+BSE بررسی شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در نظر گرفتن برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژی‌های پایین‌تر (انتقال سرخ) می‌شود. در این حالت اولین قله جذب تشدیدی در انرژی ۲/۴۹ eV مشاهده شد. علاوه بر این، محاسبات ما نشان می دهد که ساختار پنتاگرافن، با داشتن گاف نواری و همچنین انرژی بستگی بالا جایگزین مناسبی برای طراحی و ساخت قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی می‌باشد.

کلید واژه- پنتاگرافن، خواص الکترونی و اپتیکی، گاف نواری، نظریه تابعی چگالی

Electronic and Optical Properties of Penta-graphene: Many-Body Perturbation Theory

Babak, Minaie؛ Seyed Ahmad, Ketabi
School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran
babminaie@std.du.ac.ir

In this paper, within the framework of many-particle perturbation theory based on density functional theory (DFT), the electronic and optical properties of Penta-graphene structure is investigated. Our results show that penta-graphene has a quasi-direct band gap. Furthermore, in the presence of electron-electron interaction the band gap is increased. We studied the optical properties and excitonic effects of this structure, using the Bethe-Salpeter equation approach and two approximations of G0W0+RPA and G0W0+BSE. Considering the electron-hole interaction caused the absorption spectrum to shift towards lower energies (red shift) so that the first resonance peak of the absorption spectrum was observed at 2.49 eV. Our results indicate that the two-dimensional penta-graphene structure, having a large and high energy dependent band gap is a suitable candidate for designing and manufacturing electronic and optoelectronic components.

Keywords: Band Gap, Density Functional Theory, Electronic and Optical Properties, Penta-graphene.

مقدمه

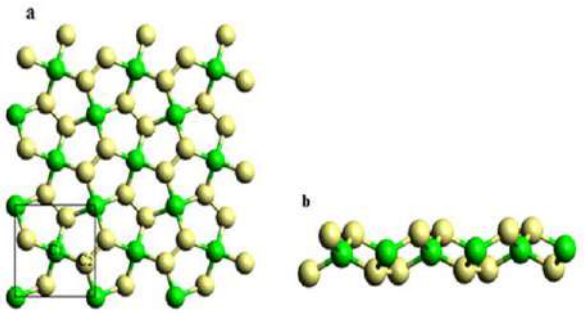
ساختار گرافن از زمانی که در سال ۲۰۰۴ کشف شد به دلیل خواص منحصر بفرد الکترونیکی و مکانیکی آن مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱]. علیرغم ویژگی‌های شگفت انگیز، رفتار شبه فلزی (گاف نواری صفر) گرافن به طور قابل توجهی کاربرد مستقیم آن در دستگاه های نانو الکترونیکی و فناوری نانو را محدود می‌کند . به همین علت میل به مطالعات نظری و تجربی فراوانی برای تنظیم‌پذیر کردن گاف نواری این ساختار بوجود آمده است. رهیافت‌های نظری و تجربی متنوعی برای غلبه بر محدودیت‌های ساختار گرافن بررسی شده است. یکی از پیشنهادات طراحی ساختار جدیدی است که بر پایه شبیه‌سازی‌های محاسباتی گسترده، در سال ۲۰۱۵ مطرح گردید. بر این اساس، پنتاگرافن (PG) یکی دیگر از آلوتروپ‌های ۲ بعدی کربن که تنها از بلوک‌های پنج ضلعی تشکیل شده است پیشنهاد شد[۲]. محاسبات نظری پیشرفته تایید می‌کنند که پلی‌مورف کربن جدید نه تنها از نظر دینامیکی و مکانیکی پایدار است، بلکه می‌تواند دمایی تا ۱۰۰۰ درجه کلوین را نیز تحمل کند. ورقه پنتاگرافن بر خلاف گرافن، دارای گاف نواری در حدود ۳/۲۵ eV است که این ویژگی‌ها، پنتاگرافن را به عنوان یک ماده با کاربرد فراوان در حوزه نانوالکترونیک و نانو مکانیک مورد توجه قرار داده است[۳] . در سال ۲۰۱۵ ژانگ و همکارانش[۲] با استفاده از تقریب گرادیان تعمیم یافته GGA-PBE، به بررسی‌ویژگی‌های ساختاری و الکترونی پنتاگرافن پرداختند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که می‌توان پنتاگرافن را با لایه برداری از یک ساختار توده ای کربنی به نام کربن T-12 بدست آورد. همچنین بررسی‌های آنها نشان می‌دهد که ساختار پنتاگرافن یک نیمرسانا با گاف نواری غیر مستقیم در حدود۳/۲۵ eV می‌باشد. ما در این پژوهش در نظر داریم خواص الکترونی و اپتیکی ساختار پنتاگرافن را با در نظر گرفتن آثار بس‌ذره‌ای که تا کنون مورد توجه نبوده است مورد بحث و بررسی قرار دهیم. ما معتقدیم که مطالعات نظری انجام شده در این مقاله می‌تواند الهام‌بخش مطالعات تجربی بر روی پنتاگرافن باشد و می‌تواند به عنوان یک جایگزین بالقوه برای نسل آینده قطعات نانوالکترونیک و دستگاه‌های اپتیکی مورد استفاده قرار گیرد.

رهیافت محاسباتی

خواص الکترونی حالت‌های پایه ساختار پنتاگرافن بر پایه‌ی نظریه تابعی چگالی DFT و استفاده از تقریب GGA تعیین می‌شود. محاسبات با استفاده از بسته نرم افزاری Quantum Espresso انجام شده است. برای تعیین حالت‌های برانگیخته از تقریب GW در نظریه اختلال بس‌ذره‌ای بر پایه رهیافت تابع گرین و مفهوم شبه ذرات استفاده می‌کنیم [۴]. اجرای این بخش از محاسبات با استفاده از بسته محاسباتی Yambo انجام گردیده است [۵]. شبه پتانسیل بکار رفته در محاسبات، از مدل مارتین-تیلور است که از نوع هنجار-پایسته می‌باشد [۶]. پارامتر انرژی قطع مناسب را به ازای این ساختار ۵۰Ry در نظر گرفته ایم.

نتایج و بحث

مطابق شکل ۱، سلول واحد ساختار نانوورقه پنتاگرافن از ۶ اتم کربن با هیبریداسیون sp^2 و sp^3 تشکیل شده،که در شکل، C_1 اتمهای با هیبریداسیون sp^3 و C_2 اتمهای با هیبریداسیون sp^2 نشان داده شده است. طول پیوند بین اتمهای C_1-C_1 برابر با ۱/۵۵۰ Å و C_2-C_2 برابر با ۱/۳۲۹ Å و همچنین ضخامتی در حدود ۱/۲ Å برای این ساختار بدست آمد. ثابت شبکه ساختار پس از بهینه سازی برابر با مقدار ۳/۶۴ Å بود که با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مطابقت دارد[۲] .

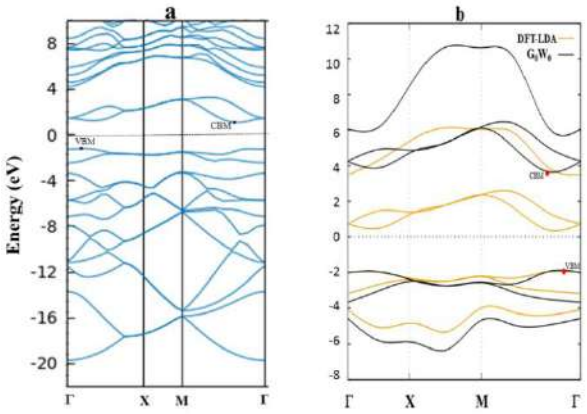


شکل ۱: ساختار نانوورقه پنتاگرافن. a) نمای بالایی و b) نمای جانبی (مربع نشان داده شده با خطوط سیاه سلول واحد پنتاگرافن می‌باشد)

خواص الکترونی

به منظور بررسی خواص الکترونی پنتاگرافن، ساختار نواری آن را با استفاده از دو تقریب LDA و GGA-PBE در سطح

DFT و تقریب GGA-PBE در سطح G_0W_0 محاسبه نمودیم. در شکل(۲) ساختار نواری پنتاگرافن نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، در سطح DFT-GGA پنتاگرافن یک نیمرسانا با گاف نواری غیر مستقیم در حدود ۲/۳۲eV است. باتوجه به شکل واضح است که استفاده از تقریب G_0W_0 باعث افزایش گاف نواری می‌شود که این گاف شبه مستقیم بوده و مقدار آن ۵/۵۳ eV می‌باشد، این افزایش گاف نواری به علت تصحیحات خود-انرژی ناشی از اعمال برهم کنش الکترون-الکترون است. نتایج بدست آمده در این پژوهش در تطابق خوبی با نتایج حاصل از دیگر مطالعات است که در جدول ۱ این نتایج مقایسه شده است.



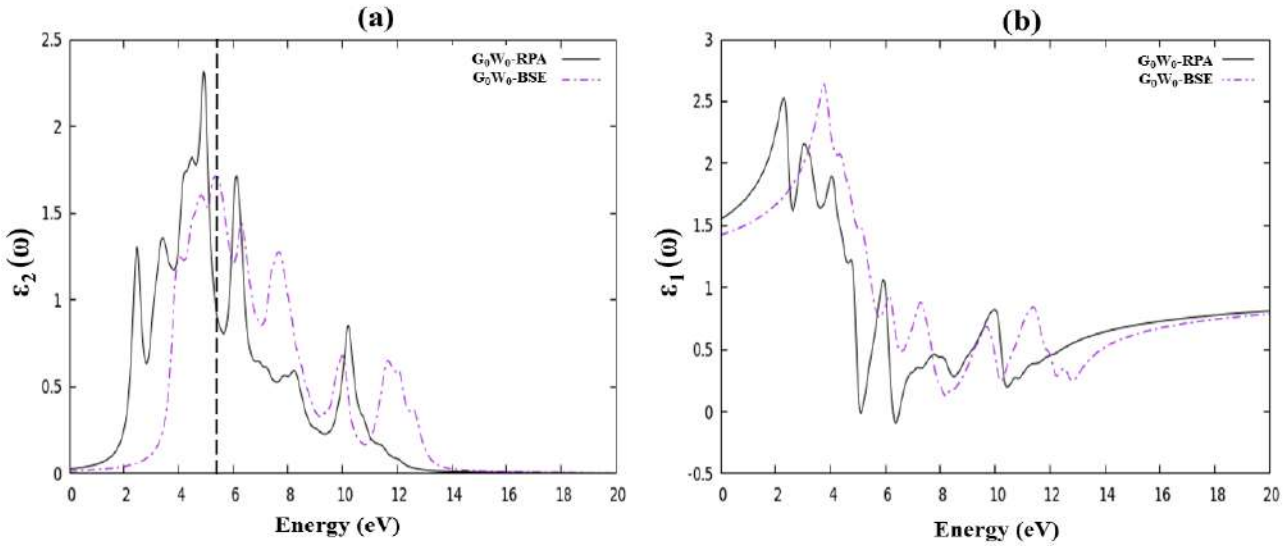
شکل۲: ساختار نواری پنتاگرافن دو بعدی a) تقریب DFT-GGA و b) تقریب G_0W_0 (خطوط سیاه) و DFT-LDA (خطوط قهوه ای) ، تراز فرمی در انرژی صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: میزان گاف نواری بدست آمده برای ساختار پنتاگرافن در این پژوهش با استفاده از تقریب های مختلف، در مقایسه با نتایج حاصل از کارهای دیگران.

ساختار	گاف نواری محاسبه شده در این پژوهش	گاف نواری حاصل از نتایج دیگران
پنتاگرافن	DFT-LDA ۲/۲۵ eV DFT-GGA ۲/۳۲ eV GW ۵/۵۳ eV	LDA ۲/۲۲ eV [۷] GGA ۳/۲۵ eV [۲] GW ۴/۱۴ eV [۷]

خواص اپتیکی

محاسبه تابع دی الکتریک به عنوان تابعی شامل دو سهم حقیقی و موهومی($\varepsilon_M = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$) نقطه شروع برای توصیف خواص اپتیکی یک ساختار می‌باشد. ابتدا از تقریب فاز تصادفی بر پایه انرژی شبه ذرات استفاده می‌کنیم، که در این تقریب تنها برهمکنش‌های کولنی استتار شده الکترون -الکترون درنظر گرفته خواهد شد (G_0W_0-RPA). سپس از رهیافت معادله بته-سالپیتر بر اساس تابع گرین دوذره‌ای استفاده می‌کنیم، که در این روش علاوه بر برهم کنش‌های الکترون-الکترون، برهم کنش‌های الکترون-حفره نیز در نظر گرفته می‌شود (G_0W_0-BSE). به منظور بررسی خواص اپتیکی پنتاگرافن، در این پژوهش از قطبش نور در راستای موازی با ورقه پنتاگرافن استفاده شده است. در شکل ۳ قسمت موهومی(طیف جذب) و قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک برای ساختار پنتاگرافن نشان داده شده است. باتوجه به شکل، اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژیهای کمتر(انتقال سرخ) در مقایسه با طیف جذب بدست آمده از تقریب (G_0W_0-RPA) می‌شود که اثرفیزیکی مهم ناشی از این کار، ظهور تعدادی اکسیتون مقید زیر گاف نواری حاصل از تقریب GW می‌باشد. گاف اپتیکی پنتاگرافن که با اولین قله تشدید در طیف جذب نشان داده می‌شود و مطابق با اکسیتون مقید است در ۲/۴۶ eV قرار دارد، انرژی بستگی این اکسیتون برابر با ۳/۰۷eV می‌باشد. با توجه به شکل ۳ مقدار حقیقی تابع دی‌الکتریک، هنگام اعمال تقریب G_0W_0-RPA در همه انرژیها بالای صفر است ولی با اعمال برهم کنش الکترون-حفره، مقدار آن در نزدیکی انرژی ۶ eV، منفی می‌شود که بدین معنی است در این گستره انرژی، نوری منتشر نمی‌شود. مقدار ثابت دی‌الکتریک برای تقریب G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE به ترتیب برابر با ۱/۴۱ eV و ۱/۵۲eV بدست آمد که این نشان دهنده افزایش ثابت دی‌الکتریک هنگام استفاده از تقریبG_0W_0-BSE در مقایسه با تقریب G_0W_0-RPA می‌باشد، که چنین اثری در کارهای پژوهشی دیگر نیز مشاهده شده است[۸].



شکل۳: (a): قسمت موهومی (طیف جدب) و (b): قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک پنتاگرافن دو بعدی برای قطبش نور موازی با صفحه $(E||X)$ در حضور برهم کنش الکترون-حفره(رنگ سیاه) و در غیاب برهم کنش الکترون-حفره(رنگ بنفش).(خط نقطه چین در قسمت موهومی نشان دهنده میزان گاف نواری حاصل از G_0W_0 است).

جمع‌بندی

به طور خلاصه ما در این پژوهش با استفاده از محاسبات نظری پیشرفته و بکارگیری نظریه اختلال بس ذره‌ای در چارچوب نظریه تابعی چگالی و رهیافت GW ، به بررسی خواص الکترونی و اپتیکی ساختار پنتاگرافن پرداخته ایم. نتایج در سطح DFT-GGA نشان می دهد که پنتاگرافن یک نیمرسانا با گاف نواری غیر مستقیم در حدود ۲/۳۲eV می‌باشد و استفاده از تقریب G_0W_0 باعث افزایش گاف نواری ساختار می‌شود، که این گاف شبه مستقیم بوده و مقدار آن ۵/۵۳eV می‌باشد، همچنین برای محاسبه خواص اپتیکی از دو سطح G_0W_0-RPA و G_0W_0-BSE استفاده شده است تا تفاوت طیف های مختلف اپتیکی هنگام حضور یا عدم حضور برهم کنش های الکترون-حفره بررسی شود. نتایج نشان میدهند که اعمال برهم کنش الکترون-حفره باعث انتقال طیف جذب به سمت انرژیهای کمتر(انتقال سرخ) در مقایسه با طیف جذب بدست آمده از تقریب (G_0W_0-RPA) می‌شود اثرفیزیکی مهم ناشی از این کار، ظهور تعدادی اکسیتون مقید زیر گاف نواری حاصل از تقریب GW می‌باشد. نتایج بدست آمده از محاسبات ما نشان می دهد که ساختار پنتاگرافن دو بعدی، با داشتن گاف نواری و همچنین انرژی بستگی بالا کاندیدایی مناسب برای طراحی و ساخت قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی می‌باشد

مرجع‌ها

[31] Britnell, Liam, et al. "Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures." *Science* 335.6071 (2012): 947-950.

[32] ZHANG, Shunhong, et al. Penta-graphene: A new carbon allotrope. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112.8: 2372-2377.

[33] CRANFORD, Steven W. When is 6 less than 5? Penta-to hexa-graphene transition. *Carbon*, 2016, 96: 421-428.

[34] W. G. Aulbur, L. Jonsson and J. W. Wilkins," Quasiparticles calculations in solids"Columbus (2000).

[35] MARINI, Andrea, et al. Yambo: an ab initio tool for excited state calculations. *Computer Physics Communications*, 2009, 180.8: 1392-1403.

[36] TROULLIER, Norman; MARTINS, José Luís. Efficient pseudopotentials for plane-wave calculations. *Physical review B*, 1991, 43.3: 1993.

[37] Einollahzadeh, H., R. S. Dariani, and S. M. Fazeli. "Computing the band structure and energy gap of penta-graphene by using DFT and G0W0 approximations." *Solid State Communications* 229 (2016): 1-4.

[38]] Shahrokhi, Masoud. "Quasi-particle energies and optical excitations of ZnS monolayer honeycomb structure." *Applied Surface Science* 390 (2016): 377-384.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی اثر شعاع کمره باریکه در انتشار ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری در جو متلاطم

سجاد قاآنی[۱]، ناصر سیاهوشی[۲*]

[۱-] گروه اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

[۲-] گروه فوتونیک، دانشکده شهید فخری زاده، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

[1-] sajjad_ghaani@physics.iust.ac.ir, [2-] n-siahvashi@ihu.ac.ir

چکیده – ترکیب همدوس باریکه‌ها (CBC) روشی جدید برای افزایش توان لیزر است و مطالعه عوامل مؤثر بر توان و کیفیت باریکه به منظور بهبود عملکرد سامانه به ویژه در حضور تلاطم جو، همواره مورد توجه بوده است. در این راستا، اثر شعاع کمره باریکه‌های لیزری در CBC برای حالت خلأ و تلاطم متوسط جو مورد مطالعه و بررسی عددی قرار گرفت. ۷ باریکه گاوسی لیزری در آرایش شش‌ضلعی کنار هم قرار گرفتند تا کیفیت باریکه ترکیبی در صفحه مشاهده با معیار توان در سبد cm ۵ مورد مطالعه قرار گیرد و پارامتر اپتیکیِ شعاع کمره بهینه‌یابی شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که برای حالت خلأ، شعاع کمره‌ی mm ۸٫۵ و برای حالت تلاطم متوسط جو، شعاع کمره‌ی mm ۱۷ بهترین انتخاب هستند که توان بیشینه‌ای در سبد cm ۵ جایگزیده می‌کنند.

کلیدواژه‌ها – ترکیب همدوس باریکه‌ها، شعاع کمره باریکه، جو متلاطم، توزیع شدت، توان در سبد

Investigating the Effect of Beam Waist Radius on the Propagation of Coherent Beam Combination in a Turbulent Atmosphere

Sajjad Qaani[1], Naser Siahvashi[2*]

[1-] Department of Optics and Lasers, Faculty of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[2-] Department of Photonics, Faculty of Basic Sciences, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract – Coherent beam combination (CBC) is the new method to increase laser power, and the study of factors affecting the power and beam quality in order to improve the performance of the system, especially in the presence of atmospheric turbulence, has always been of interest. In this regard, the effect of the beam waist radius of lasers in CBC for the vacuum and medium turbulence of the atmosphere states was studied and numerically investigated. 7 Gaussian laser beams were placed together in a hexagonal array to study the combined beam quality in the observing plane with the power in 5 cm bucket metric and to optimize the optical parameter of the beam waist radius. The simulation results show that for the vacuum state, 8.5 mm radius, and for the medium turbulence state, 17 mm radius is the best choice, which localized the maximum power in the 5 cm bucket.

Keywords: coherent beam combination, beam waist radius, turbulent atmosphere, intensity distribution, power in bucket

۱. مقدمه

لیزرهای پرتوان در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت، پزشکی، ارتباطاتِ راه دور، علوم بنیادی و غیره کاربردهای بسزایی از خود نشان داده‌اند. با این حال دستیابی به آن‌ها به دلیل محدودیت‌های فیزیکی مانند اثرات غیرخطی، اثرات حرارتی و آسیب مواد در توان‌های بالا، با چالش‌های مهمی مواجه شده است. برای غلبه بر این چالش‌ها، ترکیب باریکه‌های لیزری اعم از روش‌های ترکیب همدوس و ترکیب ناهمدوس به عنوان یک راه حل مناسب معرفی گردید [۱]. در ترکیب باریکه‌های لیزری، آرایه‌ای از چندین لیزر به‌گونه‌ای کنارهم قرار گرفته که با برهم‌نهی میدان‌های گسیلی، توان جایگزیده در محل مشاهده افزایش می‌یابد [۲]. شعاع کمره باریکه‌های لیزری از جمله عوامل مؤثر بر توان و کیفیت باریکه ترکیبی است.

در راستای بررسی اثرات عوامل مؤثر بر کیفیت باریکه ترکیبی، فعالیت‌های متعددی انجام شده است. ژو و همکاران نیز به بررسی اثرات پارامتر Cn2 بر توزیع شدت در حضور خطاهای سامانه ترکیب باریکه پرداختند [۳]. پن و همکاران، با شبیه‌سازی توزیع شدت باریکه ترکیبی برای مقادیر متفاوت پارامتر C_n^2، مقدار توان در سبد را محاسبه کردند [۴]. با این حال در گزارشات ارائه شده‌ی حوزه ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری، تأثیر شعاع کمره باریکه‌ها بر توزیع شدت و کیفیت باریکه ترکیبی کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است و از آن مهم‌تر، وابستگی این شعاع به تلاطم جو نیز بررسی نشده است. از این رو در این مقاله به بررسی توزیع شدت و تأثیر عامل شعاع کمره باریکه‌ها بر کیفیت باریکه ترکیبی پرداخته می‌شود. معیار توان در سبد ۵ cm برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی انتخاب شده است. تأثیر عاملِ شعاع کمره باریکه‌ها و بهینه‌یابی آن برای دستیابی به توان در سبد بیشینه در حالت خلأ و حالت تلاطم متوسط جو مورد بررسی قرار گرفت.

۲. اصول و مبانی

در این بخش ابتدا اصول و مبانی انتشار باریکه لیزری در جو متلاطم بررسی و توصیف می‌شود و با استفاده از آن، توزیع شدتِ ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری در صفحه مشاهده، تعیین می‌شود؛ سپس معیاری برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی معرفی می‌شود.

توزیع میدان الکتریکی باریکه ترکیبی چندین لیزر در صفحه مشاهده به فاصله L از دهانه تابش را می‌توان توسط نظریه پراش و انتگرال هویگنس-فرنل توصیف نمود. طبق اصل هویگنس-فرنل یک سطح دیفرانسیلی از دهانه تابش را می‌توان چشمه نقطه‌ای و ثانویه نور تصور کرد و در این حالت، میدان باریکه ترکیبی از برهم‌نهی میدان این چشمه‌های ثانویه به دست می‌آید. در جو متلاطم، پارامتر ساختار ضریب شکست (C_n^2) موجب نوسانات شدتی باریکه لیزر می‌شود. میانگین زمانی شدتِ باریکه ترکیبی همدوس از انتگرال هویگنس-فرنلِ (رابطه ۱) به دست می‌آید [۳، ۵]:

$$\begin{aligned}\langle I(x,y,L)\rangle &= \frac{1}{\lambda^2 L^2}\int_{-\infty}^{\infty} dX_1 dY_1 dX_2 dY_2\, E(X_1,Y_1,0)\\ &\times E(X_2,Y_2,0)\exp\left(\frac{i}{kL}[x(X_1-X_2)+y(Y_1-Y_2)]\right)\\ &\times \langle \exp[\psi(x,y,X_1,Y_1)+\psi^*(x,y,X_2,Y_2)]\rangle\end{aligned} \quad (۱)$$

که λ طول‌موج، k عددموج و L فاصله انتشار است. نمادهای * و $\langle\,\rangle$ به‌ترتیب علامت مزدوج مختلط و میانگین زمانی هستند و ترم آخر، میانگین نوسانات فاز بوده و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}&\langle exp[\psi(x,y,X_1,Y_1)+\psi^*(x,y,X_2,Y_2)]\rangle =\\ &exp[-[(X_1-X_2)^2+(Y_1-Y_2)^2]/\rho_0^2]\end{aligned} \quad (۲)$$

در این رابطه، $\rho_0 = (0.545C_n^2k^2L)^{-3/5}$ طول همدوسی موج کروی منتشر شده در جو است. با انجام محاسبات بسیار طولانی برای میدان باریکه‌های گاوسی، انتگرال‌های رابطه (۱) را می‌توان ساده کرد:

$$\langle I(x,y,L)\rangle = \frac{2P}{\pi w^2}\left(\sum_{i=1}^{N}\Gamma_{ii}(x,y,L) + 2\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=i+1}^{N} Re[\Gamma_{ij}(x,y,L)]\right) \quad (۳)$$

که در آن P توان هر لیزر است و ضرایبِ w (اندازه لکه)، Γ_{ii} و Γ_{ij} توسط روابط (۴)، (۵) و (۶) تعریف می‌شوند:

$$w^2(L) = w_0^2[1 + (L/z_0)^2 + (L/z_{atm})^2] \quad (۴)$$

w_0 شعاع کمره، $z_0 = kw_0^2/2$ طول ریلی، $z_{atm} = kw_0\rho_0/\sqrt{8}$ است.

$$\Gamma_{ii}(x,y,L) = \exp\left(-\frac{2}{w^2}[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]\right) \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} Re[\Gamma_{ij}(x,y,L)] = {} & \\ & \times \exp\left(-\frac{2}{w^2}\left[\left(x-\frac{x_i+x_j}{2}\right)^2 + \left(y-\frac{y_i+y_j}{2}\right)^2\right]\right) \\ & \times \cos\left(\frac{L}{w^2 z_0}[(x_i-x_j)(x_i+x_j-2x) \right. \\ & \left. \quad + (y_i-y_j)(y_i+y_j-2y)]\right) \\ & \times \exp\left(-\frac{(1+L^2/z_{atm}^2)}{2w^2}\left[(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2\right]\right) \end{aligned} \quad (۶)$$

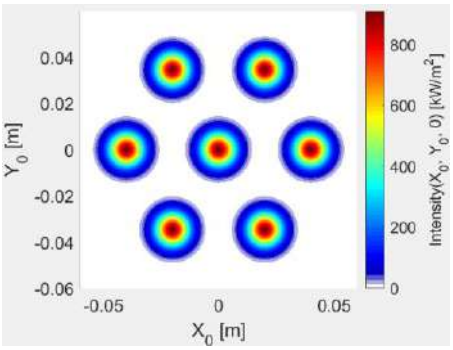
برای بررسی کیفیت باریکه ترکیبی از معیار توان در سبد (PIB) استفاده شده است که مقدار توان جایگزیده شده در دایره‌ای (سبد) به شعاع R_B در صفحه مشاهده است و از رابطه (۴) به دست می‌آید [۶]:

$$PIB(R_B) = \frac{1}{P_t}\int_{\rho=0}^{R_B}\int_{\varphi=0}^{2\pi} I(\rho,\varphi,L)\rho d\rho d\varphi \quad (۷)$$

در این رابطه P_t توان کل باریکه‌ها است. در این مقاله از شعاع سبد ۵ cm استفاده شده است.

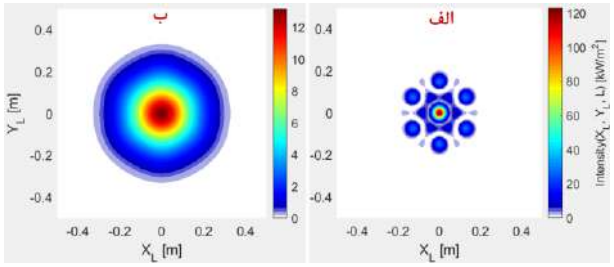
۳. شبیه‌سازی و نتایج

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از باریکه‌هایی با پروفایل ایده‌آل گاوسی، طول‌موج ۱۰۸۰ nm و شعاع کمره ۱۰ mm استفاده شده است. تعداد ۷ باریکه لیزری با توان کل ۱ kW در آرایش شش‌ضلعی کنار هم قرارگرفتند و فاصله بین باریکه‌های مجاور (d) برابر w_0 ۴ انتخاب شد. شکل ۱ توزیع شدت باریکه ترکیبی را در دهانه تابش نشان می‌دهد.



شکل ۳۰. توزیع شدت دهانه تابش ترکیب باریکه‌ها با آرایش مربعی.

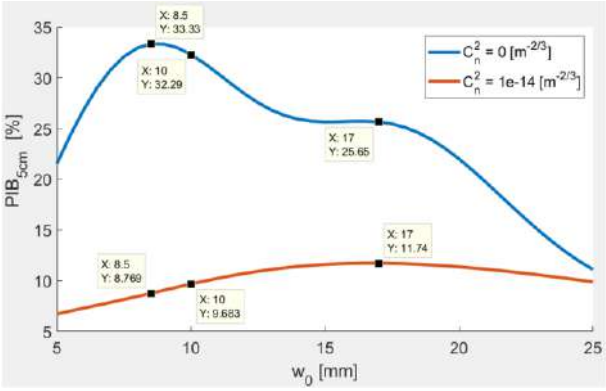
مطابق شکل ۱، توزیع شدت و توان هر باریکه در دهانه تابش در کمره باریکه قرار دارد و باریکه‌ها هیچ‌گونه برهم‌نهی با همدیگر ندارند. همچنین قله شدت هر باریکه برابر ۹۰۹ kW/m² است. به منظور بررسی تأثیر جو متلاطم بر باریکه ترکیبی و کیفیت آن، صفحه مشاهده در فاصله ۵ km از دهانه تابش قرار گرفت و توزیع شدت میانگین برای حالت خلأ و تلاطم متوسط ($C_n^2 = ۱۰^{-۱۴}$ $m^{-۲/۳}$) شبیه‌سازی شد. شکل ۲ میانگین توزیع شدت باریکه ترکیبی همدوس را برای این دو حالت مذکور نشان می‌دهد.



شکل ۳۱. میانگین توزیع شدت صفحه مشاهده برای ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری؛ الف: خلأ و ب: تلاطم متوسط جو.

با فاصله گرفتن از دهانه تابش و هم‌پوشانی میدان باریکه‌ها با یکدیگر، نواحی روشن و تاریک بر اثر تداخل سازنده و ویران‌گر نمایان می‌شوند که در شکل ۲-الف نیز دیده می‌شود. همچنین مطابق شکل‌های ۲، در حضور تلاطم جو و نوسانات ضریب شکست آن (پارامتر C_n^2)، الگوی تداخلی به توزیع شدت تک لیزر نزدیک شده و صورت گاوسی به خود می‌گیرد. همچنین قله شدت باریکه ترکیبی برای حالت خلأ و تلاطم متوسط جو به ترتیب برابر ۱۲۳٫۱ و ۱۳٫۲ kW/m² و توان در سبد ۵ cm به ترتیب برابر ۳۲٫۲۹٪

و ۹٫۶۸٪ به دست آمد که نشان از کاهش کیفیت باریکه ترکیبی در حضور تلاطم جو دارد. از آنجایی که برای دستیابی به توان در سبد بیشینه، یک شعاع کمره بهینه برای باریکه‌های لیزری وجود دارد، در ادامه سعی می‌شود این شعاع کمره برای هر دو حالت خلأ و تلاطم متوسط جو به دست آید. برای این منظور شعاع کمره از ۵ mm تا ۲۵ mm تغییر داده شد و تغییرات توان در سبد ۵ cm بر حسب شعاع کمره برای هر دو حالت مذکور در شکل ۳ آمده است. لازم به ذکر است که با تغییر w_0 و فاصله بین باریکه‌ها به همان نسبت، در واقع مقیاس دهانه تابش تغییر می‌یابد.



شکل ۳۲. نمودار توان در سبد ۵ cm بر حسب شعاع کمره باریکه‌های لیزری برای حالت خلأ (منحنی آبی‌رنگ) و تلاطم متوسط (منحنی قرمزرنگ).

مطابق شکل ۳ با افزایش شعاع کمره، مقدار توان در سبد ۵ cm برای هر دو حالت خلأ و تلاطم متوسط جو، ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی است. با این تفاوت که در حضور تلاطم جو، w_0 بهینه از ۸٫۵ mm در حالت خلأ به مقدار ۱۷ mm تغییر پیدا می‌کند و بیشینه PIB_{5cm} از مقدار ۳۳٫۳۳٪ به مقدار ۱۱٫۷۴٪ در این شعاع‌های بهینه کاهش می‌یابد. بنابراین برای کاهش اثرات مخرب تلاطم جو بر انتشار لیزر، روش بهینه‌یابی شعاع کمره باریکه‌ها (و در نتیجه قطر دهانه تابش) مناسب به نظر می‌رسد.

۴. نتیجه‌گیری

مشخصات اپتیکی در عملکرد سامانه لیزری مبتنی بر ترکیب همدوس باریکه‌ها بسیار مؤثر هستند. شعاع کمره باریکه‌های لیزری از عوامل مؤثر بر کیفیت باریکه ترکیبی و توان در سبد است. شبیه‌سازی این عامل در خلأ و تلاطم متوسط جو نشان داد که برای دستیابی به توان در سبد بیشینه، یک شعاع کمره بهینه وجود دارد. در حضور تلاطم جو، این شعاع کمره بهینه بزرگ‌تر می‌شود. شعاع کمره‌ی ۸٫۵ mm با مقدار ۳۳٫۳۳٪ توان در سبدِ ۵ cm، مناسب‌ترین گزینه برای حالت خلأ و شعاع کمره‌ی ۱۷ mm با مقدار ۱۱٫۷۴٪ توان برای حالت تلاطم متوسط جو بهترین انتخاب است. نتایج این مقاله می‌تواند در طراحی‌های اپتیکی سامانه لیزری مبتنی بر ترکیب باریکه مفید باشد.

مرجع‌ها

D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, “High power fiber lasers: current status and future perspectives,” *JOSA B*, vol. 27, no. 11, pp. B63-B92, 2010.

C. L. Linslal et al., “Challenges in coherent beam combining of high power fiber amplifiers: A review,” *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 277-293, 2022.

P. Zhou, Z. Liu, X. Xu, and X. Chu, “Comparative study on the propagation performance of coherently combined and incoherently combined beams,” *Optics communications*, vol. 282, no. 8, pp. 1640-1647, 2009.

P. Pan, Y. Dan, B. Zhang, N. Qiao, and Y. Lei, "Propagation properties of flat-topped beams in a turbulent atmosphere," *Journal of Modern Optics*, vol. 56, no. 12, pp. 1375-1382, 2009.

X. Chu, Z. Liu, and Y. Wu, “Propagation of a general multi-Gaussian beam in turbulent atmosphere in a slant path,” *JOSA A*, vol. 25, no. 1, pp. 74-79, 2008.

F. Kashani, M. R. Mahzoun, and B. Ghafary, “Beam propagation analysis of a multi beam FSO system with partially flat-topped laser beams in turbulent atmosphere,” *Optik*, vol. 123, no. 10, pp. 879-886, 2012.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی اثر شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز بر کیفیت باریکه در ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری

سجاد قاآنی[۱]، ناصر سیاهوشی[۲*]

[۱-] گروه اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
[۲-] گروه فوتونیک، دانشکده شهید فخری‌زاده، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

[1-] sajjad_ghaani@physics.iust.ac.ir, [2-] n-siahvashi@ihu.ac.ir

چکیده – برای افزایش توان لیزرها، فناوری ترکیب همدوس باریکه‌ها (CBC) به دنیا معرفی شده و تعیین مشخصات اپتیکی لیزرهای آن به منظور بهبود عملکرد آن، همواره مورد توجه بوده است. در این راستا، اثر شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز قرار گرفته جلوی باریکه‌های لیزری در CBC مورد مطالعه و بررسی عددی قرار گرفت. ۳۷ باریکه گاوسی لیزری در آرایش شش‌ضلعی کنار هم قرار گرفتند تا کیفیت باریکه ترکیبی در صفحه مشاهده با معیار توان در سبد مورد مطالعه قرار گیرد و پارامتر اپتیکیِ شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز بهینه‌یابی شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که شعاعِ ۱۰ mm با مقدار ۲۵٫۱۶٪ توان در سبدِ ۵ cm، مناسب‌ترین گزینه است. نتایج این پژوهش می‌تواند مرجع مناسبی برای طراحی اپتیکی و ساخت سامانه ترکیب باریکه‌های لیزری در آینده باشد.

کلیدواژه‌ها – ترکیب همدوس باریکه‌ها، شعاع دهانه موازی‌ساز، توزیع شدت، توان در سبد.

Investigating the Effect of Aperture Radius of Collimator Element on Beam Quality in the Coherent Beam Combination

Sajjad Qaani[1], Naser Siahvashi[2*]

[1-] Department of Optics and Lasers, Faculty of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[2-] Department of Photonics, Faculty of Basic Sciences, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract – To increase the power of lasers, Coherent Beam Combination (CBC) technology has been introduced to the world, and determining the optical characteristics of its lasers to improve its performance has always been of interest. In this regard, the effect of the aperture radius of the collimator element placed in front of the laser beams in CBC was studied and numerically investigated. 37 Gaussian laser beams were placed together in a hexagonal array to study the combined beam quality in the observing plane with the power in bucket and to optimize the optical parameter of the aperture radius of the collimator element. The simulation results show that the radius of 10 mm with a value of 25.16% of the power in 5 cm bucket is the most suitable option. The results of this research can be a suitable reference for the optical design and construction of the laser beam combining system in the future.

Keywords: coherent beam combination, aperture radius of collimator, intensity distribution, power in bucket.

۱. مقدمه

لیزرهای پرتوان در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت، پزشکی، ارتباطاتِ راه دور، علوم بنیادی و غیره کاربردهای بسزایی از خود نشان داده‌اند[۱]. برای غلبه بر چالش‌های لیزر پرتوان، ترکیب باریکه‌های لیزری اعم از روش‌های ترکیب همدوس و ترکیب ناهمدوس به عنوان یک راه حل مناسب معرفی گردیده است[۲]. در ترکیب باریکه‌های لیزری، آرایه‌ای از چندین لیزر کنار هم قرار گرفته و با برهم‌نهی میدان‌های گسیلی، توان جایگزیده در صفحه مشاهده افزایش می‌یابد[۳]. مشخصات اپتیکی سامانه، مانند شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز قرار گرفته در جلوی باریکه‌های لیزری از جمله عوامل مؤثر بر کیفیت باریکه ترکیبی هستند. شکل (۱) نمونه‌ای از سامانه‌های مبتنی بر ترکیب باریکه‌های لیزری را نشان می‌دهد.



شکل ۳۳. نمونه‌ای از سامانه مبتنی بر ترکیب باریکه‌های لیزری. در تصویر قطعه موازی‌ساز قرار گرفته در جلوی هر باریکه لیزری دیده می‌شود [۴].

در راستای بررسی اثرات عوامل مؤثر بر کیفیت باریکه ترکیبی، فعالیت‌های متعددی انجام شده است و تأثیر شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز با ادبیات‌های مختلف بارها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۸ ورونتسوف و همکاران در مقایسه ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه‌های لیزری، اثر شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز را مورد بررسی قرار دادند [۵]. ژو و همکاران به بررسی اثرات قطع شدن باریکه گاوسی ناشی از قرار گرفتن قطعه موازی‌ساز در مسیر انتشار باریکه پرداختند و وابستگی شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز به تعداد باریکه‌ها، طول‌موج لیزر، فاصله انتشار و شدت تلاطم جو را مورد بحث قرار دادند [۶]. جابزینسکی و همکاران، با شبیه‌سازی ترکیب باریکه‌های لیزری در جو متلاطم به بررسی تأثیر شعاع دهانه بر کیفیت باریکه ترکیبی پرداختند [۷]. با این حال در گزارشات ارائه شده‌ی حوزه ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری، تأثیر شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز بر توزیع شدت و کیفیت باریکه ترکیبی کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است.

از این رو در این مقاله به بررسی توزیع شدت و تأثیر عامل شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز بر کیفیت باریکه ترکیبی پرداخته می‌شود. معیار توان در سبد به ویژه توان در سبد ۵ cm برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی انتخاب شده است. برای این منظور با ارائه اصول و مبانی ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری و انتگرال هوینگس-فرنل، توزیع شدت صفحه مشاهده شبیه‌سازی گردید. تأثیر عاملِ شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز و بهینه‌یابی آن برای دستیابی به توان در سبد بیشینه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. اصول و مبانی

در این بخش ابتدا مبانی انتشار باریکه لیزری در خلأ بررسی می‌شود و با استفاده از آن، توزیع شدتِ ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری در صفحه مشاهده، تعیین می‌شود؛ سپس معیاری برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی معرفی می‌شود.

با توجه نظریه باریکه گاوسی، میدان باریکه گاوسی در هر نقطه (ρ_0, φ_0) در دهانه تابش از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$E(\rho_0, \varphi_0, 0) = \sqrt{\frac{2P}{\pi w_0^2}} \exp\left(-\left[\frac{\rho_0}{w_0}\right]^2\right) \qquad (۱)$$

در این‌جا P و w_0، به ترتیب توان و شعاع کمره باریکه لیزر هستند. با توجه به نظریه پراش و انتگرال هویگنس-فرنل، میدان تک باریکه iام در هر نقطه (ρ_1, φ_1, L) در صفحه مشاهده از رابطه (۲) به دست می‌آید [۷].

$$E_i(\rho_1,\varphi_1,L) = \frac{\exp(ikL)}{i\lambda L}\exp\left(\frac{ik}{2L}\rho_1^2\right)\int_{\rho_0=0}^{a}\int_{\varphi_0=0}^{2\pi} E_i(\rho_0,0) \times \exp\left(-\frac{ik}{L}\rho_1\rho_0\cos(\varphi_1-\varphi_0)\right)\rho_0 d\varphi_0 d\rho_0 \quad (۲)$$

در این جا λ طول‌موج، k عدد موج در راستای انتشار z و a شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز قرار گرفته در جلوی باریکه لیزر است. توجه شود که کسرِ $1-\exp\left(-2\left[-\frac{a}{w_0}\right]^2\right)$ از توان لیزر را قطعه موازی‌ساز از خود عبور می‌دهد. با قرار دادن رابطه (۱) در رابطه (۲)، میدان باریکه گاوسی در صفحه مشاهده به دست می‌آید. در ترکیب باریکه‌های لیزری، اگر بین تمامی باریکه، همدوسی متقابل اعمال شده باشد، با برهم‌نهی میدان باریکه‌ها، شدت باریکه ترکیبی در صفحه مشاهده از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$I_{CBC}(\vec{r}) = \sum_i E_i(\vec{r}-\vec{r_i})\sum_i E_i^*(\vec{r}-\vec{r_i}) \quad (۳)$$

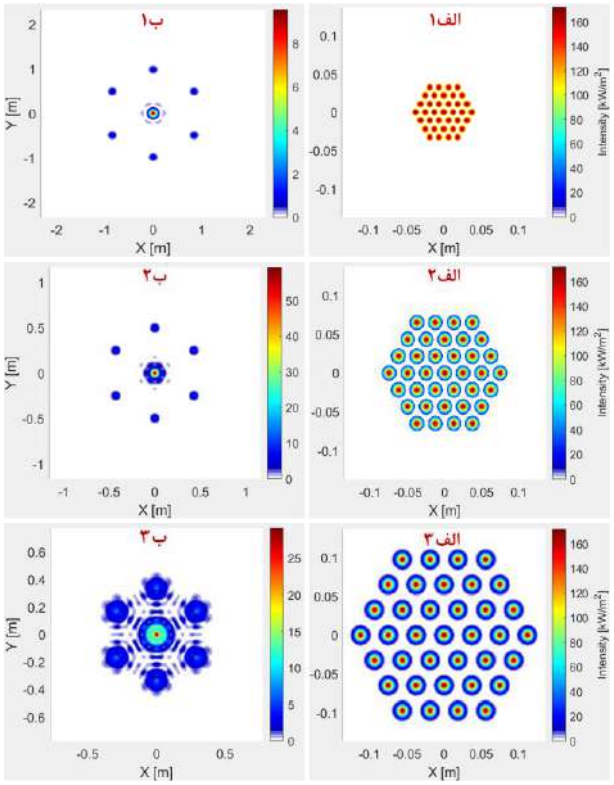
که در آن $\vec{r_i}=(x_i,y_i,0)$ موقعیت مرکزِ باریکه iام در دهانه تابش است. در بررسی کیفیت باریکه لیزری برحسب رویکرد و کاربردهای مورد نیاز، معیارهای متنوعی معرفی شده‌اند که در این بین معیار توان در سبد (PIB) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معیار توان در سبد (PIB)، مقدار توان جایگزیده شده در دایره‌ای (سبد) به شعاع R_B در صفحه مشاهده است و از رابطه (۴) به دست می‌آید [۶]:

$$PIB(R_B) = \frac{1}{P_t}\int_{\rho=0}^{R_B}\int_{\varphi=0}^{2\pi} I(\rho,\varphi,L)\rho d\rho d\varphi \quad (۴)$$

در این رابطه P_t توان کل باریکه‌ها است. با توجه به کاربرد گسترده، در این مقاله از شعاع سبد ۵ cm و ۱۰ cm استفاده شده است.

۳. شبیه‌سازی و نتایج

در شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار MATLAB، از باریکه‌هایی با پروفایل ایده‌آل گاوسی، توان ۱ kW، طول‌موج ۱۰۸۰ nm و شعاع کمره ۱۰ mm استفاده شده است. شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز (a) برابر مقادیر مختلفِ ۵، ۱۰ و ۱۵ mm در نظر گرفته شد تا تأثیر این عامل بر کیفیت باریکه ترکیبی و توان در سبد بررسی شود. تعداد ۳۷ باریکه در آرایش شش‌ضلعی کنارهم قرارگرفتند و فاصله بین باریکه‌های مجاور (d) برابر ۲٫۵ a انتخاب شد تا اندک فاصله‌ی خالی ۰٫۵ a بین باریکه وجود داشته باشد. با برهم‌نهی و تداخل میدان این باریکه‌های لیزری در فاصله ۱۰ km، ترکیب همدوس آن‌ها در صفحه مشاهده محقق می‌شود. توزیع شدت در صفحه مشاهده برای سه شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز مذکور در شکل (۲) آمده است.

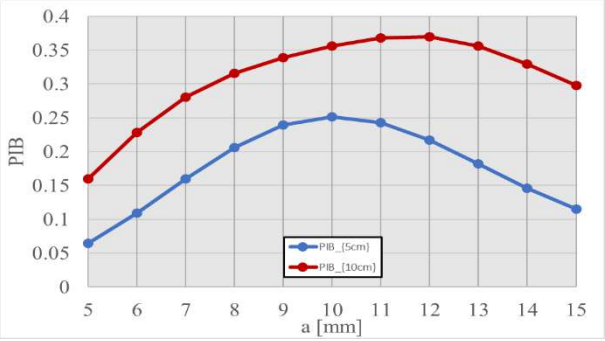


شکل ۳۴. توزیع شدت دهانه تابش (الف) و صفحه مشاهده (ب) برای شعاع‌های مختلفِ دهانه قطعه موازی‌ساز؛ ۱: ۵ mm، ۲: ۱۰ mm و ۳: ۱۵ mm.

مطابق شکل (۲) باریکه‌ها هیچ‌گونه برهم‌نهی در دهانه تابش با هم ندارند و با هم‌پوشانی میدان آن‌ها در صفحه مشاهده و ایجاد تداخل‌های سازنده و ویرانگر، نواحی روشن و تاریک پدید می‌آید. با افزایش شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز (a)، پهنای توزیع شدت در صفحه مشاهده با نسبت معکوس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش a، الگوی شدت در صفحه مشاهده در ابتدا تغییر چندانی نمی‌کند؛ اما با افزایش

بیش‌تر آن، نواحی روشن قبلی پهن شده و نواحی جدیدی در الگوی توزیع شدت ظاهر می‌شود. برای شعاع دهانه قطعه موازی‌سازِ ۵، ۱۰ و ۱۵ mm، شدت قله به ترتیب برابر ۹٫۵۷، ۵۹٫۳۷ و ۲۹٫۱۶ kW/m^2 به دست آمد که به نظر می‌رسد مناسب‌ترین انتخاب، ۱۰ mm باشد.

به منظور بررسی دقیق‌تر و بهینه‌یابی این شعاع، مقدار a از ۵ تا ۱۵ mm تغییر داده شد و تغییرات معیار توان در سبد ۵ cm و ۱۰ cm بر حسب تغییرات شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز در شکل (۴) آمده است.



شکل ۳۵. نمودار توان در سبد ۵ cm (منحنی آبی‌رنگ) و ۱۰ cm (منحنی قرمزرنگ) برحسب شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز.

مطابق شکل (۴)، با افزایش شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز و در نتیجه افزایش درصد عبور توان لیزر از قطعه موازی‌ساز، توان در سبد در ابتدا با افزایش و سپس با روند کاهشی مواجه است. این تغییر روندِ توان در سبد از صعودی به نزولی، برای شعاع سبدِ ۵ cm در مقدار a برابر ۱۰ mm و برای شعاع سبدِ ۱۰ cm در مقدار a برابر ۱۲ mm اتفاق می‌افتد. بنابراین برای دستیابی به بیش‌ترین توان در سبد ۵ cm (۱۰ cm)، باید شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز قرار گرفته در جلوی باریکه‌های لیزری را ۱۰ mm (۱۲ mm) درنظر گرفت تا ٪۲۵٫۱۶ (٪۳۶٫۹۷) از توان کل در این سبد جایگزیده شود.

۴. نتیجه‌گیری

تعیین مشخصات بهینه برای یک سامانه لیزری مبتنی بر ترکیب همدوس باریکه‌ها به منظور بهبود عملکرد آن، همواره مورد توجه بوده است. شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز قرار گرفته در جلوی باریکه‌های لیزری از عوامل مؤثر بر کیفیت باریکه ترکیبی و توان در سبد است. شبیه‌سازی این عامل، نشان داد که برای دستیابی به توان در سبد بیشینه، یک شعاع دهانه قطعه موازی‌ساز بهینه وجود دارد. شعاع ۱۰ mm با مقدار ٪۲۵٫۱۶ توان در سبدِ ۵ cm، مناسب‌ترین گزینه است. نتایج این مقاله می‌تواند در طراحی‌های اپتیکی سامانه لیزری مبتنی بر ترکیب باریکه مفید باشد.

مرجع‌ها

J. K. Jabczynski and P. Gontar, "Effect of beam profile and partial coherence on coherent beam combining performance," *Optics Communications*, vol. 442, pp. 40-45, 2019.

D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives," *JOSA B*, vol. 27, no. 11, pp. B63-B92, 2010.

C. L. Linslal et al., "Challenges in coherent beam combining of high power fiber amplifiers: A review," *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 277-293, 2022.

J. Zuo, F. Zou, X. Zhou, C. Geng, F. Li, Q. Jia, J. Jiang, Z. Li, J. Liu, X. Ma, and X. Li, "Coherent combining of a large-scale fiber laser array over 2.1 km in turbulence based on a beam conformal projection system," *Optics Letters*, vol. 47, no. 2, pp. 365-368, 2022.

M. A. Vorontsov, and S. L. Lachinova, “Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis,” *JOSA A*, vol. 25, no. 8, pp. 1949-1959, 2008.

Z. Pu et al. “Optimal truncation of element beam in a coherent fiber laser array,” *Chinese Physics Letters*, vol. 26, no. 4, p. 044206, 2009.

J. K. Jabczynski, and P Gontar, “Analysis of the caustics of partially coherently combined truncated Gaussian beams,” *Applied Optics*, vol. 59, no. 11, pp. 3340-3346, 2020.

The 30th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2024), and the 16th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2024). Damghan University, Damghan, Iran, Jan. 29-Jan. 31, 2024

حسگر گلبول قرمز در سرم خون انسان با کمک تشدیدگر حلقوی بلور فونونی

احسان مهدیزاده عمرانی، فخرالدین نظری

دانشکده مهندسی فناوری نوین ، دانشگاه تخصصی فناوری نوین آمل

نویسنده مسئول: nazari@ausmt.ac.ir, ehsanmehdizadeh۷۲@gmail.com

چکیده- تشخیص گلبول قرمز (RBC) در تشخیص بیماری‌های خونی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، ما یک رویکرد جدید با استفاده از بلور فونونیکی برای سنجش پارامتر RBC در مقایسه با سرم خون طبیعی پیشنهاد می‌شود. ساختار حسگر پیشنهادی، از یک بلور فونونیک دو بعدی با ماده میزبان PMMA و یک آرایش تناوبی مربعی از ستون‌های تنگستن دایره‌ای تشکیل شده است. ساختار سنسور شامل یک تشدیدگر حلقوی است که از یک سمت به یک موجبر کوپل شده است و در داخل تشدیدگر سلیندرهای خالی تعبیه شده است که از سرم خونی نرمال و سرم خونی بیمار (که مقدار گلبول قرمز آن بدلیل بیماری بالاست) پر می‌شود. حسگر پیشنهادی ما می‌تواند هر گونه تغییر در پارامترهای RBC را در مقایسه با سرم نرمال آشکار کند که ممکن است نشانه‌ای از بیماری خونی باشد.

کلید واژه- سنسور، گلبول قرمز، موجبر،حلقه تشدید کننده، بلور فونونیک

Red blood cell sensor in human serum using phononic crystal ring resonator

Ehsan Mehdizadeh Omrani, Fakhrodin Nazari

Corresponding author: nazari@ausmt.ac.ir, ehsanmehdizadeh72@gmail.com ,

Abstract- The detection of red blood cells (RBC) is highly important in diagnosing blood disorders. In this article, we propose a novel approach using phononic crystals to measure RBC parameters compared to normal blood serum. The proposed sensor structure consists of a 2D phononic crystal with a PMMA host material and a square array of tungsten circular columns. The sensor structure includes a ring resonator coupled to a waveguide, with empty cylinders embedded inside the resonator that are filled with normal blood serum and diseased blood serum (which has a higher level of red blood cells due to the disease). Our proposed sensor can detect any changes in RBC parameters compared to normal serum, which may be indicative of a blood disorder.

Keywords: Sensor, RBC, Waveguide, Ring resonator, Phononic crystal

Introduction

Phononic crystals (PnCs) are man-made structures consisting of a periodic arrangement of scatterers embedded in a matrix. These structures can be created using solid-solid, fluid-fluid, and solid-fluid materials. The Phononic Bandgap is a crucial characteristic of PnCs, as it represents a frequency range where wave propagation is forbidden. In recent times, researchers have extensively explored the potential applications of PnCs in various fields, such as sensors [1,2], demultiplexers [3-5], filters [6], and modulators [7]. Investigations have been conducted on 1-D [8-10], 2-D [11-13], and 3-D [14] sensors. For example, a one-dimensional sensor based on PnCs was developed to detect the concentration of Nickel chloride (NiCl2) in water [8]. Mehaney et al. introduced a one-dimensional fuel sensor based on PnCs to detect gasoline components [9]. Another study successfully detected a highly toxic metal ion in water, Cadmium Bromide (CdBr2), using a sensor employing local resonance porous technology [10]. Furthermore, a PnC-based sensor was designed to detect acoustic changes in Methyl nonafluorobutyl ether (MNE) and Ethyl nonafluorobutyl ether (ENE) [11]. In this paper, we propose a novel type of sensor utilizing solid-solid PnCs to detect any alteration in the Red Blood Cell (RBC) count in blood serum. The sensor, modeled as a Notch filter, presents an innovative and efficient approach for RBC detection. To evaluate its performance, numerical simulations are conducted employing the finite element method (FEM). The results demonstrate that the resonance peak frequency exhibits significant variations with different RBC parameters within the ring resonator configuration of the sensor. The sensitivity of the Notch filter-like sensor to RBC alterations is measured at 28 Hz.s/m.

Dispersion curves and design procedure

The sensor's structure comprises a 2D PnC composed of circular cylinders made of Tungsten (14×14). These cylinders are arranged in a periodic square pattern with a radius of r=200μm, and are embedded in a PMMA background. The lattice constant, denoted as *a*, is equal to 500μm. To analyse the behaviour of the system, Bloch-Floquet theory is employed. The Bloch wave vector (Kx, Ky) is scanned along the Γ-X-M direction, which corresponds to the first Brillouin Zone (BZ).

In this study, we investigate the eigenvalues of the system to determine the existence of a full Phononic band gap (PnBG). This is achieved by imposing Bloch-Floquet periodic boundary conditions on the outer boundaries of the unit cell. The obtained results, depicted in Fig. 1(b), reveal that the unit cell exhibits a complete band gap in the frequency range of 1MHz to 3MHz. Within this range, no wave propagation occurs.

Fig. 1(a) provides a two-dimensional view of the PnC unit cell, illustrating the square lattice arrangement of Tungsten cylinders in the PMMA host material. The material properties of the proposed structure are presented in Table 1 [15].

Furthermore, Fig. 2 presents a schematic representation of the proposed ring resonator based sensor. This sensor consists of a ring resonator that is side-coupled to a bus waveguide. Table 2 provides information regarding the density and sound velocity of RBC and normal blood serum [16].

Table1. Elastic parameters of PMMA and Tungsten [15]

Material	Density(kg/m^3)	Young modulus (Pa)	Poisson's ratio
PMMA	1190	3 × (10^9)	0.4
Tungsten	19350	411 × (10^9)	0.28

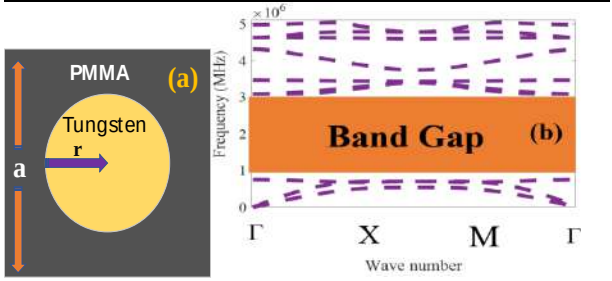


Fig. 1 (a) 2D View of PnC unit cell, (b) The dispersion curve.

Table 2. Acoustic parameters of RBC and normal serums [16]

Samples	Density(kg/m^3)	Speed of sound (m/s)
RBC serum	1077	1586
Normal Serum	1052	1556

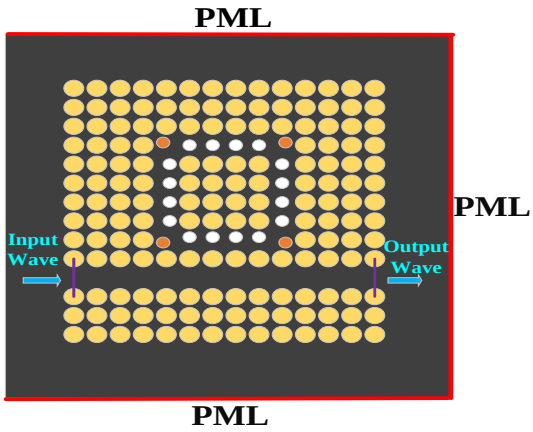


Fig. 2 Schematic of the ring resonator based sensor

3. Simulation results and discussion

We utilize a Perfectly Matched Layer (PML) boundary condition on three sides of the boundary. An external force with a magnitude of F=1N is applied in the X-direction within the frequency range of the band gap at the input port. Various types of RBC and normal serums, listed in Table 2, are injected into the empty cylinders of the ring resonator. Additionally, we position scatters around the ring resonator using orange circles with a radius of 100 μm. The scatters are located at a distance of d=1.064*a* (the distance between the scatterer and the central circle), as shown in Fig 2. To analyse the system, transmission spectra are simulated using the finite element method and presented in Figure 3.

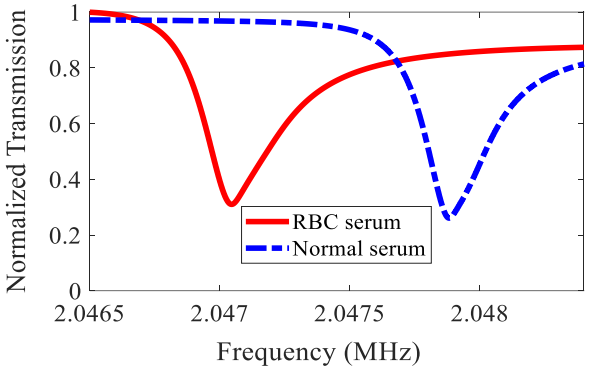


Fig. 3. Transmission spectra of the proposed sensor

The different acoustic parameters in the filled ring resonator result in different resonance frequencies. The profile of the total displacements for two resonance frequencies is illustrated in Fig. 4. The frequency range is between 2.0465 MHz to 2.0484 MHz with 1 Hz step. The resonance frequencies and sensitivity of the RBC serum and normal serum of the proposed sensor are presented in Table 3.

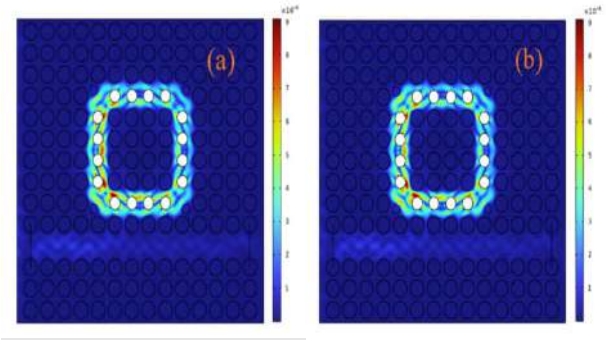


Fig. 4 The profile of total displacement, (a) RBC serum (f=2047040 Hz), (b) normal serum (f=2047880 Hz).

The ratio of sensitivity is calculated as follows [12]:

$$S = \Delta f/\Delta v \quad (1)$$

Where Δf is different between two resonance frequency and Δv is different sound velocities between RBC serum and normal serum.

Table 3. The resonance frequencies and sensitivity of the proposed sensor

Samples	f (Hz)	S (Hz.s/m)
RBC serum	2047040	28
Normal serum	2047880	-

4. Conclusion

In order to diagnose blood disorders, the detection of RBC is of utmost importance. This scientific paper aims to present an innovative method utilizing PnCs to measure RBC parameters in comparison to those found in normal blood serum. The proposed sensor structure incorporates a ring resonator is coupled to a bus-waveguide, while empty cylinders are integrated into the resonator and filled with both normal and diseased blood serum (the latter exhibiting a higher concentration of red blood cells due to the presence of a disease). By analysing any variations in RBC parameters compared to those observed in normal serum, our proposed sensor has the capability to detect potential blood disorders.

Acknowledgements

This research was supported using the research grant from Amol University of special modern Technologies.

References

[1] Gharibi, H., Mehaney, A., & Bahrami, A. High performance design for detecting NaI–water concentrations using a two-

dimensional phononic crystal biosensor. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *54*(1), 015304. (2020).

[2] Fang, T. Y., Sun, X. W., Wen, X. D., Li, Y. X., Liu, X. X., Song, T., Song, Y., & Liu, Z. J. High-performance phononic crystal sensing structure for acetone solution concentration sensing. Scientific Reports, 13(1), 7057 (2023).

[3] Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., & Nazari, F. Designing switchable phononic crystal-based acoustic demultiplexer. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, *63*(9), 1468-1473 (2016).

[4] Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., & Nazari, F. Designing phononic crystal based tunable four-channel acoustic demultiplexer. *Journal of Molecular Liquids*, *281*, 100-107 (2019).

[5] Babaki, J., & Nazari, F. Heterostructure based demultiplexer using solid–solid phononic crystal ring resonators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *53*(37), 375301 (2020). \

[6] Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., & Nazari, F. Acoustic add-drop filters based on phononic crystal ring resonators. *Physical Review B*, *93*(1), 014304 (2016).

[7] Babaki, J., & Nazari, F. Solid–liquid modulator via phononic crystal-based Mach–Zehnder interferometer. *The European Physical Journal Plus*, *137*(1), 1-8 (2022).

[8] Zaki, S. E., Mehaney, A., & Aly, A. H. Novel highly-sensitive heavy metals sensor-based 1D phononic crystal for NiCl2 detection. Optical and Quantum Electronics, 54(12), 1-17 (2022).

[9] Mehaney, A., Hassan, M. S., & Elsayed, H. A. Fuel Phononic Crystal Sensor for the Determination and Discrimination of Gasoline Components. Plasmonics, 16(6), 2193-2200 (2021).

[10] Alrowaili. Z. A., Aouassa M, Mahmoud. M. H., Karam S. El-Nasser, Elsayed H. A, Taha T. A, Ashour M. A, Hajjiah .A, and Mehaney. A. Locally resonant porous phononic crystal sensor for heavy metals detection: A new approach of highly sensitive liquid sensors. Journal of Molecular Liquids 369 (2023).

[11] Muhammad. Phononic crystal-based sensor to detect acoustic variations in methyl & ethyl nonafluorobutyl ether. MATERIALS TODAY COMMUNICATIONS, 32 (2022).

[12] Lucklum, R., Ke, M., & Zubtsov, M. Two-dimensional phononic crystal sensor based on a cavity mode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *171*, 271-277 (2012).

[13] Biçer, A., Durmuslar, A. S., Korozlu, N., & Cicek, A. An Acoustic Add-Drop Filter in a Phononic Crystal for High-Sensitivity Detection of Methanol in Ethanol in the Liquid Phase. IEEE Sensors Journal, 22(15), 14799-14805 (2022).

[14] Lucklum, F. Phononic-fluidic cavity sensors for high-resolution measurement of concentration and speed of sound in liquid solutions and mixtures. *Measurement Science and Technology*, *32*(8), 085108 (2021).

[15] Motaei, F., Bahrami, A., & Badri Ghavifekr, H. Magnetically controlled three-channel phononic switch. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *29*(25), 4478-4486 (2022).

[16] Carstensen, E. L., & Schwan, H. P. Absorption of sound arising from the presence of intact cells in blood. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *31*(2), 185-189 (1959).

The 30th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2024), and the 16th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2024). Damghan University, Damghan, Iran, Jan. 29-Jan. 31, 2024

تشخیص سرطان سینه در سرم خونی انسان مبتنی بر پیکربندی موجبری بلور فونونی

احسان مهدیزاده عمرانی، فخرالدین نظری

دانشکده مهندسی فناوری نوین ، دانشگاه تخصصی فناوری نوین آمل

نویسنده مسئول: ehsanmehdizadeh72@gmail.com, nazari@ausmt.ac.ir

چکیده: تشخیص سریع سرطان سینه در درمان این بیماری بسیار مهم است. در این مقاله، رویکردی با استفاده از پیکربندی بلور فونونیکی برای تشخیص سرطان سینه از طریق سرم خونی انسان ارائه می‌شود. ساختار حسگر پیشنهادی از یک بلور فونونیکی دو بعدی تشکیل شده است. این بلور از PMMA به عنوان ماده میزبان و یک آرایشی از آرایه تناوبی مربعی از ستون‌های تنگستن دایره‌ای شکل ایجاد گردید. این طرح شامل یک موجبر مستقیم است که در آن پنج ستون خالی تعبیه شده در وسط موجبر، یکبار پر از سرم خونی فرد سالم و در دیگر حالت پر از سرم خونی فرد دچار سرطان سینه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که محل فرکانس خروجی در دو حالت جابجایی بزرگی دارد. در سنسور پیشنهادی شاخص ضریب کیفیت متوسط برابر ۱۲۵۲۳ است. همچنین، میانگین میزان حساسیت و معیار شایستگی برابر Hz.s/m ۱۱۳۷ و ۱۹ به ترتیب است. این سنسور توانایی اولیه تغییرات ناشی از سرطان سینه در سرم خونی فرد بیمار را می تواند نشان دهد.

کلید واژه: سنسور، موجبر، سرطان سینه ، بلور فونونیکی

Detecting breast cancer in human serum based on phononic crystal waveguide configuration

Ehsan Mehdizadeh Omrani, Fakhrodin Nazari

Corresponding author: nazari@ausmt.ac.ir,ehsanmehdizadeh72@gmail.com

Abstract- Early detection of breast cancer is crucial in treating this disease. In this article, an approach using phononic crystal configuration for breast cancer detection through human serum is presented. The proposed sensor structure consists of a two-dimensional phononic crystal. The crystal is made of PMMA as the host material and an arrangement of square array of tungsten cylindrical columns. The design includes a straight waveguide in which five empty columns are embedded in the middle of the waveguide, once filled with serum from a healthy individual and in the other case filled with serum from an individual with breast cancer. The results show that the output frequency location has significant shifts in the two displacement states. In the proposed sensor, the average quality factor is 12523. Additionally, the average sensitivity and merit factor are Hz.s/m 1137 and 19, respectively. This sensor can demonstrate the initial capability of detecting changes caused by breast cancer in the serum of a patient

Keywords: Sensor, waveguide, Breast cancer, Phononic crystal

Introduction

Phononic crystals (PnCs) refer to periodic structures composed of two different types of materials. These structures can be fabricated using solid-solid, fluid-fluid, or solid-fluid combinations. In recent years, there has been significant research conducted on the design and simulation of various PnCs-based sensors [1, 2], as well as other PnCs devices such as demultiplexers [3-5], filters [6], switches [7], and modulators [8]. Researchers have explored the implementation of different types of sensors in one-dimensional (1-D) [9], two-dimensional (2-D) [10,11], and three-dimensional (3-D) [12] configurations. For example, a 1-D PnC-based sensor was developed to detect the concentration of Nickel chloride (NiCl2) in water [9]. Ahmet Bicer's work presented an add-drop filter that determined the concentration of methanol in ethanol, allowing for the measurement of ethanol concentration in a mixture of ethanol and methanol, as well as their individual states [11]. Additionally, a sensor utilizing a Mach-Zehnder interferometer (MZI) configuration was employed to determine the concentration of methanol in ethanol within the liquid phase [13]. Zaki's research introduced a novel gas sensor capable of detecting a range of gases [14], while a highly sensitive gas sensor based on Fano resonance modes was proposed using a periodic and Fibonacci quasi-periodic Pt/PtS_2 structure [15]. Furthermore, a 2-D PnC sensor was utilized as a real-time measuring system for determining the octane level of gasoline [16]. In this paper, we present a solid-solid PnC-based sensor designed to detect the presence of breast cancer (BC). The sensor design incorporates a background material of PMMA and a periodic arrangement of circular scatters filled with Tungsten as inclusions. Numerical simulations were performed using the finite element method (FEM). The proposed sensor exhibits a quality factor of 14601 for BC serum samples and 10445 for normal blood serum samples. The sensitivity and figure of merit (FOM) of the sensor are determined to be 1137 Hz.s/m, and 19, respectively.

.2. Sensor design

The sensor employed in this study is a 2D-PnC consisting of circular cylinders made of Tungsten with dimensions of 9×13 arranged in a regular square lattice. The cylinders have a radius of 200 µm and are embedded in a PMMA background. The lattice constant, denoted as '*a*', is equal to 500 µm. To investigate the wave propagation characteristics, the Bloch wave vector (Kx, Ky) is scanned along the Γ-X-M direction, which corresponds to the first Brillouin Zone (BZ) using the Bloch-Floquet theory. The results indicate that within the unit cell, there exists a complete band gap where wave propagation is absent, spanning a frequency range of approximately 1 MHz to 3 MHz, as depicted in Figure 1(b). Additionally, Figure 1(a) illustrates a two-dimensional representation of the unit cell. Further details regarding the materials used in this structure can be found in Table 1 [7]. Figure 2 showcases a schematic of the proposed Phononic Crystal (PnC) sensor, including a bus-waveguide. To enable sensor applications, five empty cylinders with a radius of 150 µm are embedded into the waveguide. These empty cylinders will be filled with BC and normal blood serums, with their respective densities and sound velocities provided in Table 2 [17,18].

Table 1. Elastic parameters of PMMA and Tungsten [7]

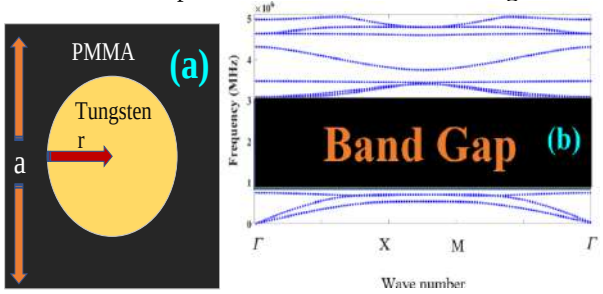


Fig. 1 (a) 2D View of PnC unit cell, (b) The dispersion curve.

Material	Density(kg/m^3)	Young modulus (Pa)	Poisson's ratio
PMMA	1190	3× (10^9)	0.4
Tungsten	19350	411× (10^9)	0.28

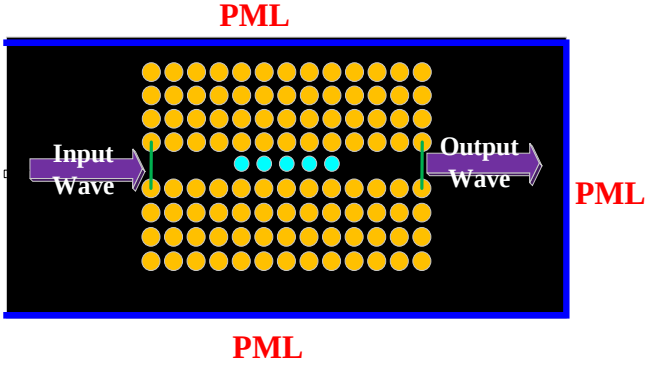
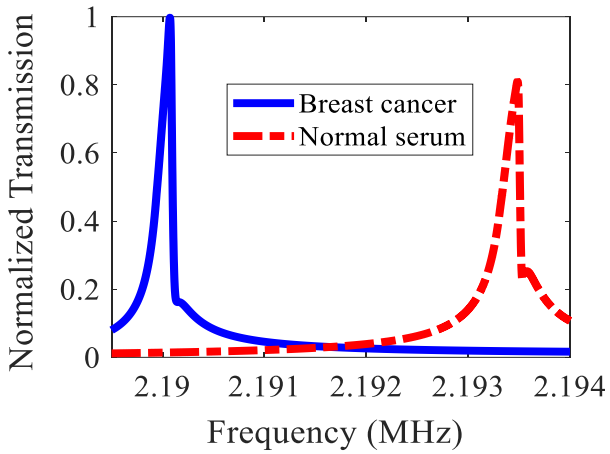


Fig. 2 Schematic of the proposed PnC sensor

3. Simulation results and discussion

In order to replicate the suggested structure, a Perfectly Matched Layer (PML) boundary condition is implemented on three sides of the boundary. A force of F=1N is exerted within the frequency range of the band gap at the input port, specifically in the X-direction. Initially, the empty cylinders of the waveguide are filled with BC blood serum, and subsequently with normal blood serum. To evaluate the behavior of the system, transmission spectra are simulated using the finite element method and visually presented in Figure 3. The outcomes demonstrate a notable displacement in the resonance frequency peak for both BC blood serum and normal blood serum, suggesting its potential for effectively detecting BC.

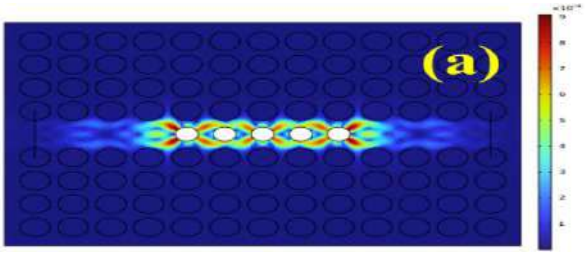
Table 2. Acoustic parameters of BC and normal serum [17, 18].



Samples	Density kg/m^3)	Speed of sound (m/s)
Breast Cancer	1056.6	1507
Normal Serum	1018	1510

Fig. 3 The transmission spectrum of proposed structure

Figure.4 illustrates the profile of total displacements for two resonance frequencies of BC and normal serum. The frequency range spans from 2.1895 MHz to 2.194 MHz with a 1 Hz increment. The resonance frequencies and acoustic parameters of the BC and normal blood serum for the proposed sensor are detailed in Table 3.



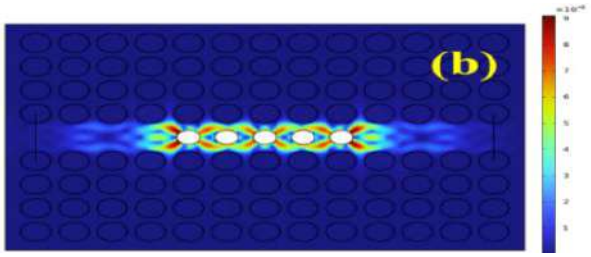


Fig. 4 The profile of the total displacement of BC and normal serums, (a) Breast cancer (f=2190070 Hz),(b) normal (f=2193480 Hz) .

One of the important parameter is quality factor (Q) calculated as follows [1]:

$$Q=\frac{f_0}{FWHM} \quad (1)$$

Where f_0 and FWHM are the central resonance frequency and the full-width at half-maximum.
Another important parameter is sensitivity that show any change in input parameter, and it is calculated as follows [10]:

$$S=\frac{\Delta f}{\Delta v} \quad (2)$$

Where Δf is difference between two resonance frequency and Δv is different sound velocity between BC and normal blood serums.
Another important parameter is figure of merit (FOM) that sometimes called the reduced sensitivity, and it is calculated as follows [19]:

$$FOM=\frac{\Delta f}{\Delta v.f_{FWHM}} \quad (3)$$

Table 3. Simulations results of BC and normal serum

4. Conclusion

In this paper, we present a novel method for detecting breast cancer in human serum using a photonic crystal configuration. The sensor structure we propose consists of a two-dimensional photonic crystal made of PMMA as the host material, with a square array of tungsten cylindrical columns arranged within it.

The results indicate significant shifts in the output frequency location between the two different serums. The proposed sensor exhibits an average quality factor of 12523, demonstrating its high performance. Moreover, the average sensitivity and merit factor are measured at Hz.s/m 1137 and 19,

Samples	f (Hz)	Q	S (Hz.s/m)	FOM
Breast Cancer	2190070	14601	1137	19
Normal Serum	2193480	10445	0	-

respectively. This sensor showcases its initial capability to detect changes caused by breast cancer in a patient's serum.

Acknowledgements

This research was supported using the research grant from Amol University of special modern Technologies.

References

[1] Gharibi, H., Mehaney, A., & Bahrami, A. High performance design for detecting NaI–water concentrations using a two-dimensional phononic crystal biosensor. Journal of Physics D: Applied Physics, 54(1), 015304 (2020)..
[2] Fang, T. Y., Sun, X. W., Wen, X. D., Li, Y. X., Liu, X. X., Song, T., Song, Y., & Liu, Z. J. High-performance phononic crystal sensing structure for acetone solution concentration sensing. Scientific Reports, 13(1), 7057 (2023).
[3] Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., & Nazari, F.. Designing switchable phononic crystal-based acoustic demultiplexer. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 63(9), 1468-1473 (2016).
[4] Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., & Nazari, F.. Designing phononic crystal based tunable four-channel acoustic demultiplexer. Journal of Molecular Liquids, 281, 100-107 (2019).
[5] Babaki, J., & Nazari, F. Heterostructure based demultiplexer using solid–solid phononic crystal ring resonators. Journal of Physics D: Applied Physics, 53(37), 375301 (2020).
[6] Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., & Nazari, F.. Acoustic add-drop filters based on phononic crystal ring resonators. Physical Review B, 93(1), 014304 (2016).
[7] Motaei, F., Bahrami, A., & Badri Ghavifekr, H.. Magnetically controlled three-channel phononic switch. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 29(25), 4478-4486 (2022).
[8] Babaki, J., & Nazari, F.. Solid–liquid modulator via phononic crystal-based Mach–Zehnder interferometer. The European Physical Journal Plus, 137(1), 1-8 (2022).
[9] Zaki, S. E., Mehaney, A., & Aly, A. H. Novel highly-sensitive heavy metals sensor-based 1D phononic crystal for NiCl2 detection. Optical and Quantum Electronics, 54(12), 1-17(2022).
[10] Lucklum, R., Ke, M., & Zubtsov, M. Two-dimensional phononic crystal sensor based on a cavity mode. Sensors and Actuators B: Chemical, 171, 271-277 (2012).
[11] Biçer, A., Durmuslar, A. S., Korozlu, N., & Cicek, A. An Acoustic Add-Drop Filter in a Phononic Crystal for High-Sensitivity Detection of Methanol in Ethanol in the Liquid Phase. IEEE Sensors Journal, 22(15), 14799-14805 (2022).
[12] Lucklum, F. Phononic-fluidic cavity sensors for high-resolution measurement of concentration and speed of sound in liquid solutions and mixtures. *Measurement Science and Technology*, *32*(8), 085108 (2021).
[13] Salman, A., Ates, E., Biçer, A., Deniz, S., Cicek, A., & Korozlu, N. Determination of methanol concentration in ethanol in liquid phase by a phononic crystal Mach-Zehnder interferometer. Physica Scripta, 96(12), 125032 (2021).
[14] Zaki, S. E., Mehaney, A., Hassanein, H. M., & Aly, A. H. Fano resonance based defected 1D phononic crystal for highly sensitive gas sensing applications. Scientific Reports, 10(1), 17979 (2020).
[15] Zaki, S. E., & Basyooni, M. A. Ultra-sensitive gas sensor based fano resonance modes in periodic and fibonacci quasi-periodic Pt/PtS2 structures. Scientific Reports, 12(1), 1-14 (2022).
[16] Oseev, A., Zubtsov, M., & Lucklum, R. Octane number determination of gasoline with a phononic crystal sensor. Procedia Engineering, 47, 1382-1385 (2012).
[17] Cushing, K. W., Garofalo, F., Magnusson, C., Ekblad, L., Bruus, H., & Laurell, T. Ultrasound characterization of microbead and cell suspensions by speed of sound measurements of neutrally buoyant samples. Analytical chemistry, 89(17), 8917-8923 (2017).
[18] Schneditz, D., Heimel, H., & Stabinger, H. Sound speed, density and total protein concentration of blood (1989).
[19] Lucklum, R., & Mukhin, N. Enhanced sensitivity of resonant liquid sensors by phononic crystals. Journal of Applied Physics, 130(2) (2021).

The 30th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2024), and the 16th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2024).
Damghan University, Damghan, Iran,
Jan. 29-Jan. 31, 2024

اثر پروسکایت های هالیدی مبتنی بر متیل آمونیوم بر عملکرد سلول خورشیدی با ساختار $FTO/SnO_2(ETL)/Perovskite/Cu_2O(HTL)/carbon$

کریمی مونه ، پریسا[۱] ؛ شریفی، نفیسه[۱و۲]

[۱] دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان ، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

[۲] پژوهشکده علوم و فناوری نانو ، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

چکیده- در سال های اخیر، سلول های خورشیدی پروسکایت (PSCs) به عنوان یک فناوری جدید امیدوارکننده برای تبدیل نور خورشید به الکتریسیته ظهور کرده اند. پروسکایت ها پتانسیل قابل توجهی در تولید بازدهی بالا، ساخت در مقیاس بزرگ و هزینه کم را از خود نشان داده اند که سبب شده است که سلول های خورشیدی بسیار مورد توجه قرار بگیرند. پروسکایت های آلی-معدنی مبتنی بر متیل آمونیوم بازدهی بالا از خود نشان داده اند، که برای بررسی تأثیر پروسکایت های مختلف بر عملکرد ساختار دستگاه مسطح $FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon$ PSCs، با استفاده از نرم افزار SCAPS-1D شبیه سازی انجام شد. HOIP های $MAPbCl_3$، $MAPbBr_3$، $MAPbI_3$، $MASnCl_3$، $MASnBr_3$ و $MASnI_3$ انتخاب شدند. برای سلول خورشیدی پروسکایتی متشکل از $MASnI_3$ بالاترین بازدهی ۱۵/۳۲ درصد و بالاترین چگالی جریان اتصال کوتاه $28/78 mA/cm^2$ محاسبه شد. نتایج این مطالعه نشان می دهد که سلول های خورشیدی پروسکایتی آلی- معدنی بدون سرب می توانند عملکرد قابل مقایسه با پروسکایت های مبتنی بر سرب داشته باشند، که پتانسیل آنها را به عنوان یک جایگزین مناسب و پایدار برای کاربردهای فتوولتایی نشان می دهد.

کلید واژه- سلول های خورشیدی پروسکایتی، پروسکایت هالیدی مبتی بر میتیل آمونیوم ، شبیه سازی، SCAPS.

Effect of different methylammonium halide perovskites on the performance of the FTO/SnO2(ETL)/Perovskite/Cu2O(HTL)/carbon device configuration

Parisa Karimi Moone [1], Nafiseh Sharifi[1,2*]

[1] Department of Photonics and Plasma, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan 87317, Iran
[2] Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan 87317, Iran
*sharifi@kashanu.ac.ir,parisa.mjkarimi@grad.kashanu.ac.ir

Abstract- In recent years, perovskite solar cells (PSCs) have emerged as a promising new technology for converting sunlight into electricity. Perovskites have shown significant potential in achieving high efficiency, large-scale manufacturing, and low cost, which has led to them gaining considerable attention. Organic-inorganic perovskites based on methylammonium have demonstrated high efficiency, which prompted a study using the SCAPS-1D simulation software to investigate the effect of different perovskites on the performance of the flat device structure $FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon$ PSCs. HOIPs of $MAPbCl_3$, $MAPbBr_3$, $MAPbI_3$, $MASnCl_3$, $MASnBr_3$, and $MASnI_3$ were chosen. For the perovskite solar cell consisting of $MASnI_3$, the highest efficiency of 15.32% and the highest short-circuit current density of 28.78 mA/cm^2 were calculated. The results of this study show that lead-free HOIP solar cells can achieve performance comparable to lead-based perovskites, which demonstrates their potential as a suitable and sustainable alternative for photovoltaic applications.

Keywords: Perovskite Solar Cell, methylammonium halide perovskites, Simulation, SCAPS.

1. Introduction

Demand for energy has increased, resulting in increased emissions of greenhouse gases that fuel global warming and highlight the need for inexpensive, highly efficient, and commercially viable renewable energy sources. An endless and pure energy source is used in photovoltaics, the direct conversion of sunlight into electric power utilizing semiconducting materials [1]. Perovskite solar cells (PSCs) have a performance report of 25.5%, making them efficient and environmentally beneficial solar cells [2]. Photovoltaic cells based on perovskite materials have made significant advancements in power conversion efficiency (PCE) within a short time span. These cells have gained popularity due to their various advantages, including high absorption coefficients, superior charge carrier mobility, a tunable energy bandgap, lower exciton binding energy, cost-effectiveness, and the ability to be manufactured at room temperatures[3]. Because of their high PCEs, hybrid organic-inorganic perovskites (HOIPs), in particular methylammonium (MA) Pb halides (Cl, Br, I), have been used as light-harvesting materials in photovoltaic solar cells (PSCs) [4]. A useful tool that facilitates a deeper comprehension of the device's fundamental mechanics is device simulation. It also makes clear how the device's overall performance is impacted by the properties of the materials employed in it. Here, we have compared the performance of PSCs using the device architecture FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon, using six different perovskites with different metal cations and halogens. In this study, we obtained hybrid organic-inorganic perovskites (HOIPs) including $MAPbCl_3$, $MAPbBr_3$, $MAPbI_3$, $MASnCl_3$, $MASnBr_3$, and $MASnI_3$. SnO_2 was chosen as the electron transport layer (ETL) due to its higher mobility compared to TiO_2. Cu_2O was selected as the hole transport layer (HTL) due to its favorable band alignments with all the perovskites. Subsequently, we optimized the thickness, doping, and defect density of the light-harvesting layers to enhance the performance of the solar cell with the best results.

2. device structure

Specifically, SCAPS-1D (ver.3.3.10), a one-dimensional computer simulation program, was created by a photovoltaic researcher at the University of Gent, Belgium, for the investigation of hetero-structure solar cells with up to seven semiconductor layers in the field of electronics and information systems. The Poisson equation, the electron and hole continuity equations, and other related formulas form the foundation of the SCAPS-1D computations [5].

$$\frac{d^2}{dx^2}\psi(x) = -\frac{q}{\varepsilon_r}[p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x) \pm N_t]$$

$$\frac{dJ_n}{dx} + G_n - R_n = 0$$

$$-\frac{dJ_p}{dx} + G_p - R_p = 0$$

where q= charge, ε_r= dielectric permittivity, $\psi(x)$= potential, $p(x)$= concentration of free holes, $n(x)$= concentration of free electrons, $N_D^+(x)$= concentration of ionized donor, $N_A^-(x)$= concentration of ionized acceptor, N_t= defect density, J_n = electron current density, J_p = hole current density, G_n = generation rate of electrons, G_p= generation rate of holes, R_n = electron recombination rate, R_p = hole recombination rate. As shown in Fig. 1, the structure of the simulated PSC is FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon.

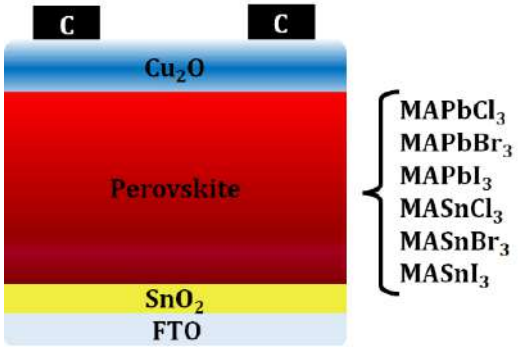


Figure2: Structure of MA-based perovskite solar cell used in the SCAPS-1D simulation.

bandgap energy (E_g), electron affinity (χ), conduction band effective density of states (N_C), valence band effective density of states (N_V), electron mobility (μ_e), hole mobility (μ_h), the

acceptor densities (N_A) and the donor densities (N_D) should be imported as input parameters. Perovskites. absorption coefficient (α) was computed using the formula $\alpha = A_\alpha(h\upsilon - E_g)^{1/2}$, where A_α was fixed at 10^5. The defect energy level is in the middle of the bandgap with a Gaussian distribution and energy of 0.1 eV. Influence of interface defects, very thin virtual layers, which are named Interface defect layers, were inserted between SnO_2/perovskite (with 5nm thickness) and between perovskite/Cu_2O (with 5nm thickness). Their physical parameters are adjusted similarly to the perovskite. The work functions of carbon and FTO are 5eV and 4.6 eV, respectively. V_{OC}, J_{SC}, FF, PCE, quantum efficiency (QE), generation (G) and recombination (R) profiles, energy band structure, and carrier current densities will be calculated for all structures.

3. Results and discussion

3.1. Analysis of the energy band diagram of the PSCs

Figure 3: Energy band diagram of different HOIP Layers shows the energy band diagram of MA-based perovskites from the SCAPS-1D software. The conduction band offset is defined as a separation between conduction band energy level of ETL and perovskite.

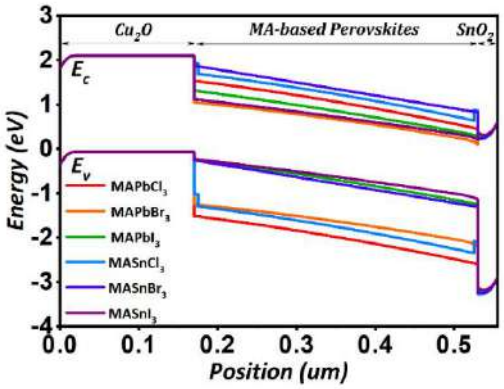
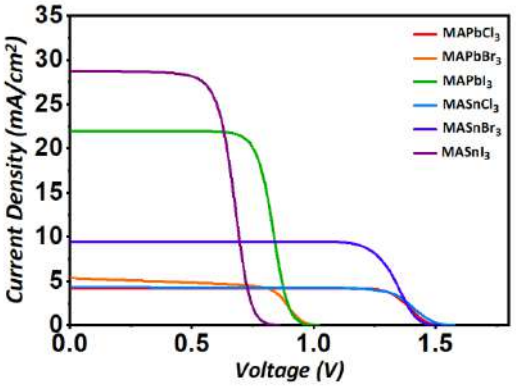


Figure **3:** Energy band diagram of different HOIP Layers

When the conduction band minimum of the ETL layer lies above the conduction band minimum of the perovskite, a spike is formed at ETL/perovskite interface and provides a barrier for electron flow. MASnBr3 and MASnI3 PSCs show spikes in the conduction band at the interface.

* 3.2. J-V and QE data

* The V_{OC} depends on the band gap. The larger the band gap, the higher the energy required to excite an electron from the valence band to the conduction band, and the higher the potential difference between the two bands. Therefore, the V_{OC} increases as the band gap increases. For $MAPbCl_3$ (Eg= 3.04 eV), $MASnCl_3$ (Eg= 3.50 eV), and $MASnBr_3$ (Eg= 2.13 eV), the V_{OC} is 1.52, 1.56, and 1.50. A smaller band gap can absorb more light, especially in the visible and near-infrared regions of the spectrum. Therefore, $MASnI_3$, with its smaller band gap, shows the best J_{SC} (28.78 mA/cm²) and the best performance (PCE = 15.32%) in this set of cells.



*

Figure 4: J-V of different PSCs consisting of various HOIPs

*

Figure 5 shows the QE of PSCs consisting of HOIPs. $MASnI_3$ with the lowest band gap has the broadest absorption spectrum and therefore shows the best QE values. The QE at the low wavelength region for these materials suggest that the electrons due to the high energy photons are efficiently generated and collected. In the high wavelength region, a high QE leads to a higher J_{SC}. $MASnCl_3$,

$MASnBr_3$, $MAPbCl_3$, and $MAPbBr_3$ have the narrowest of all.

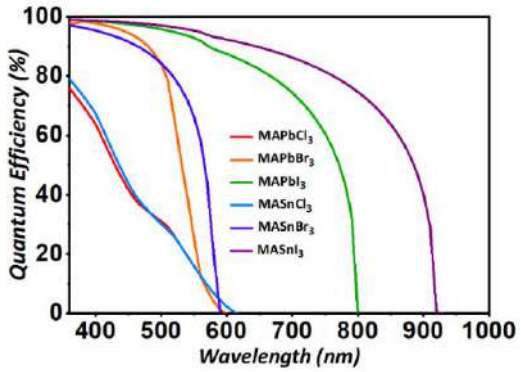


Figure 5: QE of different PSCs consisting of various HOIPs

* 3.4. Carrier generation and recombination rates of the PSCs

According to the findings that electron-hole pairs are produced when a photon is absorbed by an electron, it excites the electron from the valence band to the conduction band, and a hole is created in the valence band. All the device generation rates have peaks at Cu_2O/perovskite and perovskite/SnO_2 interfaces. The PSC consisting of $MASnI_3$ shows higher generation rates, especially within the perovskite near the perovskite/SnO_2 interfaces (Figure 6).

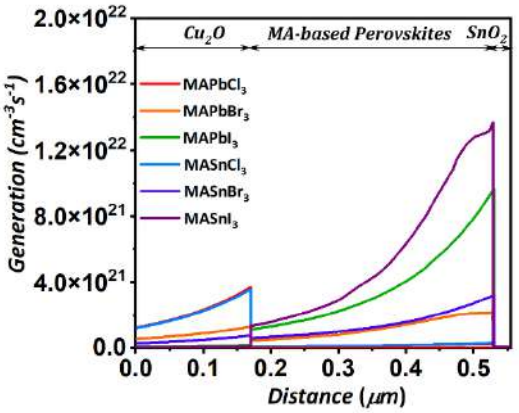


Figure 6: Generation rate of PSCs with different perovskites as a function of distance.

Among all the devices, $MASnCl_3$ shows highest V_{OC} of 1.56 V, whereas $MASnI_3$ shows lowest V_{OC} of 0.85 V. The device with $MASnI_3$ shows highest short circuit current density of 28.78mA/cm^2. $MAPbCl_3$ based device shows higher FF as compare other devices.

4. Conclusion

In this study, the PSCs with different perovskites were numerically studied by the SCAPS-1D software package. The impact of different HOIPs on the same device configuration having SnO_2 as ETL and Cu_2O as HTL was studied. The devices with $MASnBr_3$ HOIPs have the highest V_{OC} of 1.56 V. The highest FF of 79.28% belongs to $MAPbCl_3$ HOIPs -based solar cells. The $MASnI_3$ solar cell has the best PCE of 15.32% and the best J_{SC} of 28.78 mA/cm^2.

References

[1] A. O. M. Maka, “Solar energy technology and its roles in sustainable development,” no. April, pp. 476–483, 2022.
[2] B. G. Krishna, D. S. Ghosh, and S. Tiwari, “Hole and electron transport materials: A review on recent progress in organic charge transport materials for efficient, stable, and scalable perovskite solar cells,” *Chemistry of Inorganic Materials*, vol. 1, no. November, p. 100026, 2023, doi: 10.1016/j.cinorg.2023.100026.
[3] M. Hossain, B. Ali, and S. Mansour, “Bandgap Tuning of High Mobility Magnetron Sputtered Copper (I) Oxide Thin Films for Perovskite Solar Cell Applications Journal of Thin Films Research,” no. March, 2021, doi: 10.30799/jtfr.026.21050101.
[4] K. Ahmad and H. Kim, “Improved photovoltaic performance and stability of perovskite solar cells with device structure of (ITO/SnO2/CH3NH3PbI3/rGO+spiro-MeOTAD/Au),” *Mater Sci Eng B Solid State Mater Adv Technol*, vol. 289, no. December 2022, p. 116227, 2023, doi: 10.1016/j.mseb.2022.116227.
[5] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degrave, “Modelling polycrystalline semiconductor solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 361–362, pp. 527–532, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0040-6090(99)00825-1.

The 30th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2024), and the 16th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2024). Damghan University, Damghan, Iran, Jan. 29-Jan. 31, 2024

مقایسه سلول های خورشیدی پروسکایتی هالیدی مبتنی بر سزیم شامل لایه های انتقال دهنده بار SnO_2 و Cu_2O

کریمی مونه ، پریسا[۱] ؛ شریفی، نفیسه[۱و۲]

[۱] دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان ، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

[۲] پژوهشکده علوم و فناوری نانو ، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

چکیده- مهندسی شکاف نواری نقش اساسی در پیشرفت فناوری فتوولتایی، به ویژه برای سلول های خورشیدی نوظهور پروسکایت ایفا می کند. مدلسازی می تولند این اثر را در زمان کمتر وبا صرف هزینه کمتر پیش بینی کند.با توجه‌به ویژگی های عملکرد امیدوارکننده ی سلول های خورشیدی پروسکایت ، پروسکایت های تمام معدنی مبتنی بر سزیم به دلیل پایداری بالاتر نسبت به پروسکایت های آلی-معدنی توجه محققان را در حوزه فتوولتایی به خود جلب کرده است. این مطالعه به بررسی شش سلول خورشیدی متمایز ساخته شده از لایه جاذب پروسکایتی مبتنی بر سزیم ($CsPbCl_3$، $CsPbBr_3$، $CsPbI_3$، $CsSnCl_3$، $CsSnBr_3$، و $CsSnI_3$) با استفاده از برنامه شبیه سازی SCAPS-1D می‌پردازد. نتایج نشان می دهد که سلول خورشیدی شبیه سازی شده با لایه جاذب $CsSnI_3$ دارای بالاترین بازدهی و چگالی جریان به ترتیب برابر با ۱۸/۴۵ درصد و mA/cm^2 ۳۲/۸۵ است که می تواند به دلیل شکاف نواری باریک تر باشد. این یافته ها بر پتانسیل سلول های خورشیدی با لایه پروسکایتی تمام معدنی و بدون سرب برای دستیابی به سطوح عملکرد بالا قابل مقایسه با همتایان مبتنی بر سرب خود تأکید می کند.

کلید واژه- پروسکایت، سلول های خورشیدی، سلول های خورشیدی تمام معدنی، شبیه سازی.

Comparison of cesium halide perovskite solar cells using SnO2 and Cu2O as charge transport layers

Parisa Karimi Moone [1], Nafiseh Sharifi[1,2*]

[1] Department of Photonics and Plasma, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan 87317, Iran

[2] Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan 87317, Iran

*sharifi@kashanu.ac.ir,parisa.mjkarimi@grad.kashanu.ac.ir

Abstract- Bandgap engineering plays a key role in the advancement of photovoltaic technology, especially for emerging perovskite solar cells. Modelling can predict this effect in less time and at lower cost. Given the promising performance characteristics of perovskite solar cells, all-inorganic cesium-based perovskites have attracted the attention of researchers in the photovoltaic field due to their higher stability than organic-inorganic perovskites. This study delves into the investigation of six distinct solar cells fabricated using Cs-halide perovskite absorbers ($CsPbCl_3$, $CsPbBr_3$, $CsPbI_3$, $CsSnCl_3$, $CsSnBr_3$, and $CsSnI_3$) employing the SCAPS-1D simulation program. The results show that the simulated solar cell with the $CsSnI_3$ absorber layer has the highest efficiency and current density of 18.45% and 32.85 mA/cm^2, respectively, which could be due to the narrower bandgap. These findings highlight the potential of all-inorganic lead-free perovskite solar cells to achieve high performance levels comparable to their lead-based counterparts.

Keywords: Perovskite, Solar Cell, All-Inorganic Perovskite Solar Cell, Simulation.

1. Introduction

The escalating demand for energy consumption has resulted in higher emissions of greenhouse gases, contributing to global warming and emphasizing the need for low-cost, highly efficient, and economically viable renewable energy sources. Photovoltaics, which directly convert sunlight into electric power using semiconducting materials, harnesses an infinite and clean energy source [1]. PSCs are highlighted as efficient and environmentally friendly solar cells, with a reported performance of 25.5%, have made significant advancements in power conversion efficiency (PCE) in a comparatively short amount of time[2]. These advancements can be attributed to qualities like high absorption coefficients, superior charge carrier mobility, a direct and adjustable energy bandgap, lower exciton binding energy, affordability, and room temperature manufacturing [3]. A useful tool that facilitates a deeper comprehension of the device's fundamental mechanics is device simulation [4]. It also makes clear how the device's overall performance is impacted by the properties of the materials employed in it. In this work, we have investigated and analyzed the performance of perovskite solar cells (PSCs) utilizing the device structure FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon. Specifically, we have examined the behavior of 6 different perovskite materials with varying cations and halogens. In our research, we investigated the performance of various All-inorganic perovskites (AIP) including $CsPbCl_3$, $CsPbBr_3$, $CsPbI_3$, $CsSnCl_3$, $CsSnBr_3$, and $CsSnI_3$. To improve the mobility, we used SnO_2 as the electron transport layer (ETL) instead of TiO_2. Additionally, we chose Cu_2O as the hole transport layer (HTL) due to its favorable band alignments with all the perovskites. We then optimized the thickness, doping, and defect density of the light-harvesting layers to enhance the overall performance of the solar cell. The solar cell with the best results was further improved through these optimizations.

2. Device modelling and simulation

A photovoltaic researcher at the University of Gent, Belgium, specifically developed SCAPS-1D (ver.3.3.10), for the analysis of hetero-structure solar cells with up to seven semiconductor layers in the field of electronics and systems of information. The calculations used in SCAPS-1D are mainly based on the electron and hole continuity equations, as well as the Poisson equation[5].

$$\frac{d^2}{dx^2}\psi(x) = -\frac{q}{\varepsilon_r}[p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x) \pm N_t]$$

$$\frac{\mathrm{dJ_n}}{\mathrm{dx}} + \mathrm{G_n} - \mathrm{R_n} = 0$$

$$-\frac{\mathrm{dJ_p}}{\mathrm{dx}} + \mathrm{G_p} - \mathrm{R_p} = 0$$

where q= charge, ε_r= dielectric permittivity (relative), $\psi(x)$= electrostatic potential, $p(x)$= the number of holes, $n(x)$= the number of electrons, $N_D^+(x)$= acceptor concentration, $N_A^-(x)$= donor concentration, N_t= defect density, J_n = electron current density, J_p = hole current density, G_n = generation rate of electrons, G_p= generation rate of holes, R_n = electron recombination rate, R_p = hole recombination rate [6].

The structure of the simulated PSC is FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon, as seen in Figure 7.

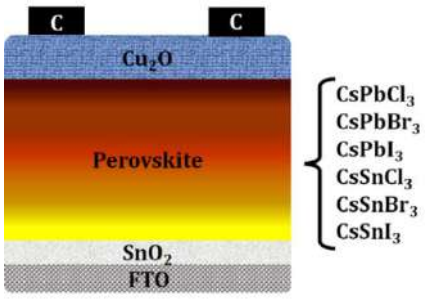


Figure 7: Schematic structure of the simulated PSCs.

The amount bandgap energy (Eg), electron affinity (χ), conduction band effective density of states (NC), valence band effective density of states (NV), electron mobility (μ_e), hole mobility (μ_h), the acceptor densities (NA) and the donor densities (ND) were imported as input parameters. The

formula for calculating the absorption coefficient (α) of perovskites is $\alpha = A_\alpha(h\upsilon - E_g)^{1/2}$, where Aα is seted at 105. The defect energy level is in the middle of the bandgap with a Gaussian distribution and energy of 0.1 eV. Influence of interface defects, very thin virtual layers, which are named Interface defect layers, were inserted between SnO2/perovskite (with 5nm thickness) and between perovskite/Cu2O (with 5nm thickness). Their physical parameters are adjusted similarly to the perovskite. The work functions of carbon and FTO are 5eV and 4.6 eV, respectively. VOC, JSC, FF, PCE, quantum efficiency (QE), generation (G) and recombination (R) profiles, energy band structure, and carrier current densities will be calculated for all structures.

3. Results and Discussions

* 3.1. Comparison of energy band diagram of the PSCs

The energy band diagram is a graphical representation of the energy levels of different materials within a perovskite solar cell (PSC). The conduction band offset (CBO) is a crucial parameter that influences the efficiency of PSCs. It represents the energy difference between the conduction band minimum (CBM) of the electron transport layer (ETL) and the CBM of the perovskite absorber layer. When the CBM of the ETL lies above the CBM of the perovskite, an energy barrier, known as a conduction band spike, is formed at the ETL/perovskite interface. This spike acts as a barrier for electron flow, hindering the recombination of electrons from the perovskite with holes in the ETL. In $CsSnBr_3$ and $CsSnI_3$ PSCs, the presence of conduction band spikes at the interface proves beneficial as seen in Figure 8. The spikes effectively enhance the barrier for electrons in the ETL, preventing them from diffusing back to the interface during forward current flow. This improved electron blocking capability contributes to enhanced power conversion efficiency in these PSCs.

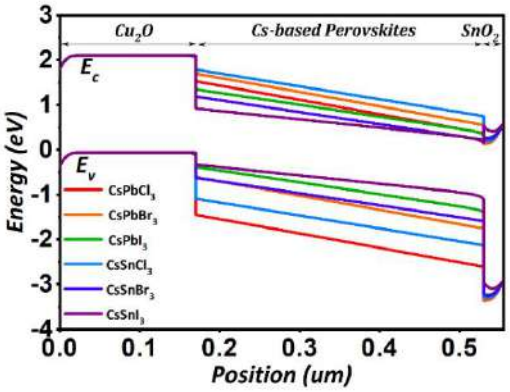


Figure 8: Energy band diagram after contact for PSCs consisting of different AIP

* 3.2. J-V and QE Parameters for PSCs.

In Figure 9, it can be observed that for $CsPbCl_3$ (with an energy gap of 2.98 eV), $CsPbBr_3$ (with an energy gap of 2.31 eV), and $CsPbI_3$ (with an energy gap of 1.73 eV), the values of V_{OC} are 1.63, 1.73, and 0.96, respectively. In PSCs, a higher V_{OC} is obtained when the band gap value is larger. As seen in $CsPbCl_3$ and $CsPbBr_3$ PSCs, their V_{OC} is higher than that of $CsPbI_3$ since the latter has a smaller band gap value. Interestingly, the V_{OC} of $CsPbBr_3$ is higher despite having a smaller band gap than $CsPbCl_3$.

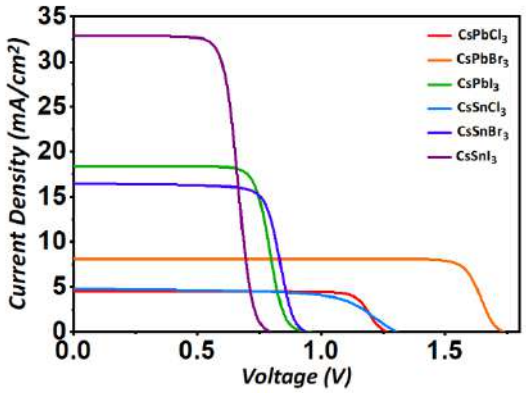


Figure 9: J-V of different PSCs

This is because V_{OC} is affected by recombination loss as well. Additionally, the values for the J_{SC} for $CsPbCl_3$, $CsPbBr_3$, and $CsPbI_3$ are 4.5, 8.11, and 18.41, respectively. The band gap of a semiconductor material determines the range of

light wavelengths that it can absorb. A smaller band gap corresponds to the ability to absorb longer wavelengths, including those in the visible and near-infrared regions of the electromagnetic spectrum. Consequently, $CsPbI_3$, with its narrowest band gap among the three perovskites considered, demonstrates the highest J_{SC}. This enhanced J_{SC} arises from the efficient absorption of a broader spectrum of sunlight, enabling the conversion of more incident photons into electrical energy.

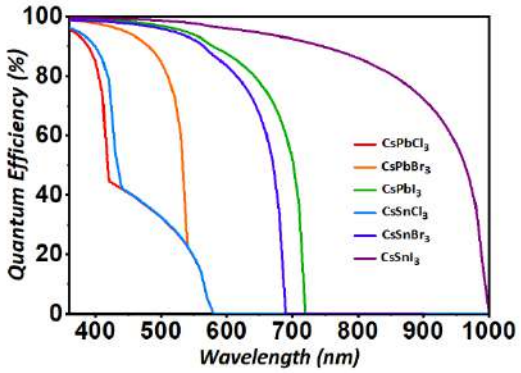


Figure 10: QE of different PSCs

Figure 10 illustrates the quantum efficiency (QE) spectra of PSCs fabricated using various AIPs. Among the AIPs examined, $CsSnI_3$ with its lower band gaps, exhibit the broadest absorption spectra, resulting in superior QE values. The QE at shorter wavelengths for these materials implies efficient electron generation and collection due to the high energy photons. In the longer wavelength region, a higher QE contributes to an enhanced JSC. $CsSnCl_3$, $CsPbCl_3$, and $CsPbBr_3$ possess the narrowest band gaps among the studied AIPs.

4. Conclusion

In this investigation, PSCs using different perovskites were explained numerically using the SCAPS-1D software package. The impact of different AIPs on identical device configurations employing SnO_2 as ETL and Cu_2O as HTL was examined. PSCs utilizing $CsPbBr_3$ and $CsSnCl_3$ AIPs were found to have the highest V_{OC} of 1.73 V. The solar cells incorporating $CsPbBr_3$ AIP recorded the highest FF of 85.75%. The Pb-free CsSnI3 solar cell utilizing entirely inorganic layers delivered the best PCE of 18.45% and the highest J_{SC} of 32.85 mA/cm2. The best performance with a PCE of 20.43% and the highest J_{SC} of 35.74 mA/cm^2, along with a V_{OC} of 0.81 V and FF of 70.17%, was obtained for the $CsSnI_3$ PSC.

References

[1] B. G. Krishna, D. S. Ghosh, and S. Tiwari, “Hole and electron transport materials: A review on recent progress in organic charge transport materials for efficient, stable, and scalable perovskite solar cells,” *Chem. Inorg. Mater.*, vol. 1, no. November, p. 100026, 2023, doi: 10.1016/j.cinorg.2023.100026.

[2] M. S. Salem, A. Shaker, M. S. Othman, A. H. Al-Bagawia, M. Fedawy, and G. M. Aleid, “Numerical analysis and design of high performance HTL-free antimony sulfide solar cells by SCAPS-1D,” *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 123, no. October 2021, p. 111880, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2021.111880.

[3] H. Dixit *et al.*, “A theoretical exploration of lead-free double perovskite La2NiMnO6 based solar cell via SCAPS-1D,” *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 131, no. May, p. 112611, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112611.

[4] O. Ahmad, A. Rashid, M. W. Ahmed, M. F. Nasir, and I. Qasim, “Performance evaluation of Au/p-CdTe/Cs2TiI6/n-TiO2/ITO solar cell using SCAPS-1D,” *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 117, no. April, p. 111105, 2021, doi: 10.1016/j.optmat.2021.111105.

[5] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degrave, “Modelling polycrystalline semiconductor solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 361–362, pp. 527–532, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0040-6090(99)00825-1.

[6] M. K. Hossain, M. H. K. Rubel, G. F. I. Toki, I. Alam, M. F. Rahman, and H. Bencherif, “Effect of Various Electron and Hole Transport Layers on the Performance of CsPbI3-Based Perovskite Solar Cells: A Numerical Investigation in DFT, SCAPS-1D, and wxAMPS Frameworks,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 47, pp. 43210–43230, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c05912.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی آنتن‌های تک روزنه و دو روزنه در درمان هایپرترمیای سرطان کبد

فهیمه حمزوی، محمد جواد کریمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده

فرسایش مایکروویو فرآیندی است که در آن از گرمای مایکروویو برای از بین بردن سلول‌های سرطانی استفاده می‌شود. تمرکز تابش بر روی مناطق مورد نظر بدون آسیب رساندن به بافت اطراف، مستلزم کنترل قدرت گرمایش برای اطمینان از توزیع مناسب دما است. در این مقاله، توزیع نرخ جذب ویژه (SAR) و دما برای آنتن‌های تک روزنه و دو روزنه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع SAR و دما به نوع آنتن، عمق نفوذ و فاصله بین روزنه‌ها بستگی دارد. آنتن دو روزنه با فاصله کم بین روزنه‌ها دارای مقدار SAR بزرگتر از آنتن تک روزنه است. هرچند، SAR آنتن دو روزنه با افزایش فاصله بین روزنه‌ها کاهش می‌یابد.

کلید واژه: آنتن روزنه‌ای، توزیع دما، سرطان، نرخ جذب ویژه (SAR).

Investigation of single-slot and double-slot antennas in the hyperthermia treatment of liver cancer

Fahimeh Hamzavi, Mohammad Javad Karimi

Emails address: f.hamzavi@sutech.ac.ir, karimi@sutech.ac.ir

Abstract

Microwave ablation is a process in which microwave heat is used to destroy cancer cells. Focusing the radiation on the desired areas without damaging the surrounding tissue requires controlling the heating power to ensure proper temperature distribution. In this article, the distribution of specific absorption rate (SAR) and temperature for the single-slot and double-slot antennas are investigated. Results indicate that the distribution of SAR and temperature depends on the type of antenna, insertion depth, and distance between slots. The double-slot antenna with a short distance between the slots has a larger SAR value than the single-slot antenna. However, the SAR of the double-slot antenna decreases as the distance between the slots increases.

Keywords: Slot antenna, Temperature distribution, Cancer, Specific absorption rate (SAR).

مقدمه

سلول در حد نیاز بدن و به صورت کنترل شده‌ای شروع به رشد و تقسیم می‌کند و تشکیل یک بافت سالم را می‌دهد. حال اگر یک سلول طبیعی پس از یک سری تغییر و تحول در ژن به طور غیر قابل کنترلی شروع به رشد و تقسیم کند سلول‌های اضافی به وجود می‌آید که اغلب توده‌ای از بافت را تشکیل می‌دهد که تومور (غده سرطانی) نامیده می‌شود. سرطان کبد یک مسئله مهم بهداشت عمومی است. این بیماری در سراسر جهان منجر به مرگ بیش از یک میلیون نفر در سال می‌شود [۱].

در طول این سال‌ها، روش‌های مختلفی برای درمان بسیاری از سرطان‌ها شناسایی شده است. رایج‌ترین آنها جراحی، شیمی درمانی، پرتو درمانی است. در شیمی درمانی، دارو از طریق رگ تزریق می‌شود و سلول‌های سرطانی را از بین می‌برد. در روش پرتو درمانی از پرتوهای پر انرژی برای از بین بردن تومور استفاده می‌شود که این روش علاوه بر بافت سرطانی، بافت‌های سالم مجاور را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. این روش‌ها در همه موارد کارآمد نیستند و هر کدام عوارض خاص خود را دارند. یکی از درمان‌های امیدوارکننده سرطان، فرسایش مایکروویو (Microwave ablation) است. فرسایش مایکروویو یکی از انواع درمان هایپرترمیا است که سلول‌های سرطانی را گرم می‌کند. این تکنیک از امواج الکترومغناطیسی برای از بین بردن سلول های سرطانی استفاده می‌کند.

از سوی دیگر، شبیه سازی عددی به طور گسترده در مطالعه فرسایش مایکروویو مورد استفاده قرار گرفته است زیرا روشی سریع و اقتصادی برای ارزیابی طرح‌های فرضی جدید ارائه می‌دهد. گاس پیوتر تاثیر تعداد روزنه در آنتن مایکروویو را در بافت انسان بررسی کرد. نتایج نشان داد که بالاترین دما برای آنتن تک روزنه به دست می‌آید [۲]. تراکاوا و همکارانش توزیع SAR را برای یک آنتن سه روزنه اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که بیشینه SAR و دما در اطراف روزنه ها به دست می‌آید [۳].

ما در این مطالعه تاثیر آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه بر نرخ جذب ویژه (SAR) و توزیع دما در بافت کبد در طول فرسایش مایکروویو را به طور عددی شبیه سازی و مقایسه می‌کنیم.

روش شبیه سازی

این شبیه سازی بر اساس معادلات جفت شده الکترومغناطیس و انتقال حرارت زیستی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم افزار کامسول انجام می‌شود. برای گرم کردن و فرسایش بافت سرطانی، یک آنتن هم محور به داخل بافت کبد وارد می‌کنیم. این آنتن یک موج الکترومغناطیسی ساطع می‌کند که از معادله ماکسول زیر تبعیت می‌کند [۴].

$$\nabla \times \left(\left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{w\varepsilon_0}\right)^{-1} \nabla \times \overrightarrow{H_\varphi}\right) - \mu_r \frac{w^2}{c^2}\overrightarrow{H_\varphi} = 0 \quad (۱)$$

که ε_r گذردهی نسبی، σ رسانندگی الکتریکی و μ_r نفوذپذیری نسبی، ε_0 ثابت گذردهی خلاء، c سرعت نور در خلاء است. همچنین، معادله انتقال حرارت زیستی به صورت زیر است [۵]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + \rho_b C_b w_b (T_b - T) \quad (۲)$$
$$+ Q_{ext} + Q_{meta}$$

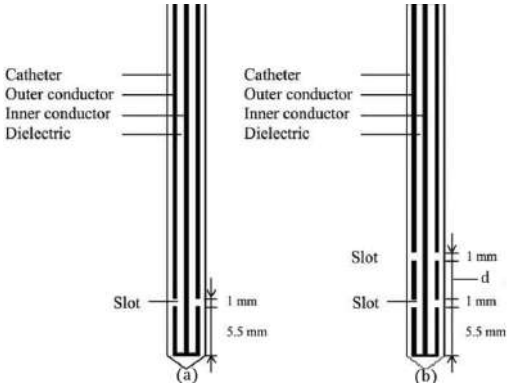
که ρ چگالی، T دما و k رسانندگی حرارتی بافت، C_p ظرفیت گرمایی ویژه است.C_b ظرفیت گرمایی ویژه، ρ_b چگالی، $w_b(T) = 0.000021T + 0.00035$ میزان پرفیوژن و $T_b = 37°C$ دمای خون است. Q_{meta} گرمای ناشی از متابولیسم است [۵]. Q_{ext} گرمای تولید شده توسط میدان الکترومغناطیسی است که به صورت زیر بیان می‌شود [۶].

$$Q_{ext} = \frac{\sigma}{2}\|E_0\|^2 \quad (۳)$$

که E_0 دامنه میدان الکتریکی تولید شده توسط آنتن است.

وابستگی دمایی پارامترهای الکترومغناطیسی و پارامترهای گرمایی کبد، خون و تومور در مراجع [۴و۵] آمده است.

هندسه بافت کبد، استوانه ای شکل با شعاع ۳۰mm و ارتفاع ۸۰mm در نظر گرفته می‌شود. یک آنتن در بافت کبد نفوذ می‌کند که عمق نفوذ آن ۷۰/۵mm و قطر آن ۱/۷۹mm است. فرکانس کاری آنتن $2.45\ GHz$ و توان ورودی آن ۱۰W است. آنتن از یک هادی داخلی، یک دی‌الکتریک، یک هادی خارجی و یک روزنه تشکیل می‌شود و یک کاتتر پلاستیکی آنتن را احاطه کرده است. شکل ۱ هندسه آنتن های هم محور تک روزنه و دو روزنه را نشان می‌دهد. هندسه کبد و ابعاد آنتن ها در مراجع[۴و۵] آمده است.



شکل ۱: هندسه آنتن هم محور تک روزنه (a) و آنتن دو روزنه (b) [۵].

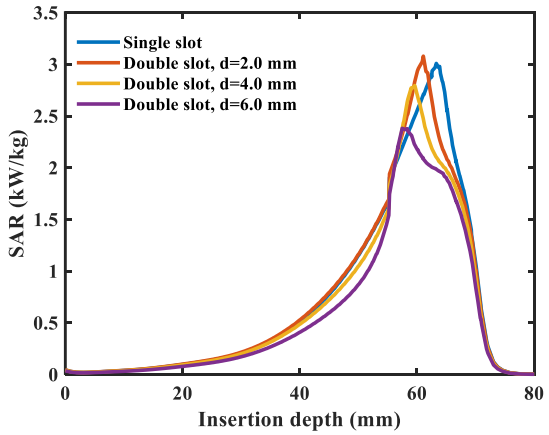
نتایج

نرخ جذب ویژه (SAR) معیاری برای اندازه گیری میزان جذب انرژی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$SAR = \frac{Q_{ext}}{\rho} \qquad (۵)$$

که ρ چگالی بافت، Q_{ext} گرمای تولید شده توسط آنتن است. شکل ۲ نرخ جذب ویژه در آنتن تک روزنه و آنتن دو رورنه با فاصله روزنه‌های مختلف(d) در فاصله ۲/۵mm از محور آنتن را نشان می‌دهد.

برای هر کدام از آنتن‌ها، توزیع SAR در ابتدای محور موازی آنتن (نوک آنتن) به تدریج افزایش می‌یابد تا به نقطه بیشنه خود که نزدیک روزنه آنتن است برسد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد.

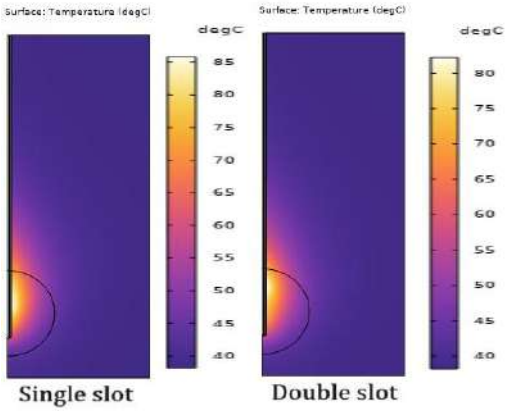


شکل ۲: نرخ جذب ویژه در آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه با فاصله روزنه‌های متفاوت در فاصله ۲/۵mm از محور آنتن پس از گذشت ۳۰۰s.

بنابراین تغییر مقادیر SAR در بافت کبد به نوع آنتن، عمق نفوذ آن و فاصله بین روزنه‌ها بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بیشینه SAR ناشی از آنتن دو روزنه با فاصله روزنه ۲میلی متر از آنتن تک روزنه بیشتر است ولی با افزایش فاصله بین روزنه ها مقدار SAR کاهش می‌یابد و از SAR ناشی از آنتن تک روزنه هم کمتر می‌شود.

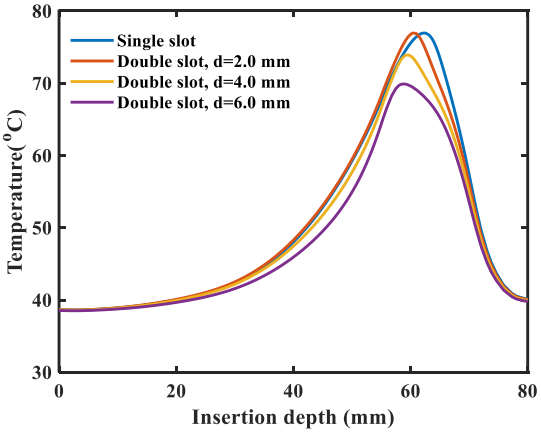
برای از بین بردن تومور به یک افزایش دما نیاز داریم تا تومور را نابود کند به همین دلیل کنترل دما برای ما مهم است. شکل ۳ توزیع دما در بافت کبد با استفاده از آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد.

در هر دو آنتن توزیع دما در اطراف آنتن بیضی شکل است و بالاترین دما در نزدیکی روزنه است و با فاصله گرفتن از آن کاهش می‌یابد. بیشینه دما در بافت کبد در۳۰۰ ثانیه برای آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه با فاصله روزنه ۴ میلی متر به ترتیب ۸۵ درجه سانتیگراد و ۸۰ درجه سانتیگراد است.



شکل ۳: توزیع دما در آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه با فاصله روزنه ۴ میلی متر پس از گذشت ۳۰۰s.

شکل ۴ مقایسه توزیع دما برای آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه با فاصله روزنه‌های متفاوت درفاصله ۲/۵mm از محور آنتن را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مقایسه توزیع دما در آنتن تک روزنه و آنتن دو روزنه با فاصله روزنه‌های مختلف در فاصله ۲/۵mm از محور آنتن.

برای هر کدام از آنتن‌ها، توزیع دما به تدریج در ابتدای محور موازی آنتن، افزایش می‌یابد تا به نقطه بیشینه خود که نزدیک روزنه آنتن است برسد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد. دما در آنتن دو روزنه ای با فاصله کم بین روزنه‌ها تقریبا مشابه آنتن تک روزنه است و در آنتن دو روزنه با افزایش فاصله بین روزنه‌ها دما نسبت به آنتن تک روزنه کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای از بین بردن تومور سرطانی در بافت کبد از آنتن هم محور تک روزنه و آنتن دو روزنه استفاده کردیم. نتایج نشان می‌دهد که آنتن دو روزنه‌ای با فاصله کم بین روزنه ها مقدار SAR بزرگتری نسبت به آنتن تک روزنه دارد اما با افزایش فاصله بین روزنه ها، SAR آنتن دو روزنه کمتر از آنتن تک روزنه می‌شود. افزایش فاصله بین روزنه‌ها مقادیر SAR و دما را کاهش می‌دهد. بنابراین توزیع SAR و دما در بافت سرطانی به نوع آنتن، عمق نفوذ آن و فاصله بین روزنه ها بستگی دارد.

مرجع‌ها

W.Y. Lau, et al, “Percutaneous local ablative therapy for hepatocellular carcinoma: a review and look into the future”, Ann. Surg., Vol. 237, No. 2, p. 171, 2003.

P. Gas, “Transient analysis of interstitial microwave hyperthermia using multi-slot coaxial antenna. In Analysis and simulation of electrical and computer systems”, Springer, pp. 63-71, 2015.

T. Terakawa, K. Ito, et al, “Design of interstitial ring-slot applicator for microwave hyperthermia”, Engineering in Medicine and Biology Society 11th Annual International Conference, pp. 1147, 1989.

M. Selmi, A. Dukhyil, H. Belmabrouk, “Numerical Analysis of Human Cancer Therapy Using Microwave Ablation”, Appl. Sci., Vol. 211, 2020.

P. Keangin, P. Rattanadecho, et al, “An analysis of heat transfer in liver tissue during microwave ablation using single and double slot antenna”, Heat Mass Transf., Vol. 38, No. 6, pp. 757-766, 2011.

P. Rattanadecho, P. Keangin, “Numerical study of heat transfer and blood flow in two-layered porous liver tissue during microwave ablation process using single and double slot antenna”, Heat Mass Transf., Vol. 58, pp. 457–470, 2013.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

شبیه سازی عددی درمان سرطان کبد به روش هایپرترمیا با استفاده از آنتن تک روزنه

فهیمه حمزوی، محمد جواد کریمی
دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده

در این مقاله به بررسی عددی روش هایپرترمیا در درمان سرطان کبد با استفاده از آنتن تک روزنه مایکروویو پرداخته شده است. معادلات جفت شده الکترومغناطیسی و انتقال حرارت زیستی با استفاده از نرم افزار کامسول حل شده است. در این مطالعه چگالی توان ماکروویو جذب شده، تغییرات زمانی دما، میزان تخریب تومور سرطانی در بافت کبد بررسی گردید و نتایج شبیه سازی با داده‌های تجربی صحت سنجی شد. نتایج عددی نشان می دهد که تغییرات زمانی دما تحت تاثیر توان ورودی قرار می گیرد و مشخص شد که با توان ورودی ۱۰ وات، تومور سرطانی بدون آسیب رساندن به بافت کبد اطراف تومور از بین می رود.

کلید واژه: آنتن تک روزنه، بافت کبد، فرسایش مایکروویو، هایپرترمیا.

Numerical simulation of liver cancer treatment by hyperthermia method using single slot antenna

Fahimeh Hamzavi, Mohammad Javad Karimi

Emails address: f.hamzavi@sutech.ac.ir, karimi@sutech.ac.ir

Abstract

In this article, the numerical analysis of the hyperthermia method in the treatment of liver cancer using a single-slot microwave antenna is discussed. The coupled equations of electromagnetic and biological heat transfer are solved using Comsol software. In this study, the absorbed microwave power density, temporal changes in temperature, and the destruction of cancer tumor in liver tissue are investigated and the simulation results are validated with experimental data. Numerical results show that the temporal changes in temperature are affected by the input power, it was found that with the input power of 10W, the cancer tumor is destroyed without damaging the liver tissue surrounding the tumor.

Keywords: Single-slot antenna, Liver tissue, Microwave ablation, Hyperthermia.

مقدمه

یکی از علل اصلی مرگ و میر در جهان سرطان است که سالانه افراد زیادی بر اثر آن جان خود را از دست می‌دهند. در طول این سال‌ها روش‌های مختلفی برای درمان سرطان به کار برده شده است. امروزه از روشی به نام هایپرترمیا استفاده می‌شودکه به عنوان درمانی مکمل برای پرتو درمانی و شیمی درمانی استفاده می‌شود. هایپرترمیا باعث حساس شدن بیشتر سلول‌های سرطانی به پرتو درمانی و داروهای شیمی درمانی می‌شود. هایپرترمیا به صورت کلی به معنای افزایش دمای بدن به بیش از میزان طبیعی آن($37°C$) است. انواع درمان فرسایشی (Ablation) شامل فرسایش مایکروویو، فرسایش رادیویی و فرسایش لیزری می‌باشد [۱و۲]. فرسایش مایکروویو یکی از انواع درمان هایپرترمی سرطان است که سلول های تومور را گرم می‌کند. این تکنیک از امواج الکترومغناطیسی برای از بین بردن سلول های سرطانی استفاده می‌کند. سیستم‌های مایکروویو برای استفاده بالینی در دهه ۱۹۹۰ معرفی شدند که دارای آنتن سوزنی مانند، نازک و هم محور هستند که می‌توانند از راه پوست ناحیه فرسایش بزرگی ایجاد کند [۳]. آنتن‌های هم محور به دلیل هزینه کم و ابعاد کوچک بسیار حائز اهمیت هستند و با توجه به اندازه و محل تومور در بدن، یک یا چند آنتن مایکروویو می تواند برای درمان تومور استفاده شود.

کورتو و همکارانش فرسایش مایکروویو در فرکانس‌های ۹۱۵MHz و ۲/۴۵GHz، با توان ورودی ۳۰W را مطالعه کردند [۴]. وانگ و همکارانش فرآیند انتقال گرما در کبد را با استفاده از آنتن هم محور ده روزنه‌ای به صورت عددی بررسی کردند [۵]. آنها دریافتند که استفاده از آنتن چند روزنه می‌تواند درمان موثرتری در مقایسه با آنتن تک روزنه ایجاد کند. ما در این مقاله با استفاده از نرم افزار کامسول تاثیر یک آنتن مایکروویو تک روزنه بر روی تومور سرطانی در بافت کبد را مطالعه می‌کنیم. گرمای تولید شده توسط آنتن باعث از بین رفتن سلول های سرطانی می‌شود. در این مطالعه میزان جذب امواج مایکروویو، تغییرات زمانی دما، میزان تخریب بافت سرطانی در بافت کبد به صورت عددی بررسی می‌گردد.

روش شبیه سازی

برای بررسی اثر گرمایی آنتن مایکروویو معادلات جفت شده الکترومغناطیس و انتقال حرارت زیستی را با استفاده از نرم افزار کامسول حل می‌کنیم که این معادلات در ادامه شرح داده شده‌اند. به منظورگرم کردن تومور و فرسایش آن، یک آنتن هم محور وارد شده به داخل بافت تومور را در نظر می‌گیریم. این آنتن یک موج الکترومغناطیسی با تقارن محوری ساطع می‌کند که از معادله ماکسول زیر تبعیت می‌کند [۶]:

$$\nabla \times \left(\left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{w\varepsilon_0} \right)^{-1} \nabla \times \overrightarrow{H_\varphi} \right) - \mu_r \frac{w^2}{c^2} \overrightarrow{H_\varphi} = 0 \quad (۱)$$

که ε_0 ثابت گذردهی خلاء، c سرعت نور در خلاء، ε_r گذردهی نسبی، σ رسانندگی الکتریکی و μ_r نفوذپذیری نسبی است. وابستگی دمایی پارامترهای الکترومغناطیسی کبد و تومور در محدوده دمای$37°C \le T \le 100°$ در مرجع [۶] آمده است. معادله انتقال حرارت زیستی پنس به صورت زیر است [۷]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + \rho_b C_b w_b (T_b - T) = \quad (۲)$$

$$Q_{ext} + Q_{meta}$$

که T دما، ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه و k رسانندگی حرارتی بافت است. همچنین $\rho_b = 1060kg.m^{-3}$ چگالی، $C_b = 3600Jkg^{-1}$ ظرفیت گرمایی ویژه، $T_b = 37°C$ دما و w_b میزان پرفیوژن خون است. Q_{meta} گرمای ناشی از متابولیسم است که در این مطالعه از آن صرف نظر شده است. همچنین Q_{ext} گرمای تولید شده توسط میدان الکترومغناطیسی است [۷]. وابستگی دمایی پارامترهای گرمایی کبد به صورت زیر است [۶].

$$k_{liver}(T) = 4190[0.133 + 1.36W_a(T)] \quad (۳)$$

$$C_{p,liver}(T) = 0.419[0.37 + 0.63W_a(T)] \quad (۴)$$

$$\rho_{liver}(T) = 1300 - 300W_a(T) \quad (۵)$$

$W_a(T)$ مقدار آب باقی مانده از بافت کبد است که رابطه آن در مرجع [۶] آمده است. همچنین پارامترهای گرمایی تومور در مرجع [۷] آمده است. جریان خون باعث ایجاد یک شار حرارتی همرفتی بین خون و بافت می‌شود. این شارحرارتی به اختلاف دما $(T_b - T)$ و سرعت جریان خون بستگی دارد. از این رو تحت تأثیر پرفیوژن خون قرار می‌گیرد. میزان پرفیوژن خون بر حسب دما به صورت زیر است [۶].

$$w_b(T) = w_0 + aT \quad (۶)$$

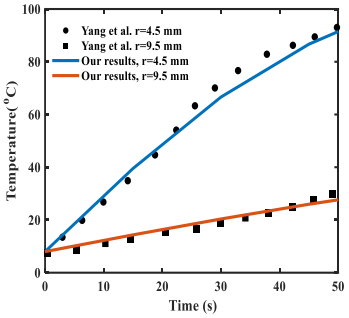
که $w_0 = 6.08 \times 10^{-3}\ s^{-1}$ و $a = 2.1 \times 10^{-5} s^{-1}$ است. درکلیه معادلات ذکر شده دما برحسب درجه سانتیگراد است.

ساختار هندسی مسئله در مرجع [۶] آمده است. آنتن وارد شده به بافت کبد از یک هادی داخلی، یک دی‌الکتریک، یک هادی خارجی و یک روزنه تشکیل می‌شود و یک کاتتر پلاستیکی آن را احاطه کرده است. این آنتن امواج ماکروویو با فرکانس $2/45\ GHz$ ساطع می‌کند.

تومور را کره ای با شعاع ۱۰mmدر نظر می‌گیریم. مقادیر گذردهی نسبی دی‌الکتریک و کاتتر به ترتیب ۲/۰۳ و ۲/۱ است. هندسه بافت کبد استوانه‌ای شکل با شعاع ۳۰mm و ارتفاع ۸۰mm است. عمق نفوذ آنتن در کبد ۷۰/۵mm است. شرایط مرزی مسئله در مرجع [۷] آمده است.

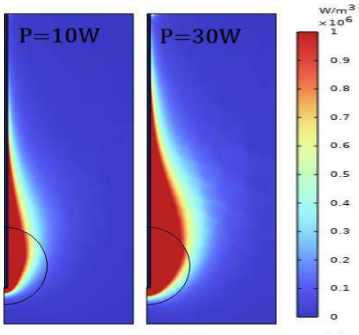
نتایج

ابتدا به منظور صحت سنجی، نتایج شبیه سازی خود را با داده‌های تجربی یانگ و همکارانش [۸] مقایسه می‌کنیم. شکل ۱ تغییرات زمانی دما در دو موقعیت مختلف از بافت کبد را در طول فرآیند فرسایش مایکروویو نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که نتایج شبیه سازی ما با نتایج تجربی، سازگاری بسیار خوبی دارد.



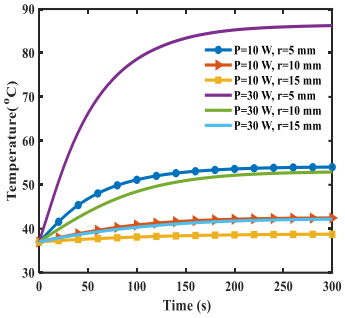
شکل ۱: مقایسه نتایج شبیه سازی ما با نتایج تجربی یانگ و همکارانش [۸].

شکل ۲ چگالی توان امواج مایکروویو جذب شده در بافت کبد برای دو توان مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ناحیه گرم شده در اطراف روزنه تقریباً بیضی شکل است و مقدار امواج جذب شده در نزدیکی روزنه آنتن بسیار زیاد است و با فاصله گرفتن از روزنه کاهش می‌یابد. برای توان ورودی ۱۰W تمام تومور گرم نمی‌شود و ناحیه کوچکی از بافت کبد گرم می‌شود. هنگامی که توان ورودی افزایش می‌یابد تمام تومور گرم می‌شود و ناحیه بزرگ تری از بافت کبد گرم می‌شود.



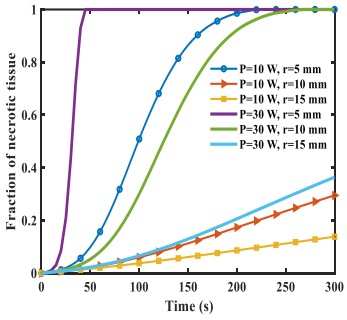
شکل ۲: چگالی توان امواج مایکروویو جذب شده در بافت کبد برای دو توان مختلف پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه.

شکل ۳ تغییرات زمانی دما برای سه فاصله شعاعی مختلف از آنتن با دو توان ورودی متفاوت را نشان می‌دهد. با گذشت زمان، دما به صورت نمایی افزایش می‌یابد و از یک زمان به بعد دما تغییرات اندکی می‌کند. همچنین، برای فواصل نزدیک‌تر به آنتن تغییرات دمایی بالاتر است.



شکل ۳: تغییرات زمانی دما برای فواصل شعاعی مختلف با دو توان ورودی متفاوت.

میزان تخریب بافت از مدل آرنیوس به دست می‌آید [۱۶]. شکل ۴ میزان آسیب دیدگی بافت کبد برای سه فاصله شعاعی مختلف از آنتن با دو توان ورودی متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تغییرات میزان آسیب دیدگی تومور در فواصل شعاعی مختلف.

شکل ۴ نشان می‌دهد که میزان آسیب دیدگی تومور با گذشت زمان به تدریج افزایش می‌یابد تا به یک نقطه اشباع برسد و تخریب کامل انجام شود. در فاصله ۵mm از محور آنتن، زمان مورد نیاز برای تخریب کامل برای توان ۱۰W و ۳۰W به ترتیب ۲۰۰s و ۴۵s است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله درمان سرطان با روش هایپرترمیا در بافت کبد با استفاده از آنتن تک روزنه بررسی شده است. نتایج نشان داد که توزیع دما تحت تاثیر مقادیر توان ورودی مایکروویو قرار دارد. بیشینه دما در نزدیکی روزنه آنتن و در داخل ناحیه تومور بسیار بالا ظاهر شد و سپس با دور شدن از محور آنتن کاهش می‌یابد. توان ورودی ۱۰W برای تومورهای کوچک مناسب است. بنابراین با استفاده از یک توان ورودی کوچک می‌توان تخریب سلول‌های تومور را در مدت زمان طولانی بدون آسیب رساندن به سلول‌های سالم به دست آورد. نتایج این مطالعه می‌تواند جهت درمان عملی مفید واقع شود.

مرجع‌ها

[1] A.M. Ierardi, et al, “Microwave ablation of liver metastases to overcome the limitations of radiofrequency ablation”, Radiol. Med., Vol. 118, pp. 949–961, 2013.

[2] S.M. Lin, C. YLi, “Semi-analytical solution of bioheat conduction for multi-layers skin subjected to laser heating and fluid cooling”, Mech. Med. Biol., Vol. 17, No. 02, p. 1750029, 2016.

[3] J.P. Dou, L. Ping, Y. Jie, “Microwave ablation for liver tumors”, Abdom. Radiol., Vol. 41, pp. 650-658, 2016.

[4] S. Curto, M. Taj-Eldin, D. Fairchild, “Microwave ablation at 915 MHz vs 2.45 GHz: A theoretical and experimental investigation”, Med. Phys., Vol. 42, pp. 6152–6161, 2015.

[5] T. Wang, G. Zhao, B. Qiu, “Theoretical evaluation of the treatment effectiveness of a novel coaxial multi-slot antenna for conformal microwave ablation of tumors”, Heat Mass Transf., Vol. 90, pp. 81–91, 2015.

[6] M. Selmi, A. Dukhyil, H. Belmabrouk, “Numerical Analysis of Human Cancer Therapy Using Microwave Ablation”, Appl. Sci., Vol. 211, 2020.

[7] P. Rattanadecho, P. Keangin, “Numerical study of heat transfer and blood flow in two-layered porous liver tissue during microwave ablation process using single and double slot antenna”, Heat Mass Transf., Vol. 58, pp. 457–470, 2013.

[8] D. Yang, et al, “Expanding the bioheat equation to include tissue internal water evaporation during heating”, Trans. Biomed. Eng., Vol. 54, pp. 1382–1388, 2007.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

کوک پذیری جفت شدگی روبیدیوم و مد بلاخ در بلور فوتونی یک بعدی

عطیه سهرابی، مهناز اسدالله سلمانپور، سیده مهری حمیدی*

آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر وپلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

***M_hamidi@sbu.ac.ir**

چکیده – با توجه به اهمیت روزافزون مطالعه برهمکنش نور و اتم و استفاده‌ی مستقیم از آن بر کوچک سازی تجهیزات اپتیکی، در این مقاله به بررسی موج سطحی بلاخ منتشر شده بر روی سطح یک بلور فوتونی یک بعدی قرار گرفته بر روی یک منشور پرداخته‌ایم. با بررسی تاثیر تغییر تناوب‌های بلور فوتونی و همچنین تغییر قطبش نور فرودی بر مد بلاخ انتشاری،به قابلیت تنظیم پذیری مد بلاخ بر حسب زاویه نور فرودی دست یافتیم. در ادامه برای بررسی جفت شدگی اتم روبیدیوم با مد بلاخ، یک لایه‌ی نیمه بی‌نهایت حاوی بخار اتم روبیدیوم بر روی ساختار معرفی شده قرار گرفت و با استفاده از شبیه سازی، نتیجه جفت شدگی اتم روبیدیوم با مد بلاخ به صورت یک پراکندگی مشاهده شد.

کلید واژه- بلور فوتونی، بخار داغ روبیدیوم، کوپل شدگی اتم با نور، موج سطحی بلاخ

Tunability of Rubidium Coupling and Bloch mode in one-dimensional photonic crystal

Atieh Sohrabi, Mahnaz Asadolah Salmanpour, and Seyedeh Mehri Hamidi*

Magneto-Plasmonic Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

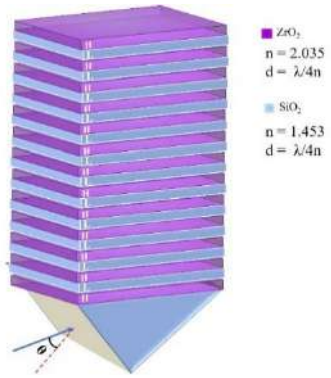
Abstract- Due to the increasing importance of studying the interaction of light and atoms and its direct use in the miniaturization of optical equipment, in this article we have investigated the Bloch surface wave emitted on the surface of a one-dimensional photonic crystal placed on a prism. By investigating the effect of changing photonic crystal periodicities and also changing the polarization of the incident light on the diffusive Bloch mode, we achieved the adjustability of the Bloch mode according to the incident light angle. Next, to investigate the coupling of Rubidium atoms with Bloch mode, a semi-infinite layer containing vapor of rubidium atom was placed on the introduced structure, and by using simulation, the result of the coupling of rubidium atoms with Bloch surface wave was observed.

Keywords: Bloch surface wave, coupling of the atom with light, hot rubidium vapor, Photonic crystal.

فرودی با قطبش TE یا TM را دارند. امواج سطحی بلاخ در بلورهای فوتونی (PC[25]s) به دلیل کاربردهای گسترده در حسگری با استفاده از ساختارهای مختلف مانند پیکربندی‌های حجیم، فیبرهای بلور فوتونی و نوری مخروطی و فیبر نوری D شکل معروف هستند[۶, ۷]. برهمکنش اتم و میدان محو شونده در ساختارهایی مانند موجبرهای توخالی یکپارچه، موجبرهای هسته جامد و تشدیدگرهای حلقه یکپارچه بررسی شده است. در نتیجه، با طراحی نانوساختار بر روی سطح بلور فوتونی، می‌توان مدهای بلاخ سطحی را هدایت کرد. جفت شدگی تشدید اتم های داغ با BSW[26] در بسترهای جامد به خواص هر دو طرف ساختار جفت شده بستگی دارد. در این پژوهش، موج سطحی بلاخ منتشر شده از سطح بلور فوتونی را به عنوان کاندیدای کوچک‌سازی سلول‌های بخار اتمی در نظر می‌گیریم و اثرات تغییر ساختار بلور فوتونی استفاده شده و همچنین تغییر زاویه فرودی را بررسی خواهیم کرد.

مواد و روش‌ها

در ابتدا، ساختار بلور فوتونی متناوب یک بعدی که شامل تناوبی از یک لایه با ضریب شکست بیشتر (ZrO_2) با ضریب شکست ۲.۰۳و SiO_2 به عنوان ماده با ضریب شکست کمتر (۱.۴۵) معرفی می‌کنیم.



شکل ۳۶ طرحواره ساختار بلور فوتونی قرارگرفته بر روی منشور

مقدمه

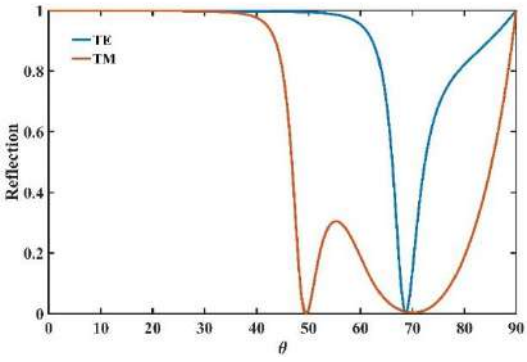
در سال های اخیر، اهمیت طراحی و ساخت دستگاه‌های کوانتومی و تراشه‌های اتمی کوچک‌سازی شده برای کاربردهای متفاوتی از جمله ساعت‌های اتمی، حسگرهای مغناطیسی، تثبیت کننده‌های فرکانس لیزر و فیلترهای خط اتمی، دانشمندان را بر آن داشت تا برهمکنش‌های اتم-نور در نانوساختارها را بررسی کنند[۱و۲]. کوچک‌سازی و ادغام فیزیک نانوفوتونیکی- اتمی منجر به افزایش برهمکنش اتم‌ها با میدان نوری محدود می‌شود که منجر به کاهش حجم برهمکنش کارآمد می‌شود. با توجه به پدیده های غیرخطی که ممکن است رخ دهد، مطالعه برهمکنش اتم‌ها و نور در مجاورت میدان‌های با شدت بالا در محدوده‌ی حجمی کمتر، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. ساختارهای نانو فوتونیک امکان محصور شدن و افزایش میدان را فراهم می‌کنند. اتم‌های فلزات قلیایی مانند روبیدیوم و سزیم به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر بفردی مانند حضور تک الکترون در لایه ظرفیت که منجر به شکافتگی فوق ریز در تراز پایه در محدوده‌ی گیگاهرتز می‌شود، و همچنین بالا بودن فشار بخار اتم در دمای مناسب، به طور گسترده در طول سال‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین، ساختار الکترونی ساده‌ی این اتم‌ها امکان پمپ نوری موثر را فراهم می‌کند[۳]. در این اتم‌ها به دلیل بزرگ بودن سطح مقطع جذب، آشکارسازی ترازهای اتمی از طریق برهمکنش با میدان نوری قابل دستیابی می‌باشد.

جفت شدن مدهای اتمی با مدهای محدود فوتونیک باعث اثرات تداخل کوانتومی می‌شود که منجر به پدیده‌هایی مانند تشدید فانو، تشدید شبه EIT[24] و برهمکنش‌های غیرخطی می‌شود [4, 5]. امواج سطحی بلاخ دارای مزیت کاهش قابل توجه تلفات اهمی همزمان با امکان انتشار در سطح مشترک بین چند لایه دی الکتریک متناوب و محیط اطراف در مقیاس طول میلی متری را دارند. امواج سطحی بلاخ برخلاف سایر امواج سطحی مانند پلاسمون پلاریتون سطحی که فقط با قطبش TE برانگیخته می‌شوند با طراحی مناسب چندلایه‌ای امکان تحریک با نور

---

[24] Electrical Intensity Transparency
[25] Photonic Crystals
[26] Bloch Surface Wave

محصور می‌شود. با توجه به مشاهده مد بلاخ در قطبش TE، در ادامه به بررسی دقیق‌تر تاثیر تغییرات ساختاری بر روی مد بلاخ مشاهده شده در این قطبش پرداخته می‌شود. به این منظور، طیف بازتاب در قطبش TE بر حسب زاویه فرودی یک بار برای بلور فوتونی با تناوب $(ZrO_2/SiO_2)^{12}$ (با رنگ آبی) و یکبار برای تناوب $(SiO_2/ZrO_2)^{12}$ (با رنگ قرمز) در شکل ۴ نمایش داده شده است.



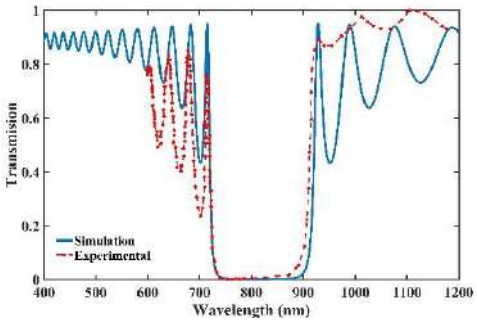
شکل ۳۸ طیف بازتاب از سطح بلور فوتونی قرار گرفته بر روی منشور برای دو قطبش TE (آبی) و TM (قرمز)

با دقت در این نمودارها می‌توان دریافت که با تغییر تناوب بلور فوتونی از $(ZrO_2/SiO_2)^{12}$ به $(SiO_2/ZrO_2)^{12}$، مد بلاخ از ۶۸° به ۷۱° جابجا می‌شود و همچنین میزان پهنای باند که نشان دهنده معکوس افت و محصور شدگی است، افزایش یافته است. به عبارت دیگر، با تغییر چینش لایه ها، میزان افت و یا معکوس محصور شدگی، قابل کنترل است. در ادامه برای بررسی تاثیر همزمان اضافه کردن یک لایه نقص به بالاترین لایه‌ی ساختار و تغییر ترتیب تناوب ها، شکل ۵ رسم شده است. با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود که افزودن یک لایه نقص به بلور فوتونی، باعث تنظیم پذیری زاویه تشدید مد بلاخ شده و این زاویه را از از ۶۷° تا ۷۲° تغییر می‌دهد. به طور خاص، افزودن یک لایه نقص از جنس SiO_2 به ساختار بلور فوتونی $(ZrO_2/SiO_2)^{12}$،

این بلور فوتونی شامل تناوبی ۱۲ تایی از جفت لایه‌های نازک معرفی شده است که در آن بستر بلور فوتونی با استفاده از روغن تطبیق دهنده ضریب شکست بر روی منشوری از جنس Bk7 قرار می‌گیرد. شماتیک ساختار ساخته شده در شکل ۱ نمایش داده شده است. طول موج طراحی در فرآیند ساخت روی ۷۹۵ نانومتر در انتخاب طول موج یک چهارم تنظیم شد تا به خط D2 بخار Rb در ناحیه باند نواری فوتونی (PBG[27]) برسد.

نتایج و بحث

طیف بازتاب بلور فوتونی ساخته شده با روش باریکه الکترونی و شبیه سازی شده با روش ماتریس انتقال (TMM) درشکل ۲ رسم شده است.



شکل ۳۷ طیف عبور از سطح بلور فوتونی بر حسب طول موج نور فرودی، نتایج شبیه سازی و اندازه گیری

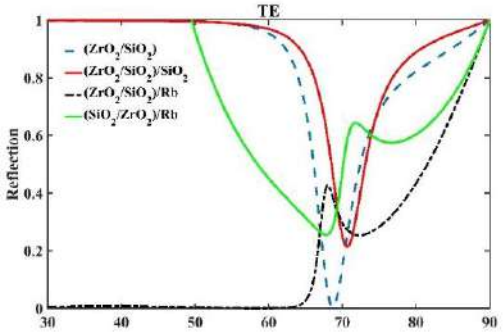
همچنانکه در این نمودارها با تطابق خوبی نشان داده شده است، محدوده باند نواری از ۷۱۵ تا ۹۲۰ نانومتر گسترده شده است. برای مشاهده موج سطحی بلاخ منتشر شده بر روی سطح بلور قرار گرفته بر روی منشور، طیف بازتاب آن بر حسب تغییر زاویه فرودی برای قطبش‌های TE و TM شبیه سازی شده و در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت برای ساختار مورد نظر، مد بلاخ در حالت قطبش TE تحریک می‌شود. تشدید باریک و عمیق در زاویه ۶۸°، نشان دهنده‌ی مد بلاخ است که توزیع میدان آن در آخرین لایه بلور فوتونی به حداکثر می‌رسد و نور در سمت بستر بلور فوتونی

---

[27] Photonic Band Gap

ZrO_2، پهنای نصف بیشینه کمتر، افت بیشتر و محصور شدگی کمتر یا جایگزیدگی دامنه میدان در سطح بیشتری دارد.

بنابراین می‌تواند تاثیر بیشتری بر روی جفت شدگی با روبیدیوم بگذارد که به صورت بیشینه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴۱ طیف بازتاب بر حسب زاویه نور فرودی در قطبش TE در حضور اتم.

نتیجه‌گیری

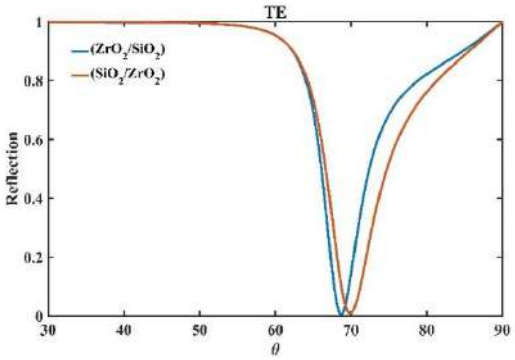
نتایج به دست آمده از بررسی طیف بازتاب این ساختار، نشان داد که مد بلاخ با اتم‌های روبیدیوم برهمکنش داشته و باعث تغییر اساسی طیف بازتاب شده است. به طوری که در حالت عدم حضور لایه‌ی شامل اتم، مد بلاخ به صورت یک دیپ دیده می‌شود و با قرار دادن لایه شامل بخار اتم روبیدیوم، در زاویه تشدید مد بلاخ یک پیک به وجود می‌آید.

مرجع‌ها

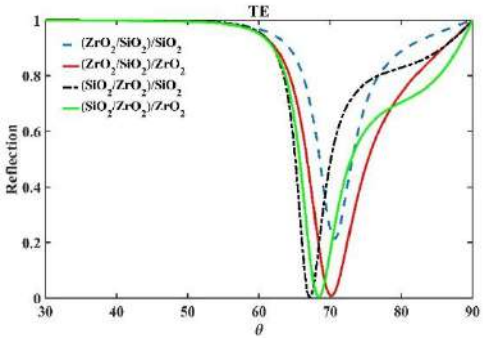
1. Stehle, C., C. Zimmermann, and S. Slama, *Cooperative coupling of ultracold atoms and surface plasmons.* Nature Physics, 2014. **10**(12): p. 937-942.
2. Naiman, A., et al., Large cooperativity in strongly coupled chip-scale photonic-atomic integrated system. 2021.
3. Salmanpour, M.A., et al., Hot Atomic Vapor for Photonic Crystal-Based Optical Components, in Photonic Crystal and Its Applications for Next Generation Systems. 2023, Springer. p. 1-14.
4. Salmanpour, M.A., M. Mosleh, and S. Hamidi, *Bloch surface wave-atom coupling in one-dimensional photonic crystal structure.* Optics Express, 2023. **31**(3): p. 4751-4759.
5. Mosleh, M., M. Ranjbaran, and S. Hamidi, *Trace of evanescent wave polarization by atomic vapor spectroscopy.* Scientific Reports, 2021. **11**(1): p. 21668.
6. Gowda, R.B., P. Sharan, and K. Saara, 1-dimensional silicon photonic crystal pressure sensor for

علاوه بر تغییر زاویه تشدید مد بلاخ، میزان بازتاب در محل کمینه آن را نیز تا ۰/۲۵ افزایش می‌دهد.

با عنایت به اینکه تاثیر برهمکنش مد بلاخ و محیط های اتمی می تواند پنجره جدیدی در طراحی و ساخت ادوات کوانتومی مینیاتوری بگشاید، بلور مورد نظر را در مجاورت محیط اتمی نیمه بی نهایت شامل روبیدیوم قرار داده و شبیه سازی ها را تکرار کرده‌ایم.



شکل ۳۹ طیف بازتاب بر حسب زاویه نور فرودی برای دو ساختار.



شکل ۴۰ طیف بازتاب بر حسب زاویه نور فرودی در قطبش TE

در این راستا، نمودار تغییرات طیف بازتاب بر حسب زاویه‌ی نور فرودی در قطبش TE رسم شده است (شکل ۶). با قرارگیری بلور فوتونی با ساختار $(ZrO_2/SiO_2)^{12}$ در مجاورت محیط اتمی نیمه بی‌نهایت شامل بخار روبیدیوم، به دلیل جفت شدگی موج بلاخ سطحی منتشر شده بر روی سطح بلور فوتونی با اتم‌های روبیدیوم، مد بلاخ تحریک شده و در زاویه‌ی تشدید، به صورت یک قله دیده می‌شود. در حالی که جفت شدگی اتم‌های روبیدیوم با موج سطحی منتشر شده از سطح بلور فوتونی با ساختار $(SiO_2/ZrO_2)^{12}$ باعث ایجاد پراکندگی‌ای در طیف بازتاب می‌شود. با عنایت به شکل ۴ و تغییر میزان افت مد بلاخ در طی تغییر چینش لایه ها، می‌توان مشاهده کرد که بلور با لایه ابتدایی

the measurement of low pressure. Results in Optics, 2023. **10**: p. 100352.
7. Gonzalez-Valencia, E., I. Del Villar, and P. Torres, *Bloch waves at the surface of a single-layer coating D-shaped photonic crystal fiber*. Optics Letters, 2020. **45**(9): p. 2547-2550.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

تحلیل طیف فرکانسی توزیع میدان الکتریکی بازتابی از توری براگ فیبری

علی کمال نوش آبادی، علیرضا اسکندرنیا و فاضل جهانگیری

a.kamalnoshabadi@mail.sbu.ac.ir, a.eskandarnia@mail.sbu.ac.ir, f_jahangiri@sbu.ac.ir

چکیده – در این مقاله با بررسی توزیع دامنه میدان الکتریکی نور در طی انتشار در توری براگ فیبری، به تحلیل طیف بازتابی خروجی با استفاده از حل معادلات ماکسول به روش المان محدود پرداخته‌ایم. سپس نتایج حاصل از این رویکرد را با آنچه به صورت متداول از رویکرد تئوری مدهای جفت شده مبتنی بر پیکربندی ماتریس‌های انتقال به دست می‌آید، مقایسه کرده‌ایم. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد توزیع میدان بیشینه در ابتدای توری و در بازه طیفی طول موج براگ انطباق مناسبی با نتایج حاصل از رویکرد تئوری مدهای جفت شده در توری‌های براگ فیبری طویل دارد. این در حالیست که، نتایج به دست آمده به ازای توری‌های با طول کوتاه نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه دقت در پیش‌بینی دامنه طیفی میدان بازتابی نسبت به رویکرد مبتنی بر تئوری مدهای جفت شده است.

کلید واژه- توری فیبری براگ، توزیع میدان، تئوری جفت شدگی مدها، روش المان محدود، طیف بازتابی FBG

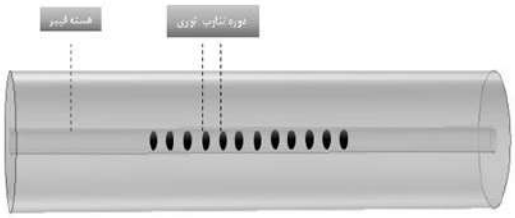
Spectral analysis of the electric field distribution in Fiber Bragg Grating

Ali Kamal Noushabadi, Alireza Eskandarnia, and Fazel Jahangiri

a.kamalnoshabadi@mail.sbu.ac.ir, a.eskandarnia@mail.sbu.ac.ir, f_jahangiri@sbu.ac.ir

Abstract – In this article, we have investigated the distribution of the electric field amplitude of the light propagating in fiber Bragg grating (FBG) in order to analyze the spectrum of the reflected output by solving the Maxwell equations using the finite element method. We have compared our spectral results with that conventionally obtained by the coupled mode theory through the configuration of transfer matrices. Our results demonstrate that the maximum field distribution at the beginning of the gratings and over the Bragg wavelength is in a proper agreement with those obtained by using the coupled mode theory in long FBGs. However, for short length FBGs, our results reveal a pronounceable improvement in the accuracy of the prediction of the reflected light field amplitude, comparing with that could be expected utilizing the coupled theory.

Keyword: Fiber Brag Grating, Field Distribution, Mode Coupling Theory, Finite Element Method, Reflective Spectrum FBG



شکل ۱: طرح واره‌ی از FBG

فیبر نوری تبدیل شده‌اند. مزیت اصلی استفاده از FBG درحسگرهای فیبرنوری، توانایی آن‌ها در ارائه اندازه‌گیری های دقیق و قابل اعتماد در محیط‌های دشوار است که حسگرهای معمولی قادر به کار در آن‌ها نیستند. حسگر FBG فوق‌کوتاه منجر به افزایش وضوح فضایی و ارائه اطلاعات دقیق‌تر و سریع‌تر می‌شود[۲]. افزایش وضوح فضایی به این دلیل است که توری‌های کوتاه‌تر تغییرات موضعی را بهتر تشخیص می‌دهند. در یک FBG طویل، تغییرات در طول توری می‌تواند متوسط شود؛ که این امر ممکن است جزئیات ریز، محیطی را که حسگر قرار است آن‌ها را تشخیص دهد، پنهان کند. علاوه بر کاربرد حسگری، از FBG فوق کوتاه با بازتاب پذیری بالا به عنوان آیینه در کاواک لیزر فیبری استفاده می‌شود[۳]. به طور معمول انتشار نور در FBGs با استفاده از تئوری CMT تحلیل می‌شود. CMT روشی برای شبیه‌سازی انتشار نور در موجبرهای با جفت شدگی ضعیف است. در تئوری CMT ابتدا مدهای ساختارهای بدون آشفتگی یا جفت نشده تعریف و حل می‌شوند و سپس، یک ترکیب خطی از این مدها به عنوان یک جواب برای معادلات ماکسول برای ساختارهای آشفته یا جفت شده استفاده می‌شود. برای تجزیه و تحلیل پاسخ طیفی توری براگ معادلات جفت شده تئوری CMT با استفاده از پیکربندی ماتریس‌های انتقال حل می‌شوند[۴]. در این پیکربندی توری به طول L به N بخش یکنواخت تقسیم می‌شود، که هر بخش با یک ماتریس ۲ × ۲ مشخص می‌شود. دقت روش ماتریس انتقال، بستگی به تعداد بخش های N مورد استفاده در تجزیه و تحلیل دارد

مقدمه

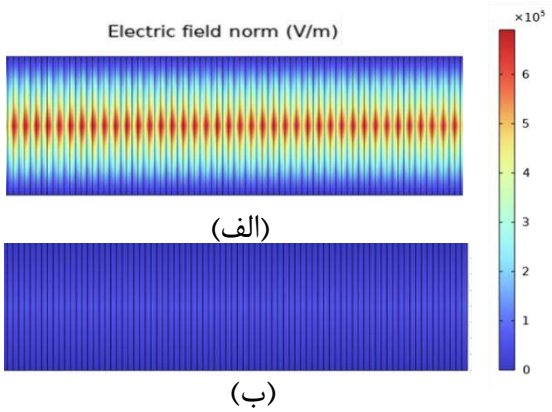
تا کنون روش‌های متعددی برای توصیف انتشار نور در توری‌های براگ فیبری (FBGs) به کار برده شده است که در این میان تئوری مدهای جفت شده (CMT) پرکاربردترین آن‌ها است که نزدیک ترین نتایج به واقعیت را دارد. در تئوری CMT دو مد غیر هم‌جهت در داخل ساختار FBG با معادلات دیفرانسیل جفت شده با هم مرتبط می‌شوند و در نهایت، معادلات جفت شده با استفاده از پیکربندی ماتریس انتقال حل می‌شوند[۱]. در این مقاله ما برای اولین بار با استفاده از روش المان محدود (FEM) به توصیف انتشار نور و چگونگی توزیع میدان الکتریکی و پاسخ طیفی ساختار FBGs طویل و فوق‌کوتاه (طول کمتر ۰.۵ میلیمتر) ، از طریق حل معادلات ماکسول می‌پردازیم و در نهایت پاسخ طیفی خود را با تئوری CMT مقایسه می‌کنیم.

مبانی نظری

ایجاد تغییرات متناوب ضریب شکست در قسمت کوتاهی از هسته‌ی فیبر نوری، موجب تشکیل یک FBG می‌شود. اگر منبع نور پهن باندی از جهت چپ شکل ۱ وارد فیبر شود، پس از اندکی حرکت به تغییرات تناوبی ضریب شکست برخورد می‌کند. تغییرات تناوبی ضریب شکست، مانند توری پراش عمل کرده و طول موج‌هایی که شرط تداخل را برقرار کنند، بیشینه بازتاب از توری را خواهند داشت. شرط سازنده بودن تداخل در FBGs، از رابطه‌ی (۱) پیروی می‌کند [۱].

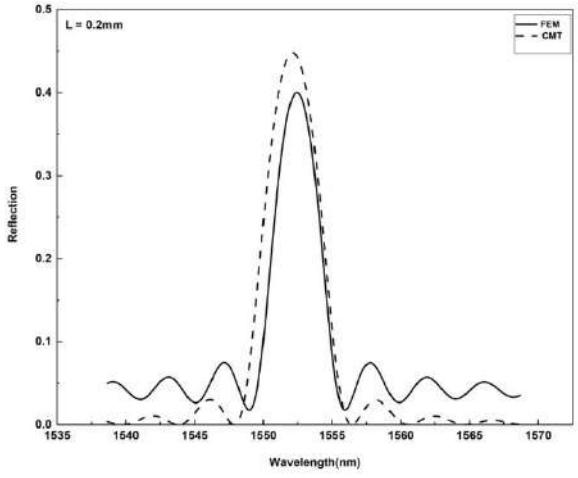
$$m\lambda_B = 2n_{eff}\,\Lambda \qquad (۱)$$

در رابطه بالا، λ_B طول موج براگ است که در پاسخ طیفی FBG در همسایگی این طول موج بیشینه بازتاب را داریم، m مرتبه توری، n_{eff} ضریب شکست موثر مد فیبر و Λ دوره تناوب توری را نمایش می‌دهد. FBGs به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله حساسیت بالا، دقت عالی و اندازه کوچک به عناصر کلیدی در طراحی حسگرهای



شکل ۳: توزیع دامنه میدان الکتریکی در ۲۰ میکرومتر انتهایی FBG با مشخصات L=1 mm و $\Delta n = 0.002$ در طول موج الف) ۱۵۴۵ نانومتر ب) ۱۵۵۲ نانومتر

بررسی شد. طیف‌های مربوطه از طریق روش FEM و با شرایط اولیه و شرایط مرزی یکسانی نسبت به تئوری CMT بدست آمده است و با طیف بازتابی تئوری CMT که از طریق پیکربندی ماتریس‌های انتقال حل شده، مقایسه می‌شود. در شکل۴ مشاهده می‌کنیم که طیف بازتابی روش FEM تفاوت کمی با روش CMT دارد. اما در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌کنیم که FBG طویل تر می‌شود نتایج روش



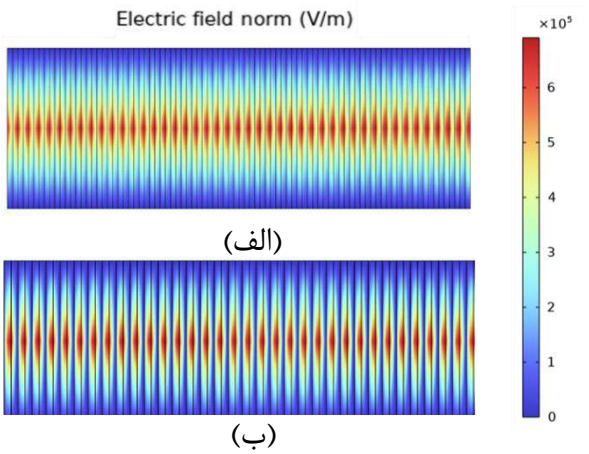
شکل ۴: مقایسه طیف بازتابی روش CMT با FEM در FBG با مشخصات L=0.2 mm و $\Delta n = 0.002$

FEM تطابق بیشتری نسبت به نتایج نظریه‌ی CMT پیدا می‌کند؛ بگونه‌ی که نتایج کاملا مشابه‌ای را در مقدار بیشینه طیف بازتابی FBG در شکل۵ و ۶ مشاهده می‌کنیم.

[۵,۶]. بنابراین نتایج تئوری CMT در FBGs طویل دقت بالاتری را نسبت به FBGs فوق‌کوتاه دارد. هدف ما در این مقاله شبیه‌سازی انتشار نور در FBG و مقایسه طیف بازتابی دو روش FEM و CMT برای FBGs طویل و فوق‌کوتاه می‌باشد، به همین منظور مسئله را مطابق شرایط مرزی و فرض هایی که تئوری CMT در روند حل خود استفاده کرده است، پیش می‌بریم.

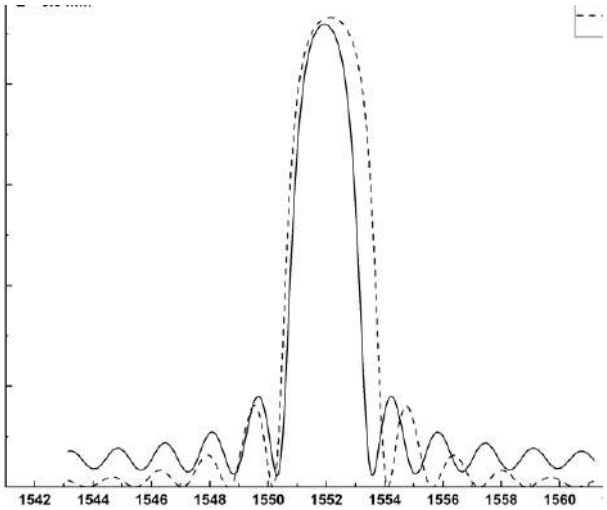
بحث و نتایج

شکل‌های ۲ و ۳ توزیع دامنه میدان الکتریکی در ۲۰ میکرومتر ابتدایی و انتهایی یک FBG با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بعنوان طول موج براگ و سایر مشخصات درج شده در زیر شکل را نشان می‌دهد. توزیع میدان توسط نرم افزار کامسول و با حل معادلات ماکسول با روش FEM به دست آمده است. بیشینه توزیع دامنه میدان در طول موج ۱۵۵۲ نانومتر در ابتدای توری قرار دارد و در انتهای توری به صفر می‌رسد؛ در نتیجه تمام این طول موج بازتاب خواهد شد. اما در طول موج ۱۵۴۵ نانومتر که از طول موج براگ، فاصله بیشتری دارد در ابتدا و انتهایی توری توزیع تقریبا یکسانی

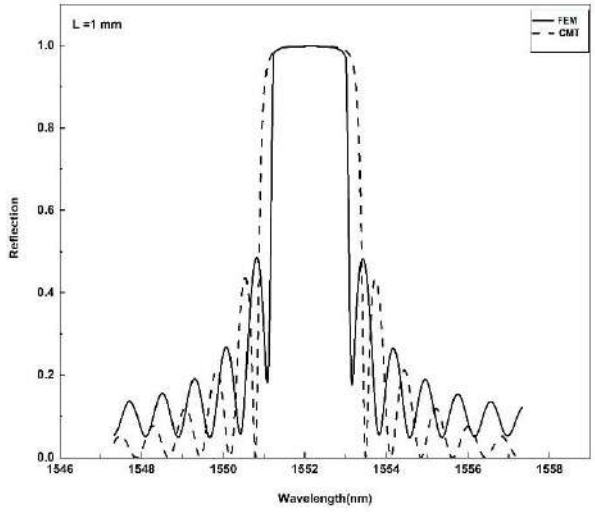


شکل ۲: توزیع دامنه میدان الکتریکی در ۲۰ میکرومتر ابتدایی FBG با مشخصات L=1 mm و $\Delta n = 0.002$ در طول موج الف) ۱۵۴۵ نانومتر ب) ۱۵۵۲ نانومتر

دارد؛ در نتیجه مقدار بسیار کمی از آن بازتاب خواهد شد. در ادامه شکل‌های ۵،۴ و ۶ طیف های بازتابی سه FBG با همان شرایط قبلی ولی با طول های ۰.۲ ، ۰.۵ و ۱ میلی‌متر



شکل۵ : مقایسه طیف بازتابی روش CMT با FEM در FBG با مشخصات L=0.5 mm و $\Delta n = 0.002$



شکل۶ : مقایسه طیف بازتابی روش CMT با FEM در FBG با مشخصات L=1 mm و $\Delta n = 0.002$

اختلاف طیف بازتابی FBG در طول‌های پایین بدلیل دقت پایین‌تر تئوری CMT نسبت به روش FEM است که ناشی از پیکربندی ماتریس‌های انتقال می‌باشد. پس در نتیجه استفاده از روش FEM در توری‌های فوق کوتاه مناسب تر از روش CMT می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر در روند شبیه‌سازی زمان انجام محاسبات می‌باشد؛ در FBG فوق کوتاه به شرط المان بندی مناسب و اصولی زمان انجام شبیه سازی دو روش قابل مقایسه می‌باشد اما در FBG طویل استفاده از روش CMT از لحاظ صرفه جویی در زمان بسیار مناسب‌تر از روش FEM می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به شبیه سازی توزیع دامنه الکتریکی FBG توسط حل معادلات ماکسول با استفاده از روش FEM پرداختیم و طیف بازتابی حاصل را با نتایج تئوری CMT مبتنی بر پیکربندی ماتریس انتقال مقایسه کردیم. نتایج ما نشان می‌دهد که روش FEM در FBG فوق‌کوتاه طیف دقیق‌تری را از خود به نمایش می‌گذارد، در حالی که در FBG طویل تطابق نسبتا خوبی را، میان دو روش داریم.

مرجع‌ها

[1] Erdogan, Turan. "Fiber gratings spectra**."** Journal of lightwave technology 15, no. 8 (1997): 1277-1294.

[2] Wang, Yiping, Ziliang Li, Shen Liu, Cailing Fu, Zhengyong Li, Zhe Zhang, Ying Wang, Jun He, Zhiyong Bai, and Changrui Liao. "Parallel-integrated fiber Bragg gratings inscribed by femtosecond laser point-by-point technology." Journal of Lightwave Technology 37, no. 10 (2019): 2185-2193.

[3] Zhang, Yang, Bai-Ou Guan, and Hwa-Yaw Tam. "Ultra-short distributed Bragg reflector fiber laser for sensing applications." *Optics express* 17, no. 12 (2009): 10050-10055.

[4] Ikhlef, Abdallah, Rachida Hedara, and Mohamed Chikh-Bled. "Uniform fiber Bragg grating modeling and simulation used matrix transfer method." International Journal of Computer Science Issues (IJCSI) 9, no. 1 (2012): 368.

[5] Khalid, K. S., M. Zafrullah, S. M. Bilal, and M. A. Mirza. "Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor." Journal of Optical Technology 79, no. 10 (2012): 667-673.

[6] Li, Hong, Kunyang Li, Huaibao Li, Fanyong Meng, Xiaoping Lou, and Lianqing Zhu. "Recognition and classification of FBG reflection spectrum under non-uniform field based on support vector machine." Optical Fiber Technology 60 (2020): 102371.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

ساخت میکروعدسی با استفاده از فوتولیتوگرافی با نوردهی گرادیانی

مینا ملائی[۱]، صمد محمودی[۱]، میلاد ملک‌محمدی[۲] و احسان احدی‌اخلاقی[۳،۲،۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷۶۶۷۳۱.
[۲]شرکت فتح نور میهن (فتح‌اپتیک)، پارک علم و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان.
[۳]مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷۶۶۷۳۱.
minamollaei@iasbs.ac.ir, e.a.akhlaghi@iasbs.ac.ir

چکیده – در این مقاله، روشی برای ساخت میکروعدسی‌ها با استفاده از ماسک باینری تحت نوردهی گرادیانی برمبنای پراش، ارائه شده است. در لیتوگرافی به روش معمول، تنها برخی از نواحی در معرض نور قرار می‌گیرند و سایر مناطق بدون نوردهی باقی می‌مانند. درحالی‌که در لیتوگرافی با نوردهی گرادیانی، هدف ایجاد یک گرادیان شدت نور است به‌طوری‌که نواحی با شدت نور بالا ارتفاع بیشتری و نواحی با شدت نور پایین‌تر ارتفاع کم‌تری داشته باشند. استفاده از لیتوگرافی با ماسک باینری و نوردهی گرادیانی این امکان را فراهم می‌کند که بتوان میکروعدسی‌هایی با سطح انحنای دقیق‌تر تولید کرد که ارتفاع و اعوجاج آن‌ها به کمک پروفایلومتر غیرتماسی قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

کلید واژه: پراش، پروفایلومتر، فوتولیتوگرافی، ماسک باینری، میکروعدسی

Fabrication of microlens using gradient exposure photolithography

Mina Mollaei[1], Samad Mahmoudi[1], Milad MalekMohammadi[2], and Ehsan A. Akhlaghi[1,2,3]

[1]Department of physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan 45137-66731
[2]Science and Technology Park, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan
[3]Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan 45137-66731

Abstract- In this paper, a method to fabricate microlenses using a binary mask under diffraction-based gradient exposure is presented. In traditional lithography, only some areas are exposed to light and other areas remain unexposed. While in gradient exposure lithography, the goal is to create a light intensity gradient so that areas with high light intensity have more height and areas with lower light intensity have less height. The use of lithography with binary mask and gradient exposure makes it possible to produce microlenses with a more accurate curved surface, whose height and distortion can be measured with the using a non-contact profilometer.

Keywords: Diffraction, Profilometer, Photolithography, Binary mask, Microlens

مقدمه

در طول دهه‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری در زمینه ساخت ادوات میکرواپتیکی انجام شده است. این ادوات، مانند میکروعدسی‌ها با قطر چند تا چندصد میکرون با پروفایل‌های سطحی دلخواه، کاربردهای مهمی در زمینه اپتیک و فوتونیک، عکاسی و تصویربرداری برای ثبت تصاویر با رزولوشن بالا، صنعت نانوتکنولوژی و میکروسکوپ‌های مینیاتوری و سایر زمینه‌ها دارند. به همین دلیل، روش‌های مختلفی برای ساخت چنین ادوات اپتیکی ایجاد شده و گسترش یافته است به عنوان مثال می‌توان به روش‌های لیتوگرافی پرتو یونی، جریان مجدد حرارتی، چاپ جوهرافشان، لیتوگرافی نرم و لیتوگرافی تماسی اشاره کرد که هریک به دلیل وجود محدودیت‌های غیرقابل انکاری، مانند دشواری کنترل دقیق سطح، محدودیت حد پراش و هزینه زیاد ساخت، توسعه و ساخت این عناصر را محدود کرده است [۱].

در زمینه ساخت ادوات میکرواپتیکی، روش فوتولیتوگرافی با ماسک باینری و خاکستری بهبود وضوح تکنیک‌های لیتوگرافی مرسوم مانند لیتوگرافی تماسی را که توسط حد پراش محدود شده است، فراهم کرده است. این روش در حوزه‌های مختلفی از فناوری میکروساخت، از جمله تولید الگوهای میکروعدسی، نقش مهمی ایفا کرده است [۲]. با این حال، فوتولیتوگرافی با ماسک باینری و خاکستری به‌دلیل پیچیدگی‌های توپوگرافی سطح و رفتار غیرخطی فوتورزیست‌های معمولی با محدودیت‌های خاص خود مواجه است. به همین منظور برای ارتقای ساخت ادوات میکرواپتیکی و عبور از محدودیت‌های موجود در روش‌های ساخت، تحقیقات و توسعه بیشتر در زمینه فوتولیتوگرافی با ماسک باینری و خاکستری به‌طور پیوسته انجام می‌شود که این روش می‌تواند بهبودهای قابل توجهی در ساخت ادوات میکرواپتیکی به ارمغان بیاورد [۵-۳].

در این مقاله، روشی را بر اساس فوتولیتوگرافی با نوردهی گرادیانی توسط ماسک باینری ارائه می‌کنیم که با کالیبره کردن میزان نوردهی گرادیانی توسط پدیده پراش، می‌توان میزان فوتون‌های جذب شده در لایه فوتورزیست را کنترل کرد. در این روش با کنترل میزان دی‌فوکوس بودن طرح ماسک در سطح نمونه، نوری‌دهی گرادیانی ایجاد می‌شود و در نتیجه آن پس از عمل لیتوگرافی نوری، گرادیانی از ضخامت در فوتورزیست خواهیم داشت.

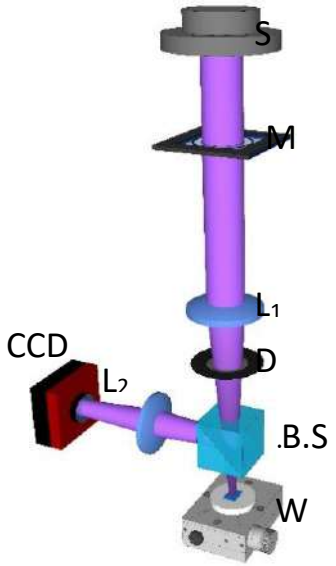
یک بخش مهم در فرآیند ساخت، مشخصه‌یابی نمونه‌های ساخته شده است. برای این منظور استفاده از یک روش اندازه‌گیری سریع و دقیق برای بررسی سطح نمونه و ارتفاع‌سنجی سطح عدسی نیاز است که ایراداتی مانند خراشیدگی، فرورفتگی و یا تغییرات کوچکی را که در سطح یک محصول وجود دارد را اندازه‌گیری کند. برای این اندازه‌گیری، روش‌های مختلفی مانند AFM، OCT، میکروسکوپ کانفوکال و پروفایلومتری غیرتماسی وجود دارد که در این مقاله، از یکی از بهترین روش‌های موجود، پروفایلومتری غیرتماسی، استفاده شده است.

کارهای تجربی:

چیدمان فوتولیتوگرافی:

چیدمان اپتیکی فوتولیتوگرافی شامل منبع نور فرابنفش با طول‌موج ۳۶۵ نانومتر، عدسی، نگهدارنده ماسک، دیافراگم و صفحه نگهدارنده زیرلایه و دوربین آشکارساز است (شکل ۱). در این چیدمان اپتیکی، برای تنظیم و جابه‌جایی میکرومتری موقعیت ماسک، از نگهدارنده متصل به جابه‌جاگر و برای تصویرسازی طرح ماسک روی فتورزیست از عدسی کوارتز به فاصله‌کانونی ۷/۵ سانتی‌متر استفاده شده است که باتوجه به حفظ چگالی انرژی پرتو و عدم اتلاف آن در زمان انتشار، عدسی مورد استفاده می‌بایست خاصیت جذب اشعه فرابنفش را نداشته باشد. سپس نور

موازی شده پس از عبور از ماسک، به عدسی اول تابیده می‌شود که پس از آن سهمی از نور در باریکه‌شکن به زیرلایه پوشانده شده با فتورزیست تابیده و به‌دلیل جنس زیرلایه، از سطح بازتابیده شده و به عدسی دوم که بین باریکه‌شکن (از جنس کوارتز) و دوربین آشکارساز قرار دارد، تابانده می‌شود. بازوی دوم جهت بررسی تنظیمات سیستم نوردهی و بخش تنظیم ماسک است، به طوری که عدسی دوم به همراه دوربین از سطح حساس به نور نمونه تصویربرداری می‌کند.



شکل ۱: طرحواره چیدمان اپتیکی فوتولیتوگرافی که شامل S منبع نور فرابنفش، M ماسک، L1 عدسی کوارتز، D دیافراگم، B.S. باریکه‌شکن، W زیرلایه، L2 عدسی تصویرساز و CCD دوربین آشکارساز است.

فرآیند ساخت میکروعدسی:

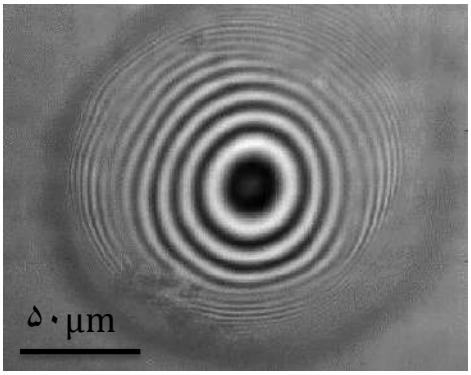
پس از تنظیم چیدمان اپتیکی برای ساخت میکروعدسی، می‌بایست سطح زیرلایه از ذرات گرد و غبار، چربی و یا دیگر مواد اضافی با کمک برس، محلول‌های پاک کننده ویژه و آب مقطر پاک شود. سپس زیرلایه برروی وکیوم لایه‌نشانی دورانی قرار داده شده و توسط فوتورزیست با سرعت اولیه ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ ثانیه و سرعت ثانویه ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵۵ ثانیه، پوشانده می‌شود که این پوشش‌دهی یکنواخت برحسب ضخامت مدنظر تعیین می‌شود. پس از پوشش‌دهی زیرلایه توسط فوتورزیست، برای افزایش چسبندگی فتورزیست به سطح زیرلایه فرآیند پخت نرم نمونه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۰ دقیقه انجام می‌شود.

گام بعدی، مرحله نوردهی گرادیانی ماسک‌های باینری بر مبنای پراش است که این ماسک با استفاده از میکروماشین‌کاری بر روی یک صفحه استیل با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر، به قطر ۱۷۰ میکرون ساخته شده است. هدف از این مرحله، انتقال الگوی ماسک به زیرلایه پوشش داده شده با فوتورزیست است که در مکانی غیر از محل تصویر ماسک (دی‌فوکوس)، قرار گرفته است و توزیع شدت نور تابیده شده به زیرلایه شبه‌گاوسی است. به این ترتیب در مدت زمان ۴ دقیقه، پراش نور فرابنفش از ماسک باینری، موجبات نوردهی گرادیانی را فراهم می‌کند.

پس از نوردهی، برای تقویت و استحکام فتورزیست و افزایش چسبندگی به سطح زیرلایه، پخت سخت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام می‌شود. در نهایت، با اسپری کردن محلول شست‌وشو بر روی زیرلایه و سپس با آب مقطر نمونه شست‌وشو داده می‌شود تا طرح تولید شده روی زیرلایه نمایان شود.

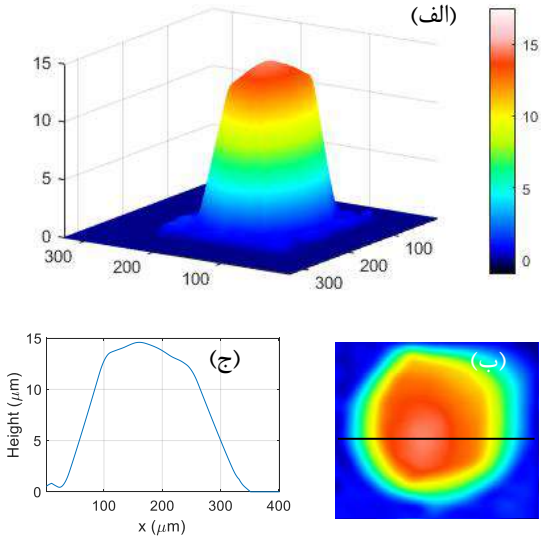
نتایج:

پس از چاپ طرح ماسک و شست‌وشو، بررسی و اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی و ظاهری میکروعدسی ساخته شده با استفاده از میکروسکوپ تداخلی نورسفید و پروفایلومتر غیرتماسی SSP001 ساخت شرکت فتح نور میهن انجام شد. شکل ۲ یک تصویر نوعی از طرح‌تداخلی از نمونه ساخته شده را نمایش می‌دهد.



شکل۲: تصویر ثبت شده از میکرولنز ساخته شده توسط میکروسکوپ تداخلی نورسفید. دوایر هم‌مرکز نشان‌دهنده توزیع مکان‌هندسی نقاط هم‌ارتفاع است. فاصله بین هر دو خط متوالی معادل با ۳۲۵ نانومتر در ارتفاع است.

نتایج تحلیل داده‌های تداخلی ثبت شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. شکل ۳(الف) و ۳(ب) به ترتیب نمایش سه‌بعدی و دو بعدی از توپوگرافی سه‌بعدی میکروعدسی ساخته شده را نمایش می‌دهند. شکل ۳(ج) نمایه ارتفاع میکروعدسی در خط مشخص شده در شکل ۳(ب) را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: (الف) تصویر سه‌بعدی از میکروعدسی ساخته شده با استفاده از نوردهی گرادیانی. تصویر با استفاده از میکروسکوپ تداخلی SSP001 ساخت شرکت فتح نور میهن که با رزولوشن عمقی ۵ نانومتر ثبت شده است. (ب) تصویردوبعدی از توزیع ارتفاع میکروعدسی (ج) نمایه ارتفاع میکروعدسی در خط مشخص شده در شکل (ب).

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، قطر میکروعدسی ۱۷۳ میکرومتر و ارتفاع بخش محدب میکروعدسی ۴/۱ میکرون به دست آمده است. هم‌چنین با توجه ضریب‌شکست ماده فوتورزیست که برابر ۱/۵۹ است، فاصله کانونی میکروعدسی ساخته شده برابر ۱/۵ میلی‌متر به دست آمد.

نتیجه‌گیری:

در این مقاله، روشی برای ساخت میکروعدسی با استفاده از نوردهی گرادیانی گزارش شده است. در این روش به کمک ماسک باینری و با قرار دادن سطح حساس به نور زیرلایه در محلی خارج از صفحه تصویر و به صورت دی‌فوکوس، توزیع شدت گرادیانی ایجاد شد. مزایای استفاده از این روش غلبه بر محدودیت‌های موجود در فوتولیتوگرافی با ماسک‌های باینری و خاکستری بوده که امکان ساخت آسان و قابل کنترل میکروعدسی‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی و ظاهری متنوع و با کیفیت مطلوب را فراهم می‌کند.

منابع:

[1] Dill, Frederick H. "Optical lithography." *IEEE transactions on electron devices* 22.7 (1975): 440-444.

[2] Wu, Hongkai, Teri W. Odom, and George M. Whitesides. "Reduction photolithography using microlens arrays: applications in gray scale photolithography." *Analytical chemistry* 74.14 (2002): 3267-3273.

[3] Allouti, Nacima, et al. "Grayscale lithography process study for sub 5µm microlens patterns." *Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/NEMS, and MOEMS* 2019. Vol. 10958. SPIE, 2019.

[4] Yuan, Wei, et al. "Fabrication of multifocal microlens array by one step exposure process," *Micromachines* Vol. 12. No. 9, pp. 1097, 2021.

[5] Mosher, Lance, et al. "Double-exposure grayscale photolithography," *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 18 No. 2, pp. 308-315, 2009.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

ساخت و مشخصه یابی ساختار مس آنتیموان سولفید – کادمیوم سولفید بر روی زیر لایه های رسانای شفاف متفاوت

سمانه شاپوری[۱] و رسول ملک فر[۲]

۱. **دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده علوم- گروه فیزیک اتمی مولکولی- بخش فیزیک**
samaneh_shapouri@modares.ac.ir

۲. **دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده علوم- گروه فیزیک اتمی مولکولی- بخش فیزیک**
malekfar@modares.ac.ir

چکیده - از زمان ظهور سلول های خورشیدی نسل دوم، انواع مختلفی از مواد به عنوان جاذب های خورشیدی برای افزایش کارایی و افزایش دوام این نوع دستگاه ها مورد بررسی قرار گرفته اند. از بین این مواد، ترکیب سه تایی مس آنتیموان سولفید به خاطر ویژگی‌های الکترونیکی و نوری مناسب خود، یک ماده‌ی نیمه‌رسانا قابل اطمینان در سلول‌های خورشیدی نسل دوم تلقی می‌شود. در این تحقیق به مطالعه لایه جاذب مس آنتیموان سولفید رشد داده شده به روش اسپری پیرولیز بر روی لایه کادمیوم سولفید و زیر لایه های اکسید قلع ایندیم و اکسید قلع آلاییده شده با فلور پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از آنالیز پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی نشان دادند که لایه های جاذب ایجاد شده بر روی لایه کادمیوم سولفید و زیر لایه اکسید قلع آلاییده شده با فلور دارای خواص بلوری و ساختاری بهتر و اندازه دانه های بزرگتر (حدود ۱۰۰ نانومتر بزرگتر) هستند. همچنین در این مقاله گاف انرژی لایه جاذب نیز در حدود ۱/۸ الکترون ولت بدست آمد.

کلیدواژه - رسانای شفاف، سلول خورشیدی لایه نازک، مس آنتیموان سولفید، کادمیوم سولفید، لایه جاذب خورشیدی

Fabrication and characterization of $CuSbS_2$-CdS on different transparent conductive oxide substrates

Samaneh Shapouri[1], Rasoul Malekfar[2]

1. **Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Sciences, Tarbiat Modares University, samaneh_shapouri@modares.ac.ir**
2. **Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Sciences, Tarbiat Modares University, malekfar@modares.ac.ir**

Abstract - Since the advent of second-generation solar cells, various types of materials have been investigated as solar absorbers to enhance the efficiency and increase the durability of these types of devices. Among the materials investigated, the ternary $CuSbS_2$ is considered a reliable material due to its unique optical and electronic properties. This study aims to investigate $CuSbS_2$ absorber layers grown via spray pyrolysis method on CdS-ITO and CdS-FTO substrates. The results of XRD and FESEM microscopy showed that the absorber layer fabricated on CdS-FTO has better microstructural and micro morphological properties with the larger grain size (100 nm larger). Additionally, in this article the Band gap of the absorber is estimated to be 1.8 eV.

Keywords: Transparent Conductive Oxides, Thin-Film Solar Cell, $CuSbS_2$, CdS, Solar absorber layer

مقدمه

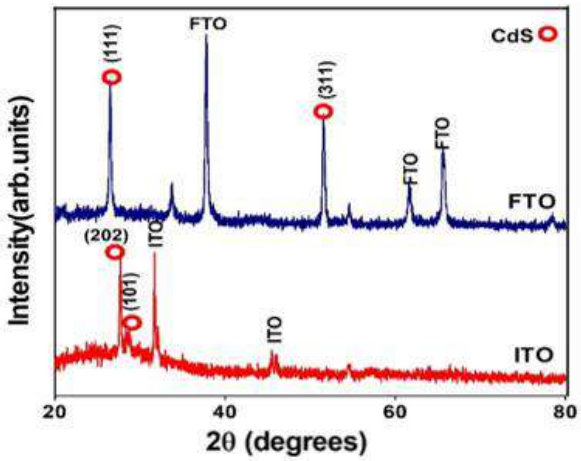
توسعه فن آوری های جدید فوتوولتایی بر اساس لایه های نازک به دلیل نیاز به مواد نیمه هادی ارزان تر و کارآمدتر انجام شده است. سلول های خورشیدی لایه نازک دارای مزایایی مانند تولید ارزان، مصرف کم مواد، در دسترس بودن مواد اولیه و امکان لایه نشانی بر روی بسیاری از بسترهای می باشند [1]. در میان سلول های خورشیدی لایه نازک پر بازده می توان به سلول های خورشیدی کادمیوم تلوراید، گالیوم آرسناید و مس ایندیوم گالیوم سلناید اشاره کرد. گرچه به دلیل نیاز به تجهیزات پیشرفته برای رشد اپیتکسیال، استفاده از مواد سمی و قیمت بالای مواد اولیه، این سلول های خورشیدی دارای مضراتی نیز هستند [2]. یکی از لایه های جاذب جایگزین که مشکلات ذکر شده را در برندارد، جاذب خورشیدی مس آنتیموان سولفید یا $CuSbS_2$ (CAS) می باشد. این لایه جاذب از مواد اولیه دارای فراوانی بالا در کره زمین و بسیار مقرون بصرفه و دوستدار محیط زیست ساخته می شود. CAS یک نیمه رسانای مرکب سه تایی دارای نام معدنی کالکوستیبیت می باشد. این نیمه رسانا را می توان به رنگ خاکستری سربی تا سیاه مشاهده کرد که یک ماده نیمه هادی نوع P با ساختار بلوری اورتورومبیک بوده و و دارای گاف انرژی در حدود ۱/۵ eVو ضریب جذب بیش از 10^5 cm^{-2} می باشد [3]. از میان روش های لایه نشانی این ماده می توان به روش های الکترو شیمیایی، کندوپاش، اسپین کوت، تبخیر گرمایی، حمام شیمیایی و اسپری پیرولیز اشاره کرد. در این میان روش اسپری پیرولیز به دلیل مقرون بصرفه بودن، امکان رشد بدون خلاء و امکان تولید نمونه ها در ابعاد بزرگ مورد توجه قرار گرفته است [4]. یکی از ساختار هایی که در آن لایه جاذب CAS در سلول خورشیدی لایه نازک مورد استفاده قرار می گیرد ساختار رو لایه است که بخش عمده آن با لایه نشانی لایه کادمیوم سولفاید بر روی رسانای شفاف مانند ITO و یا FTO و سپس لایه نشانی لایه CAS ایجاد می شود. در ساختار رولایه، نور با عبور از شیشه ابتدا به رسانای شفاف و سپس به لایه بافر و بعد به $CuSbS_2$ می رسد [5]. کارهای انجام شده در این زمینه عمدتا از سال ۲۰۱۴ تاکنون بوده اند [6]. با وجود اهمیت بالای ساختار نام برده و همچنین عدم وجود مطالعات جامع در این زمینه، این تحقیق به انجام رسیده است.

جزییات آزمایش

جهت لایه نشانی CdS بر روی زیر لایه های ITO و FTO به روش حمام شیمیایی، از $CdSO_4$ با غلظت ۰/۰۱۵ مولار در ۵۰ میلی لیتر محلول حاوی ۳۶۶ میلی لیتر آب دیونیزه به همراه ۶۲۰ میلی لیتر آمونیوم هیدروکسید و ۲۵ میلی لیتر محلول تیوره ۱/۵ مولار استفاده شد. محلول بدست آمده را به خوبی با دستگاه هم زن مغناطیسی مخلوط کرده و به دمای ۸۰ درجه سانتی گراد رسانده و سپس زیر لایه های ITO و FTO بصورت عمودی در حمام شیمیایی به مدت ۲۰ دقیقه قرار دادیم. در مرحله بعد جهت لایه نشانی لایه جاذب، ۱۰۰ میلی لیتر محلول حاوی کلرید مس ۰/۰۲۵ مولار، کلرید آنتی موآن ۰/۰۱ مولار و تی اوره ۰/۰۸ مولار و آب دیونیزه را تهیه کرده و به وسیله هم زن مغناطیسی به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط کردیم. سپس محلول بدست آمده را با استفاده از دستگاه اسپری پیرولیز با نرخ ۱۷ میلی لیتر بر دقیقه در فاصله ۳۰ سانتی متری بر روی لایه های FTO-CdS و ITO-CdS در دمای ۳۶۰ درجه سانتی گراد لایه نشانی کردیم تا به ترتیب نمونه های A و B بدست آیند. در این تحقیق تمام مواد شیمیایی از شرکت سیگما آلدریچ و تمام محلول ها از شرکت دکتر مجللی تهیه شدند. جهت مشخصه یابی نمونه ها از دستگاه پراش اشعه ایکس، STOE-XRD diffractometer using Cu-Kα line (λ = 0.15406 nm) و همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM, HITACHI S-4160) و از دستگاه طیف سنج مرئی- فرابنفش (UV-Vis-NIR T80+) استفاده شد.

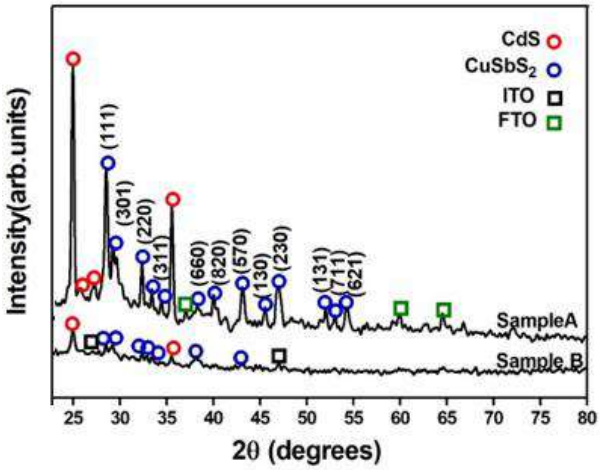
نتایج و بحث

درشکل ۱، نتایج پراش اشعه ایکس لایه CdS رشد یافته بر روی ITO و FTO نشان داده شده است. همانطور که درشکل ۱ مشخص است، پیک های مربوط به صفحات (۱۱۱) و (۳۱۱) از کادمیوم سولفاید بر روی لایه FTO تشکیل شده اند **[7]**.



شکل ۱. الگوی پراش اشعه ایکس لایه های کادمیوم سولفاید ساخته شده بر روی ITO و FTO

همچنین الگو های پراش اشعه ایکس بر روی ITO نیز نشان دهنده تشکیل پیک هایی مر تبط با صفحات (۲۰۲) و (101) کادمیوم سولفاید می باشد **[8]**. پس از بررسی و اطمینان از لایه نشانی لایه کادمیوم سولفاید بر روی زیر لایه های ITO وFTO، به لایه نشانی لایه CAS بر روی لایه های مذکور پرداخته شد. جهت بررسی ساختاری نمونه های تکمیل شده الگوهای پراش اشعه ایکس انجام شده بر روی نمونه A (FTO-CdS-CAS) و نمونه B (ITO-CdS-CAS) پرداختیم که در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، الگوی پراش اشعه ایکس نشان دهنده شکل گیری پیک های مجزا مرتبط با صفحات کریستالی $CuSbS_2$ با ساختار اورتورومبیک (PDF#44-1417) می باشد.



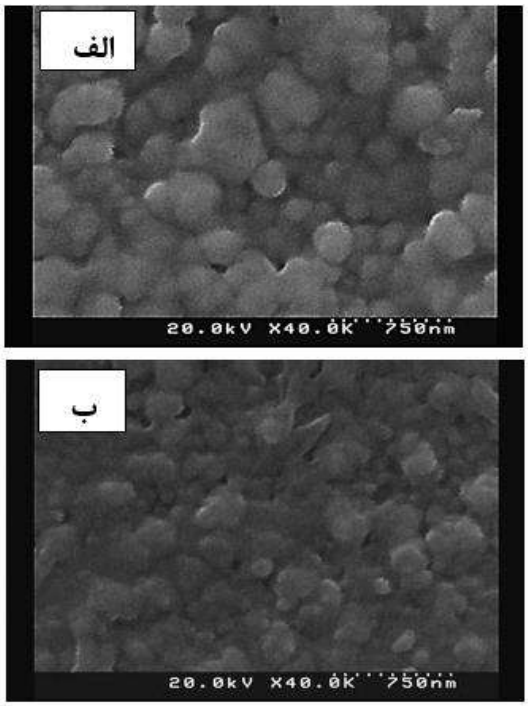
شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه A و نمونه B

به علاوه، پیک های مرتبط با CdS، ITO و FTO نیز تشکیل شده اند **[7,8]**. گرچه به نظر می رسد تعداد و میزان تیزی پیک ها در نمونه A بیشتر از نمونه B است. جدول ۱ نشان دهنده میزان پهنا در نصف مقدار بیشینه (FWHM) برای دو پیک اصلی CAS در نمونه های A وB می باشد. کاهش این پارامتر در هر دو پیک برای نمونه A نسبت به نمونه B نشانگر کریستالی تر بودن نمونه A می باشد.

جدول ۱. جدول FWHM پیک های CAS برای نمونه های A, B

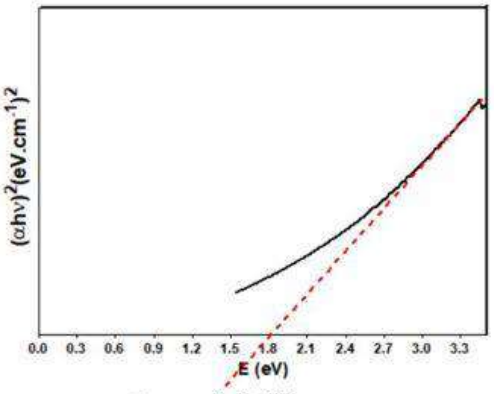
FWHM (^{0})		
نمونه B	نمونهA	صفحات کریستالی
۰/۳۱	۰/۱۹	(۱۱۱)
۰/۹۴	/۱۵	(۳۰۱)

به منظور مطالعه بیشتر این نمونه ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل ۳ الف و ب نمایش داده شده است که نشان می دهد نمونه A و B به ترتیب دارای میانگین اندازه دانه در حدود ۲۳۰ و ۱۳۳ نانومتر می باشند. اندازه دانه ها در نمونه A بزرگتر از نمونه B می باشد،که این موضوع به میکروساختار متفاوت کادمیوم سولفاید بر روی ITO و FTO بر می گردد. تشکیل شدن دانه ها با اندازه بزرگتر و مرز دانه های مشخص می تواند در اثر خواص کریستالی بهتر نمونه A نسبت به نمونه B باشد که توسط آنالیز پراش اشعه ایکس نشان داده شد.



شکل ۳.تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدان الکتریکی از الف) نمونه A و ب) نمونه B

قطعا اندازه دانه های زیر لایه های شفاف، سپس نحوه تشکیل دانه های CdS بر آن ها می تواند در ریخت شناسی لایه های نهایی CAS موثر باشد. در اینجا نمونه A دارای دانه های بزرگتر و مرز دانه های مشخص تر می باشد که می تواند در بهبود خواص الکتریکی لایه نقش بسزایی ایفا کند. به علاوه جهت بررسی گاف انرژی لایه جاذب ساخته شده بر روی شیشه را توسط طیف سنجی مرئی-فرابنفش مورد بررسی قرار دادیم. سپس طبق قانون تاک **[9]** (گاف انرژی مستقیم)، نمودار $(\alpha h\vartheta)^2$ برحسب انرژی رسم شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. محل طلاقی خط



شکل ۴. نمودار $(\alpha h\vartheta)^2$ برحسب E

مماس با نمودار و محور افقی، نمایانگر گاف انرژی ۱/۸ الکترون ولت مناسب برای سلول خورشیدی است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، لایه های جاذب CAS به روش اسپری پیرولیز بر روی لایه های کادمیوم سولفاید و دو زیر لایه ITO و FTO لایه نشانی شدند. الگوهای پراش اشعه ایکس حاکی از شکل گیری مناسب لایه CAS بر روی هر دو ساختار بود، گرچه لایه ایجاد شده بر روی FTO-CdS خواص کریستالی بهتری را از خود نشان داد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز نمایانگر شکل گیری دانه ها با اندازه میانگین ۱۰۰ نانومتر بزرگتر و مرزهای مشخص در این نمونه بود. گاف انرژی برای لایه CAS در این تحقیق معادل با ۱/۸ الکترون ولت بدست آمد که در محدوده مناسب برای یک لایه جاذب در سلول های خورشیدی می باشد. نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در زمینه ساخت سلول های خورشیدی لایه نازک رولایه CAS موثر باشد.

مراجع

[1] N. Kannan, D. Vakeesan, Renewable and Sustainable Energy Reviews 62 (2016) 1092–1105.
[2] B.H. Kumar, S. Shaji, M.C.S. Kumar, Thin Solid Films 697 (2020) 137838.
[3] A. Hussain, R. Ahmed, N. Ali, F.K. Butt, A. Shaari, W.N.W. Shamsuri, R. Khenata, D. Prakash, K.D. Verma, Superlattices and Microstructures 89 (2016) 136–144.
[4] R. Zhou, X. Liu, S. Zhang, L. Liu, L. Wan, H. Guo, X. Yang, Z. Cheng, L. Hu, H. Niu, X. Mao, Materials Science in Semiconductor Processing 124 (2021) 105613.
[5] L. Fu, J. Yu, J. Wang, F. Xie, S. Yao, Y. Zhang, J. Cheng, L. Li, Chemical Engineering Journal 400 (2020) 125906.
[6] R.E. Ornelas-Acosta, D. Avellaneda, S. Shaji, G.A. Castillo, T.K. Das Roy, B. Krishnan, J Mater Sci: Mater Electron 25 (2014) 4356–4362.
[7] G. Mustafa, M.R.I. Chowdhury, D.K. Saha, S. Hussain, O. Islam, Dhaka Univ. J. Sci. 60 (2012) 283–288.
[8] S. Yılmaz, A. Ünverdi, M. Tomakin, İ. Polat, E. Bacaksız, Appl. Phys. A 128 (2022) 183.
[9] V. Vinayakumar, S. Shaji, D. Avellaneda, J.A. Aguilar-Martínez, B. Krishnan, RSC Adv. 8 (2018) 31055–31065.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی تاثیر عوامل محیطی بر شاخص‌های گیاهی وابسته به کلروفیل در برگ ذرت توسط دوربین فراطیفی

سارا الماسی[۱]، احمد درودی[۱]، رضا فتوت[۲]، مجید پناهی[۱]، علی بیات[۱]

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان
۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان

چکیده - بررسی سلامت و کیفیت محصولات کشاورزی به لحاظ اقتصادی و بهداشتی به امری مهم تبدیل شده است. مطالعه‌ی رفتار طیفی انعکاسی گیاه درک درستی از فتوسنتز و فرآیندهای رویشی گیاهان در اختیار قرار می‌دهد. بررسی تاثیرات ناشی از عوامل محیطی یکی از مهم‌ترین کاربردهای تصویربرداری فراطیفی در حوزه‌ی کشاورزی است. در این مقاله از دوربین فراطیفی به عنوان یک روش غیر مخرب برای بررسی شاخص‌های گیاهی وابسته به کلروفیل برای گیاه ذرت استفاده شده است و نتایج به‌دست آمده از این روش با نتایج دستگاه کلروفیل‌سنج (SPAD) و همچنین دستگاه اسپکتروفتومتر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد تجزیه و تحلیل تصاویر طیفی ثبت شده توانایی اندازه‌گیری شاخص‌های وابسته به کلروفیل را دارا است.

کلید واژه- برگ ذرت، دوربین فراطیفی، کلروفیل، SPAD، اسپکتروفتومتر.

Investigating the effect of environmental factors on chlorophyll-dependent plant indices in corn leaves using the hyperspectral camera

Sara Almasi [1], Ahmad Darudi [1], Reza Fotovvat [2], Majid Panahi [1], Ali Bayat [1]

1- Department of physics, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan
2- Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan

Sara.almasi@znu.ac.ir, a.darudi@gmail.com, r_fotovat@znu.ac.ir, majidpanahi@znu.ac.ir, abayat@znu.ac.ir

Abstract- Examining the health and quality of agricultural products has become an important matter from the economic and health point of view. The study of spectral reflectance behavior of plants provides a correct understanding of photosynthesis and vegetative processes of plants. Investigating the effects of environmental factors is one of the most important applications of hyperspectral imaging in the field of agriculture. In this article, the hyperspectral imager has been used as a non-destructive method to investigate the chlorophyll-dependent plant indices for the corn plant, and the results obtained from this method have been compared with the results of the chlorophyll meter (SPAD) and also the spectrophotometer. The results show that the analysis of recorded spectral images has the ability to measure chlorophyll-related indices.

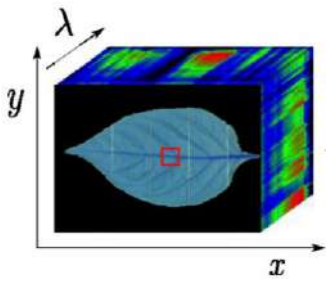
Keywords: Corn leaf, Hyperspectral camera, Chlorophyll, SPAD, Spectrophotometer.

مقدمه

ویژگی طیفی گیاهان در طول موج‌های مختلف تحت تاثیر ساختار درون و برون سلولی برگ، غلظت و ترکیب مواد بیوشیمی از جمله کلروفیل، کارتنوئید، نیتروژن و میزان آب موجود در گیاه است. هر یک از عوامل یاد شده در یک یا چند طول موج خاص دارای اثر آشکارتری است. به طور کلی مشخصه طیفی همه گیاهان در سه محدوده مشخص طول موج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در محدوده مرئی، منحنی طیف بازتابی برگ تحت تاثیر جذب طیفی رنگدانه‌هایی از قبیل کلروفیل، کارتنوئید بوده و حداکثر انعکاس در بخش مرئی در طول موج ۵۵۰ نانومتر است [۱]. از جمله برنامه‌های کاربردی تصویربرداری فراطیفی می‌توان به ارزیابی رنگدانه‌های برگ مانند کلروفیل و کاروتنوئید اشاره کرد. با تحلیل تصویر فراطیفی وضعیت کم آبی، تغذیه و میزان آلودگی و بیماری در گیاهان اندازه‌گیری می‌شود.

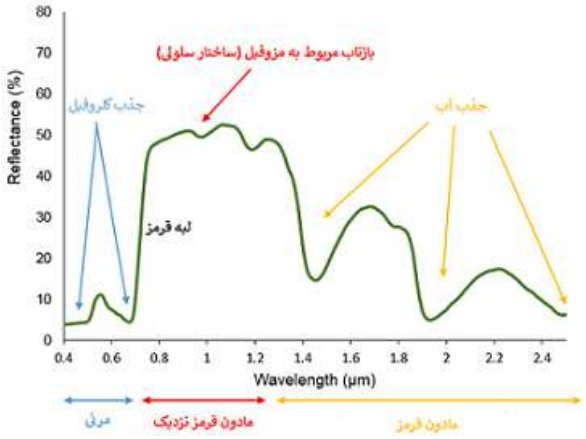
تصویربرداری فراطیفی

تصویربرداری فراطیفی از ترکیب طیف‌سنجی و تصویربرداری دیجیتال حاصل می‌شود. یک دوربین رنگی معمولی تنها سه نوار طیفی قرمز، سبز و آبی را به دست می‌آورد، در حالی که دوربین فراطیفی طیف گسترده‌ای از طول موج‌ها را ثبت می‌کند و با ایجاد یک مکعب طیفی اطلاعات دقیق‌تری را در مورد نمونه مورد بررسی ارائه می‌دهد. بنابراین، تصویربرداری فراطیفی می‌تواند برای طبقه‌بندی اشیاء، گیاهان و ... بر اساس خواص طیفی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۲].



شکل ۱: مکعب طیفی برای سطح یک برگ

شکل (۱) مکعب طیفی یک برگ است و شکل (۲) طیف بازتابی یک بخش از برگ سالم است که از مکان مشخص نشان داده شده بر روی شکل (۱) حاصل شده است [۲].



شکل ۲: طیف بازتابی برگ سالم

شاخص‌های گیاهی

با اندازه‌گیری طیف بازتابی گیاه با استفاده از دوربین فراطیفی و محاسبه شاخص‌های طیفی می‌توان در کمترین زمان ممکن، پارامترهای بیوفیزیکی گیاه را تخمین زد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که اکثر شاخص‌های طیفی حاصل از سطح گیاه با محتوای کلروفیل رابطه دارد. یک گیاه سالم به نسبت گیاه بیمار، میزان کلروفیل بالاتری دارد. بنابراین ظرفیت کلروفیل برگ، معیار مناسبی برای کشف تنش گیاه است [۳]. در روش‌های قدیمی، از جمله دستگاه اسپکتروفتومتر، اندازه‌گیری محتوای کلروفیل گیاه به نمونه‌برداری از گیاه نیاز دارد که مخرب، هزینه‌بر و زمان‌بر است. اسپکتروفتومتر برای اندازه‌گیری مقدار نور جذب شده توسط یک نمونه استفاده می‌شود و به کمک آن می‌توان مقادیر کلروفیل a، b و کل را در گیاهان مختلف اندازه‌گیری کرد [۴]. رابطه‌های مربوط به محاسبه‌ی این مقادیر در ردیف‌های ۱تا ۳ جدول (۱) داده شده است.

شاخص کلروفیل به دست آمده توسط دوربین فراطیفی با استفاده از ضرایب بازتاب در طول موج‌های ۷۰۰ و ۷۶۰ نانومتر طبق رابطه‌ی ذکر شده در ردیف ۴ جدول (۱) محاسبه می‌گردد. علاوه بر این، کلروفیل‌سنج (SPAD)،

غلظت نسبی کلروفیل برگ را بر اساس مقدار نور عبوری از برگ، در دو طول موجی که جذب کلروفیل در آن‌ها تفاوت دارد، اندازه‌گیری می‌کند. باید توجه داشت که عدد SPAD تنها تخمینی از غلظت کلروفیل است و همبستگی بالایی با مقدار کلروفیل برگ دارد.

از آنجایی که کلروفیل در تعیین شاخص نرمال تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، از همبستگی آن با غلظت کلروفیل SPAD می‌توان وضعیت سلامت و رشد گیاه را بررسی نمود. رابطه‌ی مربوط به شاخص NDVI (میزان سبزینگی و سلامت گیاه) نیز در ردیف ۵ جدول (۱) داده شده است [۴].

جدول (۱) : معادله شاخص‌های طیفی مورد استفاده در مطالعات

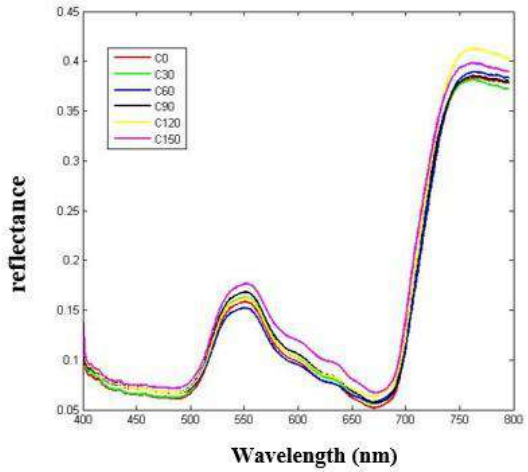
ردیف	شاخص	معادله
۱	Chl.a	Chl.a (µg/ml) = (12/25*OD_{663})- (2/79*OD_{645})
۲	Chl.b	Chl.b (µg/ml) = (21/5*OD_{645})- (5/1* OD_{663})
۳	Chl_{total}	$chl_t = Chl.a + Chl.b$
۴	CI	$CI = \frac{R_{760}}{R_{700}} - 1$
۵	NDVI	$NDVI = \frac{R_{798} - R_{679}}{R_{798} + R_{679}}$

در رابطه‌ی اول و دوم OD_{663} و OD_{645} به ترتیب میزان جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر می‌باشد.

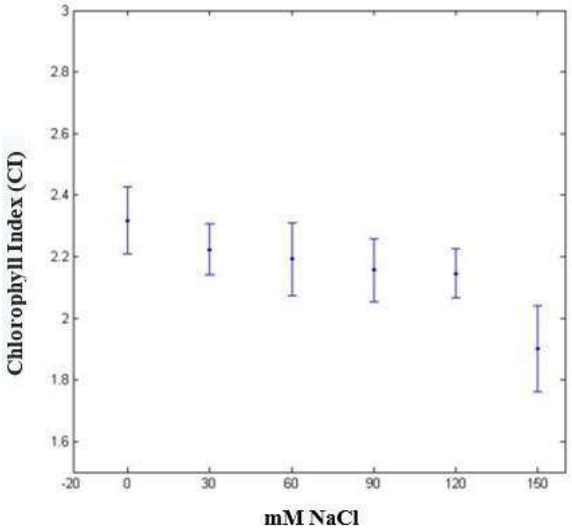
شرح آزمایش و نتایج تجربی

برای انجام آزمایش از گیاه ذرت استفاده شده است. پس از رشد گیاه، تنش شوری در ۵ غلظت مختلف طی ۴ تکرار به مجموع ۲۰ گلدان همراه با ۴ نمونه‌ی شاهد اعمال شده است. هر گلدان خود دارای ۳ بذر می‌باشد که مجموعاً ۷۲ داده برای هر شاخص در اختیار است. پس از گذشت چند روز و اثرگذاری تنش اعمال شده داده‌برداری با سه روش انجام شده و نتایج به شرح زیر است. این مطالعه با سه دستگاه دوربین فراطیفی، اسپکتروفتومتر و SPAD انجام شده و نتایج به‌دست آمده با هم مقایسه شده‌اند. دوربین فراطیفی مورد استفاده در این آزمایش دوربین فراطیفی اسکن خطی ساخت شرکت پرتو افزار صنعت است و از لامپ هالوژنی به عنوان منبع نور استفاده می‌کند. فرایند کاری دوربین فراطیفی به نحوی است که در هر لحظه از یک خط برگ طیف می‌گیرد و با کنار هم قرار دادن آن‌ها یک تصویر کامل در طول موج‌های مختلف از آن به دست می‌دهد. با توجه به ضرایب بازتاب و رابطه مذکور در جدول (۱) شاخص کلروفیل به‌دست می‌آید. طیف بازتابی برگ گیاه ذرت برای غلظت‌های مختلف سطح شوری در شکل (۳) رسم شده است که تاثیر میزان شوری بر طیف گیاه مشخص است.

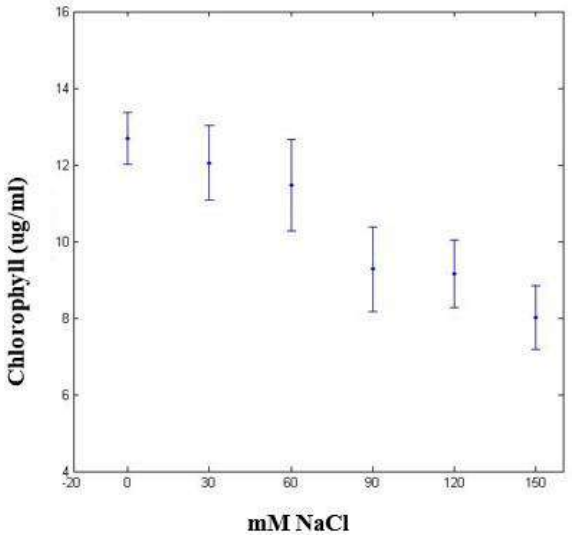
در استخراج کلروفیل توسط اسپکتروفتومتر، مقدار مشخصی از هر برگ نمونه کوبیده می‌شود و سپس در استون کاملا حل می‌شود و محلول حاصل به عنوان نمونه در دستگاه قرار داده می‌شود. انتظار می‌رود که تنش شوری موجب خشک شدن گیاه شده و در نتیجه کاهش و از دست رفتن کلروفیل حاصل شود. طبق نمودارهای رسم شده از نتایج به دست آمده توسط دو دستگاه دوربین فراطیفی (شکل ۴) و اسپکتروفتومتر (شکل ۵) نیز همان نتیجه‌ی پیش‌بینی شده یافت می‌شود. بنابراین به طور کلی می‌توان بیان کرد محتوای کلروفیل تحت تنش شوری کاهش می‌یابد.



شکل ۳: طیف بازتابی برگ گیاه ذرت تحت تنش شوری با غلظت‌های محلول آب نمک ۳۰ تا ۱۵۰ میلی مولار با استفاده از دوربین فراطیفی

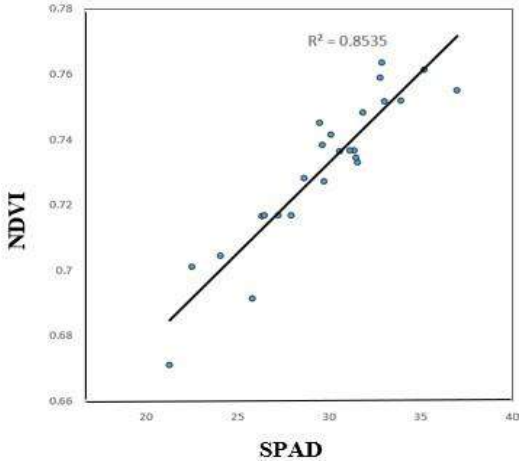


شکل ۴: نمودار شاخص کلروفیل به دست آمده توسط دوربین فراطیفی برحسب سطوح مختلف شوری



شکل ۵: نمودار محتوای کلروفیل کل استخراج شده توسط دستگاه اسپکتروفتومتر برحسب سطوح مختلف شوری

برای بررسی همبستگی نتایج حاصل از دوربین فراطیفی و SPAD برای شاخص NDVI، غلظت کلروفیل نقاط مختلف برگ ابتدا توسط SPAD اندازه‌گیری شده و سپس عدد NDVI توسط رابطه داده شده در جدول (۱) در همان نقاط محاسبه شده است. منحنی همبستگی NDVI و SPAD در شکل (۶) رسم شده است. این منحنی نشان می‌دهد که بین اعداد حاصل از دوربین فراطیفی برای شاخص سبزینگی و اعداد شاخص کلروفیل حاصل از کلروفیل‌سنج همبستگی خوبی در حد ۸۵/۳۵ درصد وجود دارد.



شکل ۶: نمودار همبستگی SPAD-NDVI

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده، دوربین فراطیفی به دلیل غیر تخریبی بودن می‌تواند جایگزین مناسبی برای محاسبه برخی از شاخص‌های گیاهی از جمله محتوای کلروفیل باشد. همچنین نمایان کردن تاثیر تنش شوری در گیاه ذرت توانایی این روش را در بررسی تنش‌های اعمال شده به گیاهان نشان می‌دهد. همچنین همبستگی بسیار خوب بین منحنی NDVI رسم شده از داده‌های دوربین فراطیفی و اعداد بدست آمده از SPAD نشان می‌دهد از دوربین فراطیفی می‌توان برای محاسبه NDVI استفاده کرد.

مرجع‌ها

S. Seager, E. Turner, J. Schafer, E. Ford, “Vegetation's red edge: a possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants”, Astrobiology, 3: 372-390, 2005.

L. Gao, RT . Smith, “Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy–a review of data acquisition”, Journal of biophotonics,8(6):441-56, 2015 Jun.

W. You , Z. Wang , F. Lu ,Y. Zhao , S. Lu , “Spectral indices to assess the carotenoid/chlorophyll ratio from adaxial and abaxial leaf reflectance”, Spectroscopy Letters,50(7):387-93, 2017 Aug 9.

X. Shen, L. Cao, “Tree-species classification in subtropical forests using airborne hyperspectral and LiDAR data”, Remote Sensing, 9(11):1180, 2017 Nov.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

اثر شعاع ذرات سلیکون بر پراکندگی رامان ارتقایافته سطحی و فلورسانس ارتقایافته

حسین بوغیری [۱]، مریم علیان‌نژادی [۱*]، لیلا نادری [۱]، مهدی سویزی [۱]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

hosein_bogheyri@semnan.ac.ir, m_aliannezhadi@semnan.ac.ir, l_naderi@semnan.ac.ir, msovizi@semnan.ac.ir

چکیده – در این مقاله ذرات کروی سیلیکون به عنوان یکی از عناصر فراوان در جهان با فناوری نسبتا ساده با قابلیت کاربرد در طیف‌سنجی رامان ارتقا یافته و نیز فلورسانس ارتقایافته مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، نمودار طول موج مد تشدید بر حسب شعاع ذرات کروی سیلیکون (۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر) ارائه می‌شود و نقشه‌ای برای به کارگیری این ذرات در هر طول موج تهییج لیزری خاص ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کاهش ابعاد نانوذرات منجر به انتقال به آبی طول موج تشدید از ناحیه فروسرخ تا فرابنفش می‌شود. علاوه براین، بیشینه تقویت میدان الکتریکی با کاهش ابعاد نانوذرات از ۲۵۰ تا ۵۰ نانومتر تقریبا بدون تغییر باقی می‌ماند و ضریب تقویت رامان با استفاده از این ذرات سیلیکونی تقریبا ۶۲۵ برابر طیف‌سنجی رامان متداول می‌باشد.

کلید واژه- پراکندگی رامان ارتقا یافته سطحی (SERS)، پاسخ‌های الکتریکی و مغناطیسی، سیلیکون، فلورسانس ارتقایافته.

The effect of silicon particle radius on surface-enhanced Raman scattering and enhanced fluorescence

Hossein Bogheiri[1], Maryam Aliannezhadi [2*], Leyla Naderi[3], Mahdi Sovizi[4]

[1]Faculty of Physics, Semnan University, PO Box: 35195-363, Semnan, Iran.

hosein_bogheyri@semnan.ac.ir, m_aliannezhadi@semnan.ac.ir, l_naderi@semnan.ac.ir, msovizi@semnan.ac.ir

Abstract- In the paper, spherical silicon particles as one of the abundant elements in the world with a relatively simple synthesis method, and the ability to be used in surface enhancement Raman spectroscopy and enhanced fluorescence are investigated. Also, the map of resonance wavelength dependence on the radius of spherical silicon particles (50 to 250 nm) is provided to determine the appropriate radius of Si spherical particles for each desirable laser excitation wavelength. The results declare that the resonance wavelength of Si particle experiences a blue shift from the infrared to the ultraviolet region with the reduction of the nanoparticle radius. Furthermore, the maximum enhancement of the electric field remains almost unchanged by reducing the nanoparticle's radius from 250 to 50 nm, and the obtained Raman enhancement factor using these silicon particles is about 625 times of conventional Raman spectroscopy.

Keywords: Enhanced fluorescence, Magnetic and electric resonances, Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS), Silicon.

مقدمه

امروزه، شناسایی مواد، حسگری و سنجش مقادیر اندک ماده هدف با استفاده از پراکندگی رامان ارتقا یافته سطحی SERS به دلیل افزایش شدت میدان الکتریکی در مجاورت نانوساختارها و نیز قرار گرفتن مولکولِ هدف در مجاورت نانوساختارها و برهمکنش میدان تقویت‌شده با مولکول‌های هدف امکان‌پذیر شده است. اگرچه که نانوذرات فلزی با توجه به تقویت شدید میدان‌های نوری در نقاط داغ به دلیل پلاسمون مورد توجه قرار دارند [۱]، سیلیکون نیز به دلیل ضریب شکست بالا و پایداری حرارتی یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای پراکندگی رامان (SERS) است [۲]. همچنین، نانوکره‌های سیلیکون دارای قدرت پراکنندگی بالا و مخصوصا جهت‌دار در ناحیه مرئی می‌باشند که باعث برتری آنها بر فلزات در کاربردهایی مانند آنتن‌های جهت‌دار ونانوفوتونیک می‌شود [۳].

سیلیکون یکی از عناصر فراوان در جهان است و به عنوان هشتمین عنصر رایج در جهان و دومین عنصر در پوسته زمین پس از اکسیژن شناخته شده است و بنابراین، ماده‌ای کم هزینه و در دسترس برای انواع مختلف کاربردها می‌باشد [۴]. نانوکره‌ها و نانومیله‌های سیلیکونی با اندازه‌های ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر به عنوان اجزای سازنده اصلی متامتریال‌هایی که در فرکانس‌های اپتیکی عمل می‌کنند، در نظر گرفته می‌شوند [۵]. همچنین، ذرات سیلیکون از جمله مواد معروفی هستند که تقویت الکترومغناطیسی موضعی قوی‌ای را از خود نشان می‌دهند و می‌تواند منجر به برهمکنش قوی‌تر میدان تهییج‌کننده با مولکول هدف و در نتیجه تقویت سیگنال‌های پراکندگی رامان مولکول شود و سیگنال حساس و تقویت شده‌ای برای تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی رامان فراهم می‌کند [۶, ۷]. نانوذرات سیلیکون به طور کلی پایدار و مقاوم هستند و همین امر قابلیت کابرد طولانی مدت به همراه تجزیه و تحلیل‌های قابل اعتماد را فراهم می‌کند. علاوه‌براین، سیلیکون به عنوان ماده‌ای زیست-سازگار و مناسب برای تحقیقات بیولوژی شناخته شده است و حتی برای تجزیه و تحلیل مولکول‌ها، سلول‌ها و بافت‌های بیولوژیکی در داخل بدن با توجه به فرایند SERS و فلورسانس ارتقایافته کاربرد دارد [۸]. همچنین، طول موج تشدید نانوذرات سیلیکون می‌تواند در نواحی مختلف طیفی از IR نزدیک تا نواحی مرئی قرار گیرد و بنابراین، منابع کوک‌پذیری برای طول‌موج‌های مختلف لیزرهای تهییج-کننده‌ی رامان می‌توانند فراهم کنند [۹]. همچنین، روش-های ایجاد این ذرات و نانوذرات سیلیکونی با روش‌های کلوئیدی یا سایر روش‌ها در دسترس می‌باشد که باعث مطلوبیت بیشتر این نانوذرات شده است.

پاسخ الکترومغناطیسی نانوذرات سیلیکون را می‌توان با انتخاب مناسب ابعاد و شکل آنها طوری تنظیم کرد تا میدان الکتریکی در طول‌موج خاص در اطراف نانوذره تقویت شود. بنابراین، در این مقاله تاثیر ابعاد نانوذرات سیلیکون بر طول-موج‌های تشدید و نیز تقویت میدان در اطراف این نانوذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه این تحقیق برای کاربردهای حسگری مبتنی بر SERS و نیز فلورسانس ارتقا یافته بسیار کاربردی می‌باشد.

مبانی نظری

یکی از حوزه‌های مهم و کاربردی در اپتیک و لیزر برهمکنش نور با ماده به ویژه برهمکنش نور با نانوساختارها و نانو ذرات است. از جمله این برهمکنش‌ها می‌توان به ایجاد امواج پلاسمون سطحی، تشدید پلاسمون‌های سطحی موضعی، تشدید مدهای مختلط فونون پلاریتون‌های سطحی موضعی و تشدید فونوهای سطحی اشاره کرد. این نوسانات به کمک امواج الکترومغناطیسی تحریک می‌شوند و طول موج تحریک این نوسانات به شدت وابسته به جنس، ابعاد و شکل نانوذره و همچنین وابسته به جنس محیط اطراف و عوامل محیطی مانند دما و فشار است. با فرض صفر بودن چگالی بار و جریان آزاد، امواج الکترومغناطیسی تحریک-کننده‌ی این نوسانات در معادله موج همگن صدق می‌کنند.

در صورتی که موج تابشی تکفام باشد، معادله موج به معادله هلمهولتز زیر تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2\psi_m(\vec{r})+k_m^2\psi_m(\vec{r})=0$$
$$\nabla^2\psi_b(\vec{r})+k_b^2\psi_b(\vec{r})=0 \qquad (۱)$$

که شاخص m توصیف کننده محیط داخل ذره و شاخص b توصیف کننده محیط زمینه (محیط پیرامون ذره) و k_m و k_b اندازه بردارهای موج در دو محیط هستند.

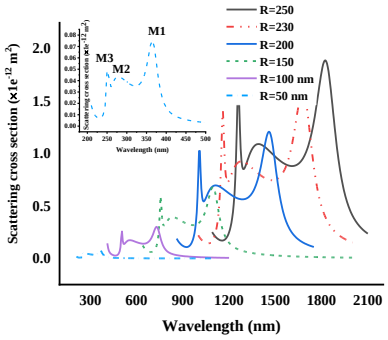
با حل این معادلات به همراه شرط مرزی پیوستگی مولفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی روی فصل مشترک ذره و محیط پیرامون آن می‌توان میدان پراکنده شده دور را محاسبه نمود. با استفاده از آن می‌توان سطح مقطع پراکندگی را از رابطه زیر به دست آورد [۴]:

$$\sigma_s(\lambda)=\frac{w_s(\lambda)}{I_{inc}} \qquad (۲)$$

که در این رابطه w_s توان پراکنده شده و I_{inc} شدت تابش فرودی است. با حل معادلات (۱) و استفاده از رابطه (۲) با روش المان محدود (FEM) می‌توان سطح مقطع پراکندگی را محاسبه نمود که به طول موج نور فرودی بستگی دارد و مقدار آن در طول موج تشدید به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

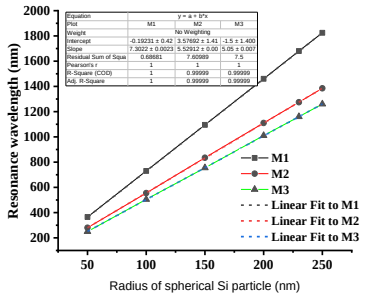
نتایج و دستاوردها

در شکل ۱ نمودار طیف سطح مقطع پراکندگی نانوذرات سیلیکون با ابعاد مختلف نشان داده شده است. سه قله متمایزِ مربوط به سطح مقطع پراکندگی هر ذره سیلیکون با شعاع مشخص با M1، M2 و M3 برچسب زده شده است، که مربوط به مدهای مرتبه‌های مختلف پراکندگی می‌باشند. ملاحظه می‌شود که ارتفاع مد M1 برای هر شعاع دلخواه سیلیکون کروی از سایر مدها بیشتر است.



شکل ۱. نمودار سطح مقطع پراکندگی، σ_s ، بر حسب طول موج برای ذرات کروی سیلیکون با شعاع‌های مختلف.

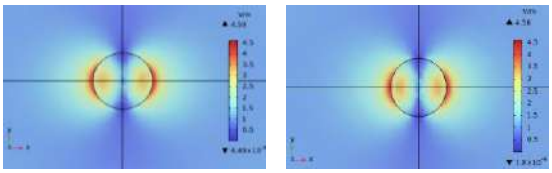
علاوه‌براین، نتایج نشان می‌دهد که طول موج تشدید ذرات سیلیکون با کاهش شعاع این نانوذرات کاهش می‌یابد و انتقال به قرمز پدیدار می‌شود. این طول موج‌های تشدید به وضوح با کاهش ابعاد ذره از ناحیه IR به ناحیه مرئی و فرابنفش منتقل می‌شوند که نشانگر قابلیت تنظیم طول موج تشدید ذرات سیلیکون با تغییر ابعاد آن به منظور دسترسی به طول موج مورد نظر می‌باشد. برای بررسی بیشتر، نمودار طول موج تشدید ذرات سیلیکون برای مدهای M1، M2 و M3 بر حسب شعاع این ذرات در شکل ۲ نشان داده شده است که با استفاده از آن می‌توان ابعاد مورد نظر برای کاربرد خاص را به دست آورد. همانطور که مشاهده می‌کنید، تغییرات طول موج تشدید با ابعاد ذرات سیلیکون به خوبی با خط راست برازش شده اما شیب این خطوط برای مدهای مختلف متفاوت است.



شکل ۲. نمودار طول موج LSPR مدهای M1، M2 و M3 بر حسب شعاع ذرات سیلیکون. نمودارهای خط‌چین منحنی خطوط راست برازش شده به نتایج برای هر مد می‌باشد.

توزیع میدان الکتریکی مد M1 با بیشترین سطح مقطع پراکندگی در ذره‌های سیلیکونی با شعاع‌های ۵۰ و ۲۵۰

نانومتر (کمترین و بیشترین شعاع در مقاله) در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این مد مربوط به تشدید دوقطبی الکتریکی می‌باشد و بیشینه تقویت میدان الکتریکی در این دو شعاع تقریبا ثابت می‌باشد و کاهش ابعاد ذرات تقریبا تاثیری بر بیشینه میدان الکتریکی در اطراف نانوذره ندارد و در تمامی این موارد افزایش تقویت شدت پراکندگی رامان $(E/E_0)^4 \simeq 625$ برابر نسبت به پراکندگی رامان متداول انتظار می‌رود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که این نتیجه برای شعاع‌های ۱۰۰،۱۵۰ و ۲۰۰ نیز صادق است.



شکل۳. توزیع میدان الکتریکی مد تشدید M1 ذره سیلیکون با شعاع‌های الف) ۵۰، ب) ۲۵۰.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار نوری ذرات کروی سیلیکون شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، تاثیر ابعاد این ذرات کروی بر طول موج تشدید آنها بررسی و هر مد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه، به‌کارگیری این ذرات زیست‌سازگار برای کاربردهای طیف‌سنجی رامان ارتقا یافته سطحی و نیز فلورسانس ارتقایافته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که طول موج‌های تشدید ذرات کروی سیلیکون با کاهش شعاع ذرات انتقال به آبی یافته و از ناحیه IR تا فرابنفش جابجا می‌شود. همچنین، توزیع میدان الکتریکی در مد تشدیدی M1 و نیز تاثیر ابعاد ذرات سیلیکون بر تقویت میدان الکتریکی و در نتیجه تقویت SERS و فلورسانس ارتقایافته نیز در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقویت میدان الکتریکی در ناحیه مورد بررسی (شعاع ذرات سیلیکون ۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر) تقریبا مستقل از ابعاد ذره می‌باشد و شعاع ذرات کروی سیلیکون باید با توجه به طول موج تهییج SERS یا فلورسانس برای ماده هدف تعیین شوند.

مرجع‌ها

[1] E. Demishkevich *et al.*, "Synthesis Methods and Optical Sensing Applications of Plasmonic Metal Nanoparticles Made from Rhodium, Platinum, Gold, or Silver," *Materials*, vol. 16, no. 9, p. 3342, 2023.

[2] N. Bontempi *et al.*, "Non-plasmonic SERS with silicon: is it really safe? new insights into the optothermal properties of core/shell microbeads," *The journal of physical chemistry letters*, vol. 9, no. 9, pp. 2127-2132, 2018.

[3] J. Yan *et al.*, "Magnetically induced forward scattering at visible wavelengths in silicon nanosphere oligomers," *Nature communications*, vol. 6, no. 1, p. 7042, 2015.

[4] M. Sovizi and M. Aliannezhadi, "Localized surface plasmon resonance (LSPR) of coupled metal nanospheres in longitudinal, transverse and three-dimensional coupling configurations," *Optik*, vol. 252, p. 168518, 2022.

[5] C. Zhang *et al.*, "Lighting up silicon nanoparticles with Mie resonances," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, p. 2964, 2018.

[6] X. Lu, H. Wang, and Y. He, "Controllable Synthesis of Silicon-Based Nanohybrids for Reliable Surface-Enhanced Raman Scattering Sensing," *Chinese Journal of Chemistry*, vol. 40, no. 6, pp. 734-745, 2022.

[7] M. Ge *et al.*, "Recent advances in silicon-based electrodes: from fundamental research toward practical applications," *Advanced Materials*, vol. 33, no. 16, p. 2004577, 2021.

[8] H. Lai, F. Xu, and L. Wang, "A review of the preparation and application of magnetic nanoparticles for surface-enhanced Raman scattering," *Journal of materials science*, vol. 53, no. 12, pp. 8677-8698, 2018.

[9] A. García-Etxarri *et al.*, "Strong magnetic response of submicron silicon particles in the infrared," *Optics express*, vol. 19, no. 6, pp. 4815-4826, 2011.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

تولید جفت فوتون در فیبر نوری با استفاده از تطبیق فاز بین مدی

فاطمه محمدی[1]، رحمان نوروزی[2]

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

[1]Email: f.mohamadi@iasbs.ac.ir
[2]Email: rahman.nouroozi@iasbs.ac.ir

چکیده - حالات در هم تنیده از برجسته ترین ویژگی های مکانیک کوانتومی است که اساس فناوری های اطلاعات کوانتومی است. برای ایجاد حالات در هم تنیده نیاز به تولید جفت فوتون داریم. از آنجایی که پراکندگی های رامان و بریلون تاثیرات مخربی بر جمع آوری و آشکارسازی پرتوهای سیگنال و آیدلر دارند اگر بتوان پرتوهای سیگنال و آیدلر را در خارج از محدوده‌ی وقوع این نوع پراکندگی ها تولید کرد، این پراکندگی ها تاثیری بر روی پرتوهای خروجی موردنظر نخواهند داشت. در این مقاله این موضوع با استفاده از تطبیق فاز بین مدهای پایه‌ی پمپ و مدهای مراتب بالاتر در سیگنال و آیدلر، انجام شده است.

کلید واژه- اختلاط چهارموج، جفت فوتون ، غیرخطیت، فیبر نوری .

Photon pair generation in optical fiber using inter mode phase matching

Fatemeh Mohamadi , Rahman Nouroozi

Faculty of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract- Entangled states are one of the most prominent features of quantum mechanics, which is the basis of quantum information technologies. To create entangled states, we need to generate photon pairs. Since Raman and Brillon scatterings have destructive effects on the collection and detection of signal and idler beams, if the signal and idler beams can be produced outside the range of occurrence of these types of scattering, these scatterings will not have an effect on the intended output beams. In this article, this is done by using phase matching between the pump base modes and the higher order modes in the signal and idler.

Keywords: Four-wave mixing, nonlinearity, optical fiber, pair of photon.

مقدمه

تولید جفت فوتون ، اساس بسیاری از فناوری‌های نوری کوانتومی است. منابع تک فوتونی که در آن تشخیص یک فوتون خبر از رسیدن قریب الوقوع فوتون دوم می دهد، می‌تواند برای پردازش اطلاعات کوانتومی استفاده می‌شود. تبدیل پارامتری پایین و اختلاط چهار موجی دو فرآیند اصلی هستند که برای تولید جفت فوتون استفاده می‌شود[۵و۴].

در سالهای اخیر پدیده های غیر خطی در فیبرهای نوری چند حالته به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است. با اینکه به علت متقارن بودن فیبر، پایین‌ترین مرتبه غیرخطی ، از حساسیت مرتبه سوم $\chi^{(3)}$ ، استفاده می کند اما با استفاده از لیزرهای پرتوان و توجه به این مطلب که سطح مقطع فیبر از مرتبه میکرومتر است؛ اثرات غیرخطی قابل ملاحظه خواهد بود و می‌توان از این پدیده برای تولید جفت فوتون بهره برد.

اما اثرات پراکندگی رامان و بریلون نیز، در این شرایط شدت بیشتری خواهند داشت و آشکارسازی پرتوهای سیگنال و آیدلر را مشکل می سازند. اما این پراکندگی‌ها به علت شدت بالای پمپ در محدوده‌ی طول موج پمپ رخ می دهند. پس اگر طول موج سیگنال و آیدلر ، با اختلاف قابل توجهی از طول موج پمپ تولید شود؛ می‌توان این پرتوها را بدون نگرانی از اختلاط با پرتوهای حاصل از پراکندگی‌های رامان و بریلون، آشکارسازی نمود.

تولید جفت فوتون

منشا فرآیندهای پارامتری از جمله فرآیند اختلاط چهار موجی در پاسخ غیرخطی الکترون های یک ماده به یک میدان نوری نهفته است. در طول فرآیند اختلاط چهار موجی ، دو فوتون پمپ از بین می‌روند و دو فوتون در سیگنال و فرکانسهای آیدلر به طور همزمان ایجاد می‌شوند در این فرایند انرژی و تکانه پایسته می‌ماند.

در ناحیه شفاف فیبرهای نوری، اثرات غیرخطی پایین‌ترین مرتبه، از حساسیت مرتبه سوم $\chi^{(3)}$ استفاده می‌شود که مسئول پدیده هایی مانند تولید هارمونیک سوم و اختلاط چهار موجی (FWM)است. رابطه (۱) رابطه‌ی قطبش غیرخطی با میدان الکتریکی را نشان می‌دهد:

$$\boldsymbol{P}_{NL} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} \boldsymbol{EEE} \qquad (۱)$$

که در آن E میدان الکتریکی، P_{NL} قطبش غیرخطی القایی و ε_0 گذردهی خلاء است.

تفاوت اساسی بین فرآیندهای پارامتری(مانند اختلاط چهار موجی) و فرآیندهای غیرپارامتری تحریک شده (مانند پراکندگی رامان خود به خودSRS و بریلوین تحریک شده SBS) این است که به دلیل حضور فعال محیط غیر خطی، شرط تطابق فاز به صورت خودبه خود برای SRS و SBS ارضا می شود اما برقراری این شرط در فرآیندهای پارامتری نیاز به انتخاب خاصی از فرکانس ها وضرایب شکست است تا انرژی وتکانه پایسته بمانند. به عبارت دیگر، اختلاط چهار موجی زمانی اتفاق می‌افتد که فوتون‌های یک یا چند موج نابود شوند و فوتون های جدید در فرکانس های مختلف به گونه ای ایجاد می شودکه انرژی و تکانه در طول اندرکنش پارامتری حفظ شوند[۳].

در فیبر نوری چند حالته، هر فوتونی که در فرایند FWM دخیل است می تواند به حالت فضایی متفاوت فیبر نوری تعلق داشته باشد که با زیرنویس های p، p، s و i مشخص می شود.

در یک فرایند خود به خودی FWM ، دو فوتون پمپ E_p به طور مشترک نابود می شوند و یک فوتون سیگنال E_s و یک فوتون آیدلر E_i ایجاد می‌شود. فوتون های سیگنال وآیدلر تولید شده را می‌توان به صورت هم قطبی با فوتون‌های پمپ یا متقاطع با آن، تولید کرد. ما سعی خواهیم کرد که با استفاده از تطابق فاز بین حالتهای هدایت شده در فیبراین پایستگی را ایجاد نماییم. با توجه به پایستگی انرژی، باید بین فرکانس های پمپ ω_p و فرکانس سیگنال ω_s و فرکانس آیدلر ω_i رابطه (۲) برقرار باشد:

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i \qquad (۲)$$

اگر در پیکربندی پمپ، فقط حالت تک فضایی را در نظر گرفته شود چون فاز بین مدی که با پیکربندی تک حالت فضایی مطابقت دارد ، جدایی طیفی به مراتب بزرگتری را بین فوتون های پمپ ، سیگنال و آیدلردر پی دارد.

تطبیق فاز بین مدی بر تفاوت بین خواص پراکندگی حالت های مختلف در فیبر نوری چند مده متکی است ، که در آن برخلاف فیبر تک مده ، تطبیق فاز را می توان بدون هر گونه کمک از تغییر فاز غیر خطی به دست آورد. با فرض پیکربندی پمپ حالت تک فضایی ، عدم تطابق فاز κ را می توان به صورت نوشت[۱]:

$$\kappa = 2\beta_p(\omega_p) - \beta_s(\omega_s) - \beta_i(\omega_i) \qquad (۳)$$

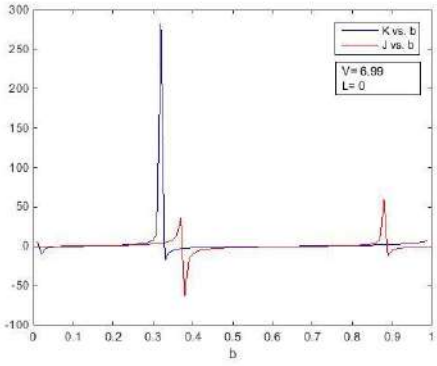
ω_i ها فرکانس پمپ، سیگنال و آیدلر و β ثابت انتشار مربوطه‌ی آن است.

فیبر نوری بستر تولید جفت فوتون

SMF-28+ یک فیبر نوری درجه تجاری است. معمولاً برای ارتباطات فیبر نوری تک حالته در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر استفاده می شود. این فیبرچند حالت فضایی را در محدوده‌ی طول موج مرئی پشتیبانی می کند ، بنابراین فیبرنوری چند حالته است.V کمیتی در فیبر نوری است که بیانگر تعداد مدی است که فیبر توانایی انتشار آن را دارد و به اختلاف ضریب شکست هسته و پوسته فیبر و شعاع آن و نیز طول موجی مورد استفاده بستگی دارد.

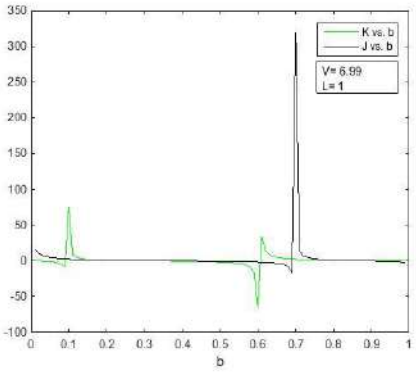
کمیت بدون بعد b برای هر فیبر تعریف می شود که به ثابت انتشار هر مد و ضریب شکست هسته و پوسته فیبر بستگی دارد. اگر معادله انتشار میدان در فیبر را در مختصات استوانه‌ای نوشته وشرایط مرزی را اعمال نماییم؛ به روابط (۱) و (۲) می‌رسیم که تعداد نقاط برخورد دو نمودار، تعداد مد عبوری از فیبر را در طول موج مورد نظر، نشان می‌دهد[۲]. در معادلات ۱ و ۲، J و K به ترتیب معادلات بسل نوع ۱ و ۲ هستند. شکل های ۱ و ۲ برای فیبر SMF-28+ رسم شده است.

$$V(1-b)^{\frac{1}{2}}\frac{J_1\left[V(1-b)^{\frac{1}{2}}\right]}{J_0\left[V(1-b)^{\frac{1}{2}}\right]} = -Vb^{\frac{1}{2}}\frac{K_1\left[Vb^{\frac{1}{2}}\right]}{K_0\left[Vb^{\frac{1}{2}}\right]}, l=0 \qquad (۴)$$



شکل ۱: تغییرات پارامترV بر حسب پارامتر b برای SMF-28 در l=0. نمودار قرمزرنگ تغییرات V متناسب با تابع بسل نوع ۱ و نمودار آبی رنگ تغییرات V متناسب با تابع بسل نوع ۲ را نشان می‌دهد.

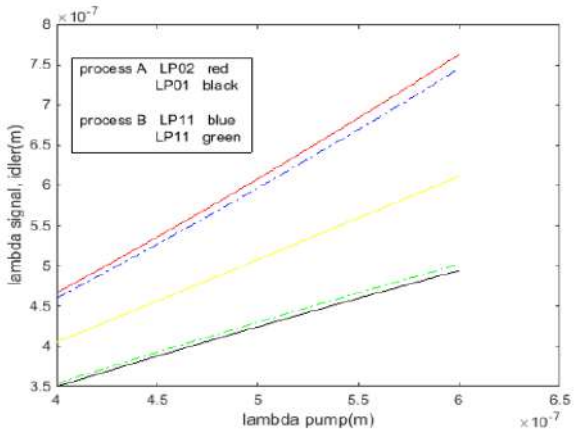
$$V(1-b)^{1/2}\frac{J_{l-1}\left[V(1-b)^{\frac{1}{2}}\right]}{J_l\left[V(1-b)^{\frac{1}{2}}\right]} = -Vb^{\frac{1}{2}}\frac{K_{l-1}\left[Vb^{\frac{1}{2}}\right]}{K_l\left[Vb^{\frac{1}{2}}\right]}, l \geq 1 \qquad (۵)$$



شکل ۲: تغییرات پارامترV بر حسب پارامتر b برای SMF-28 در l=1. نمودار مشکی رنگ تغییرات V متناسب با تابع بسل نوع ۱ و نمودار سبز رنگ تغییرات V متناسب با تابع بسل نوع ۲ را نشان می‌دهد.

اگر قطبش فوتون‌های پمپ، LP01 باشد، دو فرآیند A و B با بازده بالاتری نسبت به سایر حالت ها امکان تولید دارند . در طی فرآیند A، فوتون سیگنال در حالت LP02 و فوتون آیدلر درحالت LP01 تولید می‌شوند و در طی فرآیند B فوتون سیگنال در حالت LP11 و فوتون آیدلر درحالت LP11 تولید می‌شوند . LP ها، قطبش های خطی مدهای میدان در فیبر نوری هستند. در شکل ۳، تغییرات مربوط به طول موج سیگنال و آیدلر بر حسب طول موج پمپ در طی این دو فرایند در شرایط

تطبیق فاز رسم شده است. فرایندهای مورد بررسی، از محدوده مربوط به طول موج‌های پراکندگی های رامان و بریلون که در اطراف طول موج‌های پمپ ایجاد می شوند، فاصله قابل ملاحظه ای دارند و سیگنال های حاصل را می‌توان بدون نگرانی از اختلاط با پرتوهای حاصل از این دو پراکندگی، جداسازی کرد.



شکل ۳: منحنی تطبیق فاز به عنوان تابعی از طول موج پمپ در SMF-28.خط مرکزی زرد رنگ مربوط به پمپ است

نتیجه‌گیری

در این مقاله تولید جفت فوتون سیگنال و آیدلر، در طول موج های با اختلاف بالا نسبت به طول موج پمپ برای جلوگیری از اختلاط با پرتوهای ناشی از پراکندگی های رامان و بریلون، با استفاده از روش تطبیق فاز بین مدی در فیبر نوری تک مده به روش اختلاط چهار موجی بررسی شده است.

مرجع‌ها

H. Pourbeyram, and A. Mafi, Phys. Rev 94, 023815 (2016).

B. Saleh and M. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed.(Wiley, New York, 2007).

G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 5th ed. (Academic Press, New York, 2001).

P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn, Rev. Mod. Phys. 79, 135 (2007).

Gruner-Nielsen, and D. Jakobsen, Appl. Phys. Lett. 101, 161106(2012).

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

مطالعه خواص اپتیک غیرخطی نیمرسانای اکسیدسیلیکون بر روی لایه شیشه پوشش داده شده با اکسید گرافن

حمید دارابی، یاسر رجبی و مهدی عادلی فرد

دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان، دامغان

در این مقاله با استفاده از روش اسپری پایرولیزیز نیمرسانای ترکیبی اکسید سیلسیوم- اکسید گرافن لایه نشانی گردید. سپس با استفاده از آنالیزهای پراش پرتوی ایکس(XRD)، طیف سنجی(Uv-Vis) به بررسی خواص نانوساختاری و اپتیکی نیمرسانای ترکیبی پرداخته شد و مشاهده شد که شدت قله های GO با لایه نشانی SiO_2 که خاصیت آمورف دارد کاهش یافته است . همچنین مقدار انرژی گاف نواری افزایش پهنای گاف نواری GO را پس از ترکیبSiO_2 نشان داد. همچنین نتایج به خوبی نشان می دهد که نانوذرات GO- SiO_2 دارای خاصیت غیرخطی خوبی بوده و در نتیجه کاندیدای خوبی برای استفاده در قطعات اپتوالکترونیک است.

کلید واژه- اکسید سیلیسیوم، اکسیدگرافن، اسپری پایرولیزیز، خواص نانو ساختاری، خواص اپتیک غیر خطی.

Study of nonlinear optical properties of silicon oxide semiconductor on glass layer coated with graphene oxide

Hamid Darabi, Yasser Rajabi, Mahdi Adelifard
Department of Physics, University of Damghan, Damghan

In this article, the compound semiconductor silicon oxide-graphene oxide was coated using spray pyrolysis method. Then, using X-ray diffraction (XRD), spectrometry (Uv-Vis), the nanostructural and optical properties of the composite semiconductor were investigated and it was observed that the intensity of GO peaks with SiO_2 layer which has an amorphous property has decreased. Also, the band gap energy value showed an increase in the width of the band gap of GO after the incorporation of SiO_2. Also, the results clearly show that the Go-SiO2 sample has good nonlinear properties and is therefore a good candidate for use in optoelectronic components.

Keywords: Silicon oxide, graphene oxide, pyrolysis spray, nanostructural properties, Nonlinear optical properties.

مقدمه

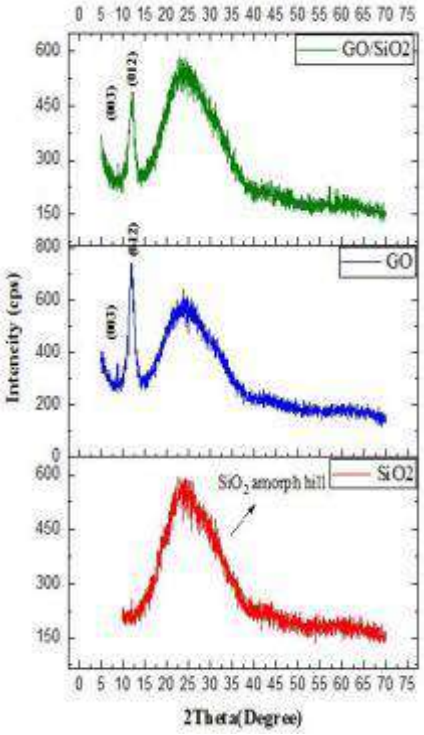
GO برای یک مدت‌زمان بسیار طولانی‌تر از گرافن موردمطالعه قرارگرفته شده است. GO به‌عنوان ماده متشکله برای تولید گرافن (کاهش GO) به روش شیمیایی و حرارتی مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در سال‌های اخیر، بسیاری از مشتقات، مانند کائوچو و مواد مرکب GO بر اساس، GO مبتنی بر پوشش و لایه‌های نازک، و همچنین نانوذرات GO، به‌عنوان مواد کاربردی برای کاربردهای مختلف پدید آمده است.[۱].rGO / GO به‌عنوان یک الکترود شفاف برای دیودهای (LEDs) و دستگاه‌های سلول خورشیدی استفاده می‌شود. الکترود شفاف rGO / GO همچنین به‌عنوان یک‌لایه انتقال حفره در پلیمرهای سلول خورشیدی و LED ها استفاده می‌شود[۲]. درزمینه سلول‌های خورشیدی کاهش افت بازتاب در سلول‌های فتوولتائیک، یک گام عمده برای دستیابی به بازده تبدیل بالا است. بنابراین پوشش ضد انکسار یکی از اجزای ضروری در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با کارایی بالا است[۳]. اکسید سیلیکون با فرمول شیمیایی SiO_2 است، که بیشتر در طبیعت به عنوان کوارتز و موجودات زنده مختلف یافت می شود سیلیس در بسیاری از نقاط جهان جزء اصلی شن و ماسه است.[۴]

با پیدایش لیزر تحقیقات گستردهای در زمینه‌ی مشخصه-یابی اپتیکی نانو ذرات انجام شد[۵]. در این تحقیقات، پارامترهای اپتیکی و حرارتی نمونه با دقت و حساسیت بالایی اندازه‌گیری می‌شود. از آن جمله می‌توان به اندازه-گیری ضریب‌ترمواپتیکی، ضریب جذب خطی، ضریب جذب و شکست غیرخطی، ضریب پخش گرمایی و میزان قطبش پذیری الکتریکی در بلورها اشاره کرد. بسیاری از پدیده‌های اپتیک غیرخطی از ضریب‌شکست غیرخطی نتیجه می‌شود. روش‌های متعددی برای اندازه-گیری خواص غیرخطی نانو ذرات وجود دارد که اندازه‌گیری انحراف پرتو، تکنیک جاروب zنمونه، آمیزش تبهگن چهارموج، تقریب سه موج تبهگن، تکنیک تداخل سنجی از این روش‌ها هستند[۶].

در این مقاله پس از لایه نشانی SiO_2 بر روی زیر لایه شیشه با استفاده از روش اسپری پایرولیزیز ، نیمرسانای GO بر روی آن جایگذاری شده و خواص ساختاری، مورفولوژی سطحی و رفتار اپتیک غیرخطی نمونه با استفاده از چیدمان روش جاروب z نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

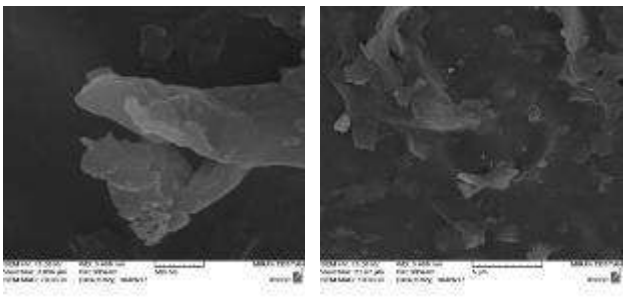
نتایج

شکل (۱) به ترتیب الگوهای پراش پرتوی ایکس به ترتیب مربوط به نانوذرات اکسید سیلیسیوم(SiO_2) ، نانوذرات اکسید گرافن(GO) و ناانوذرات ترکیبی (GO/SiO_2) نشان میدهد. شکل (۱-الف) قله‌های پراش مربوط به نانوذرات (SiO_2) را نشان می‌دهد که در توافق باکارت استاندارد JCPDS به شماره (کد: ۲۴۶۷-۰۸۱-۰۱)، ظاهر گردید که دارای ساختار آمورف می‌باشد. در شکل(۱-ب) XRD مربوط به (GO) را نشان می‌دهد که دارای قله تیزی با شاخص(۰۱۲) و نیز قله بسیار ضعیف می‌باشد(۰۰۳) که در توافق باکارت استاندارد JCPDS به شماره(کد:۱۷۱۵-۰۷۹-۰۱) می‌باشد که به ترتیب در زوایای(۱۲/۱۱) ، (۹/۴۹)، است. شکل(۱-ج) الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به لایه نازک ترکیبی (GO/SiO_2) در زوایای مختلف به‌خوبی نمایش داده‌شده است. ، ساختار XRD بیانگر آن است که اضافه شدن لایه نازک SiO_2 به GO سبب شده است ساختار آمورف SiO_2 شدت قله تیز مربوط به ساختار GO را کاهش قابل ملاحظه دهد.



شکل ۱: الگوی پراش پرتوی ایکس(XRD) مربوط به نانوذرات (**الف**) SiO_2، (**ب**)GO و (**ج**) SiO_2 -GO،

در شکل(۲) تصاویر سطوح با استفاده دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی(FESEM) و در دو مقیاس ۵μm و ۵۰۰nm اندازه گیری گردیده،نمایش داده شده است.در شکل (۲) که مربوط به اکسید اکسیدگرافن می باشد، سطح پوشیده شده با ذرات با ساختاری چین خورده نامنظم و ورقه ورقه ای بر روی یکدیگر می باشد، با لایه نشانی SiO_2 بر روی زیر لایه GO می باشد نیز حاکی از لایه نشانی همگن ساختار SiO_2 بر روی زیر لایه GO می باشد که در بزرگنمایی ۵۰۰nm حضور ذرات مربوط به GO و SiO_2 به خوبی ملاحظه می شود .



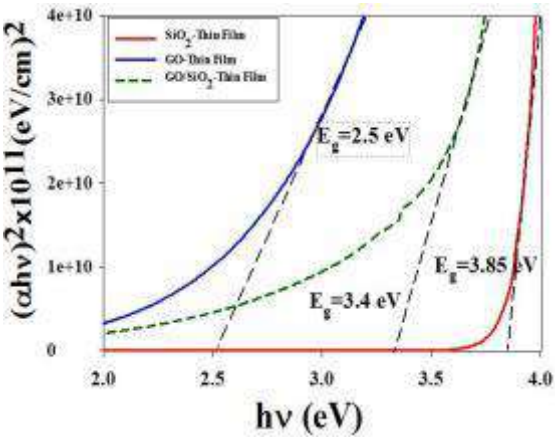
شکل ۲: تصاویر FESEM مربوط به لای نازک SiO_2 -GO در مقیاس ۵μm در تصویر سمت چپ و ۵۰۰ nm در تصویر سمت راست.

بررسی خواص اپتیکی:

به منظور تعیین گاف نواری مستقیم لایه های نازک از رابطه (۱) استفاده می شود:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - Eg) \quad (۱)$$

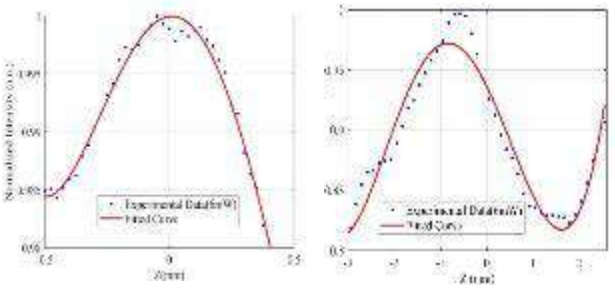
که در آن hν انرژی فوتون فرودی، Eg گاف نواری لایه و A یک ثابت است. شکل (۳) نمودار گاف نواری مستقیم مربوط به لایه های SiO_2 ، GO، SiO_2-GO اســـت که به ترتیب مقادیر ۳/۸۵eV ، ۲/۵eV، ۳/۴eV به دست آورده شد. نتایج بیانگر آن اســـت که لایه نشـــانی SiO_2 بر روی GO از مقادیر ۲/۵Ev به ۳/۴eV افزایش گردیده اســـت که این امر مربوط به مقدار گاف نواری بیشتر لایه SiO_2 می باشد.



شکل ۳: نمودارهای انرژی گاف نواری مربوط به نمونه‌های ، SiO_2 ، GOو- SiO_2GO

در این آزمایش از لیزر Nd - YAG با طول‌موج پیوسته‌ی ۵۳۲ نانومتر استفاده شده‌است. نمونه در راستای محورZ در مجاورت فاصله‌ی کانونی۱۳سانتی‌متر حرکت می‌کند. ابتدا نانوذرات مورد آزمایش درون سل ۱ میلی‌متر ریخته می‌شود. نمونه با استفاده از یک موتور پله‌ای و یک ریل اپتیکی با گام‌های ۵ میلی‌متر جابجا می‌شود. با استفاده از زبان برنامه-نویسی متلب، کدی برای جابجایی ریل به‌کمک موتور پله‌ای

با گام دلخواه نوشته شده‌است. با استفاده از این کد تمام مراحل جابجایی و ثبت شدت به‌صورت کاملا اتوماتیک انجام می‌شود. تغییرات شدت باریکه لیزر عبوری از نمونه توسط آشکارساز شدت ثبت و در رایانه ذخیره می‌شود. آشکارساز شدت، ساخت شرکت Thorlab با مدل PM100 است. با روبش نمونه در امتداد مسیر پرتو لیزر، z، شدت نور در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات شدت بر حسب مکان، نمونه در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل۴: نمودار سمت چپ: ضریب شکست‌غیرخطی– نمودار سمت راست: ضریب جذب غیرخطی نانوذراتGo-SiO2

نتایج نشان می‌دهد که ضریب شکست غیرخطی نمونه $10^{-7}(cm^2/W)$ و ضریب جذب غیرخطی برابر با $10^{-5}(cm/W)$ است.

نتیجه‌گیری

نتایج به خوبی نشان می دهد که نمونه Go-SiO2 دارای خاصیت غیرخطی خوبی بوده و در نتیجه کاندیدای خوبی برای استفاده در قطعات اپتوالکترونیک است.

مراجع

[**1**] Pinto, A.M.; Gonçalves, I.C.; Magalhães, F.D. Graphene-based materials biocompatibility: A review. Colloids Surf. *B: Biointerfaces 2013, 111, 188–202.*

[**2**] Becerril, H. A.; Mao, J.; Liu, Z.; Stoltenberg, R. M.; Bao, Z.; Chen, Y. Evaluation of Solution-Processed Reduced Graphene Oxide Films as Transparent Conductors, *ACS Nano 2008, 2, 463*

[**3**] N. F. Fahim, Z. Ouyang, B. Jia, Y. Zhang, Z. Shi, and M. Gu, "Enhanced photocurrent in crystalline silicon solar cells by hybrid plasmonic antireflection coatings," *Appl. Phys. Lett. 101, 261102 (2012);*

[**4**]Iler, R. K. (1979). The Chemistry of Silica. Plenum Press. ISBN 0-471-02404-X.

[**5**] Y Rajabi, M Adelifard, H Darabi, Nonlinear Optical Properties of Triple Thin Film FTO/SiO 2/GO, rGO, - Journal of Electronic Materials, 2023.

[**6**] A Alizadeh, Y Rajabi, MM Bagheri–Mohagheghi, Effect of crystallinity on the nonlinear optical properties of indium–tin oxide thin films, - Optical Materials, 2022.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

شناسایی نمونه‌های آلیاژی کروم پایه با بکارگیری الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین در روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری(LIBS)

یاشار احمدی عالی‌نسب[۱]، مرضیه همتی فارسانی[۱]، سید محمدرضا دربانی[۱]، پدرام صالح‌پور[۲]

[۱]پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

[۲]دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده – در این پژوهش به‌منظور شناسایی نمونه‌های آلیاژی کروم پایه از یکدیگر و تشخیص نمونه‌های غیرهم‌خانواده با استفاده از داده‌های حاصل از روش LIBS و روش‌های یادگیری ماشین الگوریتمی طراحی شده است. الگوریتم مذکور حاصل ترکیب روش‌های یادگیری بانظارت، محاسبه و مقایسه میانگین فواصل نقاط از نقطه مجهول ایجاد گردیده است، بطوریکه الگوریتم طبقه‌بندی K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) به عنوان الگوریتم با نظارت استفاده شده است. در انتها یک الگوریتم رای‌گیری مابین نتایج حاصل از مقایسه فواصل نقاط و نتیجه حاصل از بکارگیری روش طبقه‌بندی KNN اجرا شده است. نتایج نشان داده است که این الگوریتم با دقت بسیار بالایی توانایی تشخیص نمونه‌های هم‌خانواده را داشته و نمونه‌های ناشناخته را تشخیص و اعلام می‌کند.

کلید واژه- بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری، یادگیری ماشین، K نزدیکترین همسایه، طبقه‌بندی

Identification of chromium base alloy samples using the combined algorithm of machine learning in Laser Induced Breakdown Spectroscopy(LIBS)

Yashar Ahmadi Alinasab[1], Marziyeh Hemati Farsani[1], S. Mohammad Reza Darbani[1], Pedram Salehpour[2]
Optics-Laser Science and Technology Research Center, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan [1]
Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz [2]

Abstract- In this research, an algorithm was designed by using LIBS data and the method of algorithm of machine learning to identify chromium base alloy samples from each other and distinguish non-familiar samples. The aforementioned algorithm was created as a result of combining supervised learning methods, calculating and comparing the average distance of data points from the unknown data point. So that the K-nearest neighbor (KNN) classification algorithm was used as a supervised algorithm. At the end, a voting algorithm was used between the results of comparing the distance of points and the result of using the KNN classification method. The results showed that this algorithm has the ability to recognize samples of the same family with high accuracy, and it recognizes and announces unknown samples.

Keywords: Laser-induced Breakdown Spectroscopy, machine learning, K-nearest neighbor, classification

مقدمه

آلیاژها ترکیبات مهمی هستند که در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. شناسایی نمونه‌های هم‌خانواده در آلیاژهایی که تنها در غلظت عناصر تشکیل‌دهنده با یکدیگر تفاوت دارند، همواره مورد نیاز صنایع بوده است. روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری(LIBS) یک فناوری تحلیل عنصری با مزایای منحصربه‌فردی است که از آن جمله می‌توان به درجا و غیرتماسی بودن، تجزیه و تحلیل همزمان چندین عنصر و تشخیص از راه دور بدون آماده‌سازی نمونه اشاره نمود [1]. ترکیب داده‌های حاصل از این روش با الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌منظور افزایش توانایی عملکردی این روش در سالیان اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است[2.3]. در این پژوهش در نظر است، یک الگوریتم به منظور تشخیص نمونه‌های مختلف آلیاژ کروم پایه و همچنین تشخیص نمونه‌های مجهول و غیرهم‌خانواده با استفاده از ترکیب الگوریتم طبقه‌بندی KNN ، محاسبه و مقایسه میانگین فواصل هر مجموعه داده مربوط یه یک نمونه با نمونه مجهول توسط داده‌های بینابی حاصل از روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری (LIBS) طراحی گردد.

تئوری

الگوریتمKNN هنگامی که قدرت محاسباتی کامپیوترها افزایش یافت، محبوب شد و یکی از کاربردهای رایج آن تشخیص الگو است. برای داده آزمایشی، الگوریتم به دنبال k نمونه از نزدیکترین نمونه‌ها می‌گردد (یعنی k نمونه مشابه). نزدیکی دو نمونه با بدست آوردن تشابه و یا فاصله میان این دو نمونه محاسبه می‌شود. هر نمونه می‌تواند از انواع داده‌ها تشکیل شده باشد که باید تشابه میان آن‌ها بررسی شود. پس از یافتن این k داده مشابه با نمونه آزمایشی، با رأی اکثریت برچسب کلاس داده آزمایشی انتخاب می‌شود[1] .

تجزیه و تحلیل تفکیک خطی (LDA) یک روش بسیار معمول برای مسائل کاهش ابعاد به عنوان یک مرحله پیش پردازش برای یادگیری ماشین و کاربردهای طبقه‌بندی است. تکنیک LDA برای تبدیل ویژگی‌ها به فضای با ابعاد پایین ساخته شده است که نسبت واریانس بین کلاس به واریانس درون کلاس را به حداکثر می‌رساند و منجر به حداکثر تفکیک‌پذیری کلاس می‌شود [4] .

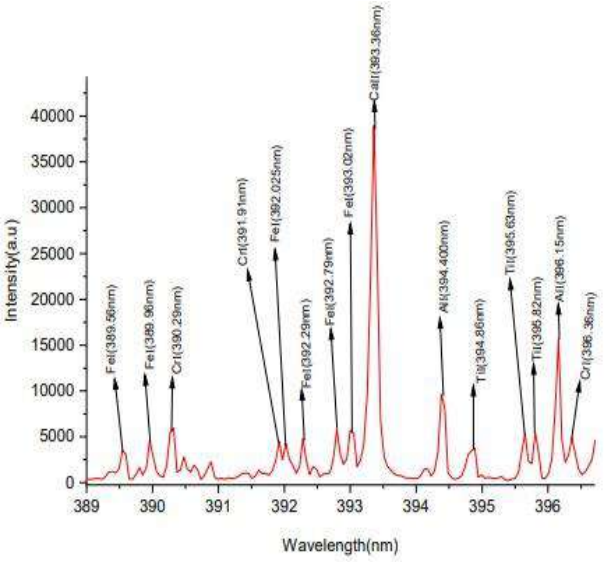
چیدمان تجربی

در این پژوهش از سامانه LIBSCAN100 ساخت شرکت Applied Photonics برای ثبت بیناب ۴ نمونه آلیاژ فلزی کروم پایه استفاده شده است. این سامانه دارای یک لیزر Q سوئیچ Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴نانومتر، لنرژی خروجی ۱۰۰میلی‌ژول، پهنای تپ۲ ± ۷ نانوثانیه و نرخ تکرار متغیر ۱ تا ۲۰هرتز بوده و آشکارساز آن قابلیت ثبت بیناب در بازه ۱۸۱ تا ۱۰۵۷ نانومتر با دقت بین ۰/۰۱تا ۰/۰۵ نانومتر در بازه‌های مختلف بینابی را دارد. بیناب ثبت شده از میانگین ۱۰ مرتبه اندازه‌گیری بر روی هر نمونه حاصل شده است. نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق حاوی کروم(Cr)، منگنز(Mn)، سیلیکون(Si)، کربن(C)، نیتروژن(Ni)، گوگرد(S)، فسفر(P)، نیکل(Ni)، مولیبدن(Mo)، تیتانیوم(Ti)، نیوبیم(Nb)، زیرکونیم(Zr)، مس(Cu)، تنگستن(W)، و برخی عناصر جزئی دیگر است.

جدول۱: درصد عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های آلیاژی

عنصر	نمونه۱	نمونه۲	نمونه۳	نمونه۴
C	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶
Si	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۸	۰/۷۷
Mn	۱/۷۲	۱/۱۸	۰/۵۹	۲/۰۰
Cr	۱۶/۶۰	۲۲/۳۰	۱۷/۱۰	۱۷/۵۰
Ni	۱۰/۸۰	۴/۰۲	۸/۵۲	۱۰/۰۰
Mo	۲/۰۰	۰/۱۸	۲/۴۶	۰/۳۰
Ti	-	-	-	۰/۵۵
Cu	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۴۰

بیناب LIBS یکی از نمونه‌های آلیاژی آنالیز شده در شکل۱ نشان داده شده است.

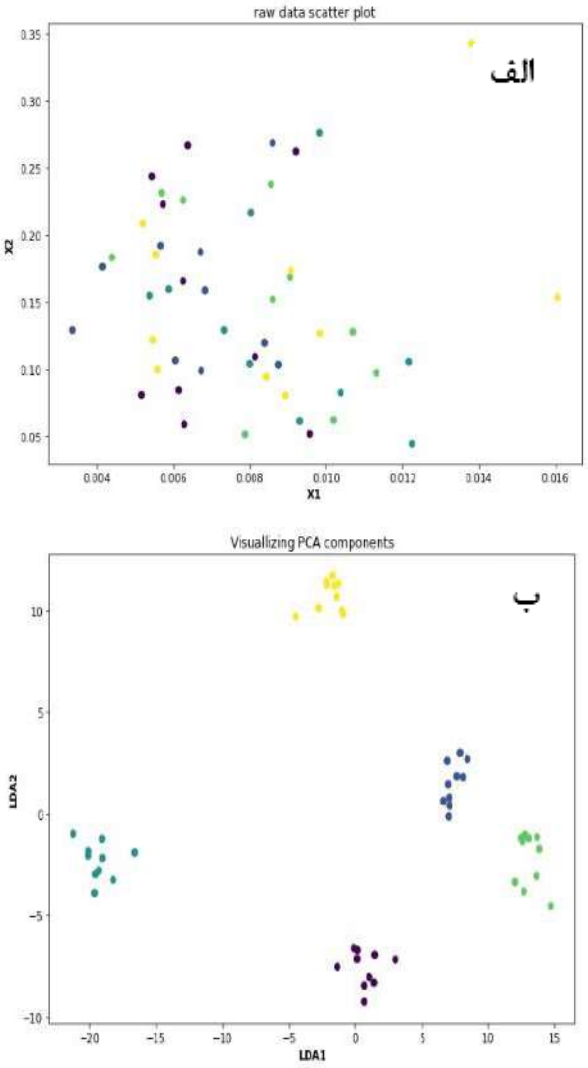


شکل۱: بیناب LIBS نمونه آلیاژی در بازه بینابی ۳۹۶-۳۸۹نانومتر

روش کار و تحلیل نتایج

بعد از طی مراحل بیناب‌نمایی، مجموعه داده تهیه شده ابتدا مورد نرمال‌سازی قرار گرفته و بعد از تعیین ویژگی‌ها(X) و برچسب‌ها(Y) که شامل نمونه‌های آلیاژی با درصد عناصر مختلف بود به ترتیب با شماره۱، ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. ابتدا داده‌ها به وسیله روش LDA مورد کاهش ابعاد قرار گرفته و ابعاد داده‌ها از ۲۴ به ۲ مولفه اصلی تقلیل یافت. شکل ۲ (الف و ب) بترتیب نمودار پراکندگی داده‌ها را قبل و بعد از اعمال LDA و کاهش ابعاد داده‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است جهت پیاده‌سازی این الگوریتم از زبان برنامه‌نویسی پایتون و محیط کاربری Google Colab استفاده شده است.

سپس داده‌های متعلق به هر کلاس داده آموزشی از مجموعه اصلی جداسازی و بدین ترتیب ۴ دسته داده مجزا ایجاد گردید. فاصله هر داده از داده‌های دیگر موجود در یک کلاس (داده‌های دارای یک برچسب) با استفاده از ماژول math محاسبه و بیشینه مقدار فاصله برای هر کلاس انتخاب شد. در گام بعدی، فاصله داده‌های مجهول (داده‌های آزمایشی) از هر کدام از کلاس‌ها محاسبه و بعد از میانگین‌گیری با بیشینه مقدار فاصله هر کلاس مقایسه شد. اگر این میانگین بزرگتر از مقدار بیشینه هر کلاس باشد داده نسبت به آن کلاس ناشناخته است و در غیراین صورت متعلق به آن کلاس است. در گام بعدی به منظور افزایش دقت، انحراف معیار داده‌های هر کلاس محاسبه و به مقدار میانگین فاصله داده‌های هر کلاس افزوده و با میانگین فاصله داده مجهول و داده‌های هر کلاس مقایسه شد.



شکل۲: نمودار پراکندگی داده‌ها الف) قبل از اعمال LDA ب) بعد از اعمال LDA

در مرحله بعدی الگوریتم K- نزدیک‌ترین همسایه فراخوانی و با قرار دادن K=7 و fit نمودن آن با داده‌های کل (بدون تقسیم کردن به داده‌های مجزا برای هر کلاس) نتیجه طبقه‌بندی برابر با ۱۰۰٪ شد. به عنوان گام نهایی، بین نتیجه حاصل از مقایسه فوق الذکر و همچنین نتیجه طبقه‌بندی صورت گرفته توسط الگوریتم KNN یک رای‌گیری صورت گرفته شد. نتیجه نهایی در صورتی که نمونه مجهول متعلق به یکی از ۴ نمونه مورد آزمون باشد، برچسب نمونه (به عنوان مثال عدد ۲ نمایش داده می‌شود)

و در غیر این صورت پیام نمونه ناشناخته یا "Unknown sample" را نمایش می‌دهد.

به منظور تست عملکرد الگوریتم، ابتدا از داده‌های ماده HMX به عنوان نمونه مجهول استفاده و مشاهده شد که نتیجه به درستی حاصل شده و الگوریتم پیام "Unknown Sample" را نمایش می‌دهد. سپس از داده‌های نمونه آلیاژ دوم استفاده گردید و الگوریتم برچسب ۲ را نمایش داد. به منظور حصول اطمینان بیشتر از صحت عملکرد الگوریتم، داده‌های بیناب LIBS فلز مس استفاده و مشاهده شد که الگوریتم پیام "Unknown Sample" را نمایش داد که کاملا منطبق بر انتظارات بود. مدت زمان اجرای الگوریتم ۰/۳۱ ثانیه محاسبه گردید.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور شناسایی نمونه‌های مختلف آلیاژ از یکدیگر و تشخیص نمونه‌های غیرهم‌خانواده با استفاده از بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری (LIBS) و داده‌های بینابی حاصل از هر نمونه یک الگوریتم با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین طراحی شد که حاصل ترکیب الگوریتم طبقه‌بندی K نزدیک‌ترین همسایه (KNN)، محاسبه و مقایسه میانگین فواصل نقاط از نقطه مجهول بوده و در انتها یک الگوریتم رای‌گیری مابین نتایج حاصل از مقایسه فواصل نقاط و همچنین نتیجه حاصل از بکارگیری روش طبقه‌بندی KNN اجرا شد. نتایج نشان داد که این الگوریتم با دقت ۱۰۰٪ توانایی تشخیص نمونه‌های هم‌خانواده را داشته و برچسب نمونه مورد نظر (شماره نمونه که یک عدد از ۱ تا ۴ است) و در مورد نمونه‌های ناشناخته پیام "Unknown Sample" را به عنوان خروجی الگوریتم نمایش می‌دهد.

مرجع‌ها

T. Zhang, H. Tang, and H. Li, Chemometrics in laser-induced breakdown spectroscopy,Journal of Chemometrics, 2018. 32(11): p. e2983.

Aberkane, S.M., et al., Sorting zamak alloys via chemometric analysis of their LIBS spectra. Analytical Methods, 2017. 9(24): p. 3696-3703.

A.P, Rao, Rapid quantitative analysis of trace elements in plutonium alloys using a handheld laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)device coupled with chemometrics and machine learning. Analytical Methods, 2021. 13(30): p. 3368-3378.

P, Xanthopoulos, P.M. Pardalos, Linear discriminant analysis, in Robust data mining. 2013, Springer. p. 27-33.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی کریستال BiB_3O_6 به روش روبش Z

سمیرا لعلی[۱]، دلنیا پورقباد[۱]، مریم شمس[۱]، مسعود قطبی [۱]

[۱]گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

s.lali@uok.ac.ir , m.ghotbi@uok.ac.ir

چکیده – در این مقاله خواص غیرحطی کریستال BIBO با استفاده از لیزر پالسی Yb:KGW در طول موج‌های ۵۱۵ و ۱۰۳۰ نانومتر با استفاده از روش روبش Z بررسی شده است و ضرایب شکست غیرخطی متناظر محاسبه شده‌اند. مقادیر به‌دست آمده در هر دو طول موج براساس برازش نتیجه‌های تجربی و روابط نظری حاصل شده‌اند. ضرایب شکست به‌دست آمده در طول موج‌های ۵۱۵ نانومتر و ۱۰۳۰ نانومتر به ترتیب برابر $4/1 \times 10^{-16}\frac{cm^2}{W}$ و $2/6 \times 10^{-16}\frac{cm^2}{W}$ است.

کلید واژه- روش روبش z، ضریب شکست غیرخطی، کریستال BIBO

Investigation of nonlinear refraction index of BiB_3O_6 by Z-scan method

Samira Lali[1], Delnia Pourghobad[1], Maryam Shams[1], Masood Ghotbi[1]

[1]Department of Physics, Faculty of Physics, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

s.lali@uok.ac.ir , m.ghotbi@uok.ac.ir

Abstract- In this research the nonlinear index of the nonlinear crystal BIBO was measured. The measurements were performed by a femtosecond Yb:KGW laser at 515 nm and 1030 nm. Fitting of theoretical transmission to experimental results yields nonlinear refractive indices. By using the z-scan method we have obtained the nonlinear refractive indices of $4 \cdot 1 \times 10^{-16}\frac{cm^2}{W}$ and $2 \cdot 6 \times 10^{-16}\frac{cm^2}{W}$ respectively.

Keywords: BIBO, Nonlinear refractive Index, z-scan method

مقدمه

در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی در زمینه اپتیک غیرخطی و ساخت و شناسایی مواد غیر خطی جدید انجام شده است تا در کاربردهایی از جمله محدود کننده‌های اپتیکی و ساخت ادوات اپتوفوتونیکی استفاده شوند. کریستال غیرخطی BiB_3O_6 (BIBO) در سال ۲۰۰۰ توسط هلویگ معرفی شد. این کریستال داری خواص نوری منحصربفردی برای تبدیل فرکانسی در محدوده‌های طیفی فرابنفش، مرئی وفروسرخ نزدیک است. محدوده‌ی شفافیت این کریستال از طول موج ۲۸۰ نانومتر در فرابنفش تا ۲۶۰۰ نانومتر در فروسرخ ادامه دارد. کریستال BIBO در هر سه صفحه‌ی نوری xy ،xz و yz امکان تطابق فاز دارد و دارای ویژگی‌های مهمی مانند ضریب غیرخطی بالا، جداشدگی زاویه‌ای پایین، پذیرفتاری طیفی و زاویه‌ای بالا و نیز آستانه‌ی آسیب‌پذیری بالا می‌باشد. تبدیلات فرکانسی و تولید پالس‌های فوق کوتاه نوری در نوسانگر پارامتری نوری با استفاده از کریستال BIBO انجام شده‌است که یکی از کاربردهای مهم این کریستال می‌باشد. ضریب شکست غیرخطی یا n_2 یک پارامتر مهم در کاربردهای هرماده غیرخطی در توانهای بالاست. این ویژگی در حضور پالس‌های فوق کوتاه فمتوثانیه بسیار مهم است زیرا علاوه بر اینکه می‌تواند اثرات مطلوب داشته باشد، اثرات ناخواسته‌ای نیز نشان می‌دهد [۱]. در این مقاله خواص غیرخطی مرتبه‌ی سوم کریستال BIBO را با استفاده از روش روبشZ در دو طول موج ۵۱۵ و ۱۰۳۰ نانو متر مورد بررسی قرار دادیم.

چیدمان آزمایشگاهی

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضرایب غیرخطی مواد به‌کار گرفته شده‌اند، از جمله می‌توان به روش روبش z اشاره کرد که توسط منصور شیخ بهایی و همکاران ارائه شد [۲]. در این روش خواص غیرخطی مرتبه سوم کریستال BIBO در مسیر پرتو لیزر روبش می‌شود. بوسیله‌ی یک عدسی پرتو لیزر در مسیر حرکت کریستال کانونی می‌شود و شدت میدان عبوری در میدان دور توسط یک آشکارساز که در جلوی آن یک دیافراگم قرار داده شده، اندازه‌گیری می‌شود. کریستال به علت خاصیت غیرخطی مانند یک عدسی منفی یا مثبت رفتار کانونی یا واکانونی را نشان می‌دهد و این موجب تغییر شدت در صفحه دیافراگم می‌شود [۳]. چشمه‌ی نوری بکار رفته در چیدمان تجربی روش روبش z یک لیزر پالسی Yb:KGW دارای توان ۶/۵ وات و نرخ تکرار ۷۶ مگا هرتز و دوره زمانی ۱۰۰ فمتو ثانیه است که دارای طول موج ۱۰۳۰ نانومتر می‌باشد. با استفاده از فرآیند تولید هماهنگ دوم در کریستال BIBO پالس‌های ۵۱۵ با طول موج نانومتر نیز قابل تولید است. در این چیدمان از دیافراگم با عبور تقریبا ۱۰٪ (S=0.1) و عدسی با فاصله کانونی ۵ سانتی‌متر استفاده شد. در این پژوهش از روش لبه تیغه برای به‌دست آوردن کمر پرتو گاوسی در هر دو طول موج استفاده شد. برای محاسبه ضریب شکست غیر خطی n_2 باید برازش قابل قبولی بین مقادیر تجربی و رابطه‌ی تراگسیلندگی (۱) ایجاد نمود. با چیدمانی مانند شکل ۲ و استفاده از روابط زیر می‌توان این کار را انجام شد:

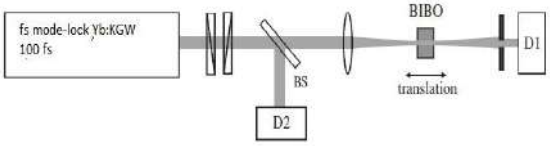
$$T(z) = 1 - \frac{4\Delta\Phi_0}{(x^2+9)(x^2+1)} \qquad (۱)$$

$$\Delta\Phi_0 = \frac{\Delta T_{P-V}}{0/406(1-s)^{0/25}} \qquad (۲)$$

$$z_0 = \frac{\Delta z_{p-v}}{1/7} \qquad x=\frac{Z}{Z_0} \qquad (۳)$$

$$\Delta\Phi_0 = kn_2I(0)L_{eff} \qquad (۴)$$

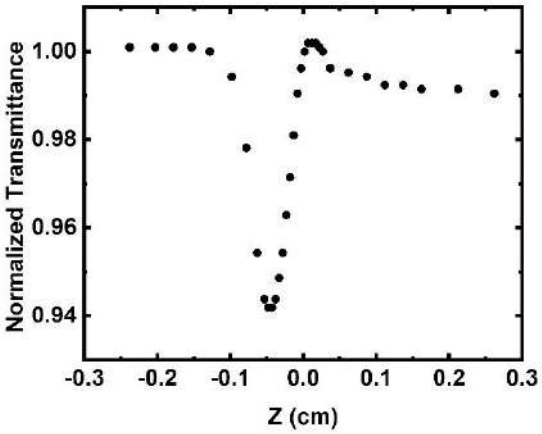
چون مقدار مقدار s مشخص است مقادیر z_0 و $\Delta\Phi_0$ به‌دست می‌آیند. همچنین رابطه مستقیمی بین $\Delta\Phi_0$ و ضریب شکست غیرخطی وجود دارد.



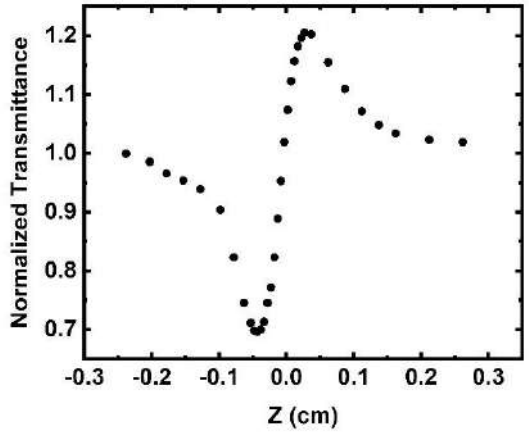
شکل ۲: چیدمان آزمایشگاهی روش روبشZ برای کریستال BIBO

نتایج و بحث

اندازه‌گیری به روش روبش Z برای هر دو طول موج ۵۱۵ و ۱۰۳۰ نانومتر انجام شد که نشان دهنده‌ی مثبت بودن ضریب شکست غیر خطی کریستال BIBO است. در نمونه استفاده شده در این تحقیق قطبش باریکه‌ی لیزر موازی با محور نوری X است و کریستال در راستای عمود بر محور نوری Z برش خورده است. مقدار ضریب شکست به‌دست آمده در طول موج ۵۱۵ نانو متر بزرگتر از مقدار متناظر در طول موج ۱۰۳۰ نانومتر می‌باشد. در طول موج ۵۱۵ نانومتر اثر جذب دو فوتونی در نمودار دیافراگم باز مشاهده شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. اثر جذب در منحنی دیافراگم بسته موجب تغییرات در تقارن منحنی می‌شود و درشکل ۳ ارتفاع قله را کاهش و عمق دره را افزایش می‌دهد. با تقسیم داده‌های بهنجار شده حالت دیافراگم بسته به داده‌های دیافراگم باز اثرات جذب حذف می‌شود و در شکل ۴ حالت بهنجا ر شده رسم شده است.

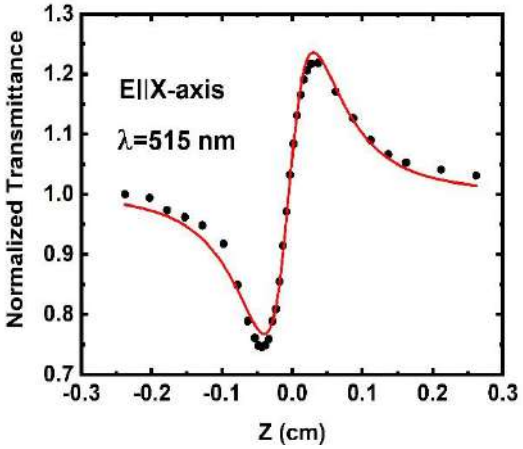


شکل ۲: مقادیر تجربی جذب دو فوتونی کریستال BIBO روبش z حالت دیافراگم باز در طول موج ۵۱۵



شکل ۳: داده‌های خام دیافراگم بسته و وجود عدم تقارن در طول موج ۵۱۵ نانومتر

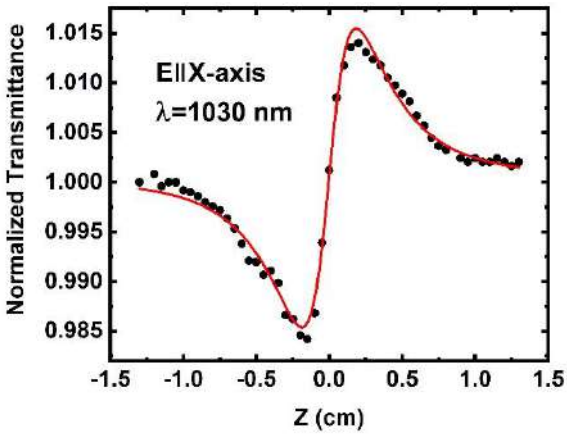
با مشخص بودن مقادیر λ، $\Delta\Phi_0$ ، $I(0)$، L_{eff} و استفاده از فرمول‌های (۱) تا (۴) مقدار ضریب شکست غیرخطی برای طول موج ۵۱۵ نانومتر برابر $4/1 \times 10^{-16}$ می‌باشد و مقدار n_2 برای طول موج ۱۰۳۰ نانومتر برابر $2/6 \times 10^{-16}$ است.



شکل ۴: نمودار برازش منحنی تراگسیلندگی در حالت دیافراگم بسته در طول موج ۵۱۵ نانومتر با نتایج تجربی برای کریستالBIBO با قطبش موازی راستای X. مقدار ضریب n_2 در این حالت برابر $4/1 \times 10^{-16}$ است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضریب شکست غیرخطی کریستال BIBO در دو طول موج مختلف محاسبه شد. مقدار ضریب شکست غیرخطی برای طول موج ۵۱۵ نانومتر برابر $4/1 \times 10^{-16}$ و در ۱۰۳۰ نانومتر برابر $2/6 \times 10^{-16}$ می‌باشداین اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد ضریب شکست غیرخطی این ماده مثبت است و با افزایش طول موج این ضریب کاهش می‌یابد.



شکل ۵: نمودار برازش منحنی تراگسیلندگی حالت دیافراگم بسته در طول موج ۱۰۳۰نانومتر با ضریب جذب $2/6 \times 10^{-16}$ را نشان می‌دهد

مرجع‌ها

[1] M. Ghotbi, A. Esteban-Martin and M. Ebrahim-Zadeh, “BiB_3O_6 femtosecond optical parametric oscillator”, Opt. Lett., Vol. **31**, No. 21, pp. 3128-3130, 2006.

[2] M. Sheik-bahae, A. A. Said A. A. and E. W. Van Stryland, “High-sensitivity, single-beam n2 measurements”, Opt. Lett., **14**(17), 955-957 (1989).

[3] S. Miller, F. Rotermund, G. Xu, F. Noack, V. Panyutin, and V. Petrov. "Polarization-dependent nonlinear refractive index of BiB_3O_6." Optical Materials 30, Vol. **10**: 1469-1472 (2008).

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

طراحی و بررسی کارایی پایپ نوری در موقعیت جغرافیایی تبریز

پارسا سبزی پور، دکتر سهراب احمدی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

s_ahmadi@tabrizu.ac.ir, parsa.sabzipour1@gmail.com

نور طبیعی یک عنصر مهم در آسایش بصری انسانها بوده و بر کیفیت دید تاثیر می گذارد. تأثیر نور طبیعی بر چرخه‌های بیولوژیکی انسان و همچنین تغییرات فیزیولوژیکی احتمالی در اثر غیاب نور طبیعی در طول روز کاملاً شناخته شده است. تحقیقات بر روی رفتار انسان و اثرات بیولوژیکی نور، نقش حیاتی نور مصنوعی یا طبیعی را در حفظ تعادل فیزیولوژیکی و روانی انسان نشان داده است. هنگامی که راحتی بصری به طور کامل برآورده نمی شود، استفاده مداوم از نور مصنوعی جایگزین مناسبی نیست، بنابراین طراحی دقیق یک ساختمان در جهت استفاده بهینه از نور طبیعی و بهره‌گیری از فواید آن کمک کننده است. پایپ نوری سیستمی است که می توان با استفاده از آن نور طبیعی را در طول روز به داخل اتاق منتقل کرد. یک پایپ نوری شامل یک گنبد ، پایپ و پخش‌کننده است. این مقاله شامل نتایج بهره‌گیری از یک پایپ نوری در شرایط جغرافیایی و جوی شهر تبریز برای یک اتاق با مساحت $12m^2$ بدون پنجره ارایه شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از پایپ نوری برای شهر تبریز مناسب است.

Designing and investigating the efficiency of the optical pipe in the geographical location of Tabriz

Parsa Sabzipour, Dr.Sohrab Ahmadi-Kandjani

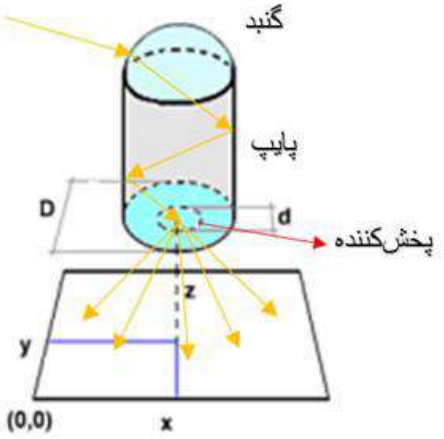
Faculty of Physics, University of Tabriz

s_ahmadi@tabrizu.ac.ir, parsa.sabzipour1@gmail.com

Natural light is an important element in visual comfort and it sometimes influences the quality of vision. The effect of daylight on the human biological cycles and possible physiological alterations in the absence of natural light during the day are well-known Research on and observation of human behaviour and the biological effects of light have shown the vital role of artificial or natural light, in maintaining the physiological and psychological balance in human organisms. Light-pipes represent simple systems to capture and transport the natural light inside a room during the day. Light-pipes (such as tubular light) are simple structures that allow the transmission of daylight from the outside to the inside of a room. They are realized with a top collector (often just a polycarbonate hemispheric dome), the pipe itself, and an emitter. This paper shows the results of implementing of a light pipe for the geographical and atmospheric condition of Tabriz city in a room with an area of $12m^2$ without any windows.

مقدمه

پایپ نوری دستگاهی با قابلیت منتقل کردن و توزیع نور طبیعی خورشید به فضاهای تاریک و بدون پنجره است. این دستگاه شامل سه بخش اصلی است. این سه بخش عبارتند از: ۱)گنبد،که وظیفه آن جمع آوری نور خورشید در طول روز است و معمولا در پشت‌بام ساختمان‌ها نصب می شود. ۲) لوله، که وظیفه آن انتقال نور خورشید از سقف به درون اتاق می‌باشد. و ۳)پخش‌کننده، که وظیفه آن پخش نور خورشید بصورت همگن در فضای اتاق است.



شکل ۱: طرح شماتیک از پایپ نوری و مسیر نوری

استفاده بیش از اندازه از روشنایی الکتریکی میتواند منجر به جنبه‌های نامطلوبی از منظر سلامتی انسان و هم از منظر صرفه‌جویی در انرژی شود. بنابر آمار بدست آمده از سال ۲۰۰۰ میلادی سهم انرژی روشنایی از کل انرژی مصرفی خانگی ۱۳٪ بوده است که مقدار قابل توجهی است. این مقدار معادل ۶.۵ میلیون تن نفت از نظر انرژی مصرف شده برای تامین آن است[۱].

هر وسیله نوری، چه طبیعی و چه مصنوعی، بر هورمون‌ها، دمای بدن، فعالیت‌های شناختی و حالت روحی ما تاثیر می‌گذارد. به طور خاص، این تأثیر توسط: سطح روشنایی، طیف نور، دمای رنگ و ماهیت متغیر (یا ایستا بودن) منبع تعیین می شود. بررسی واکنش مردم به محیط‌های داخلی نشان می‌دهد که نور روز مطلوب است زیرا شرایط را برای بینایی خوب و قابلیت تمیز دادن رنگ ها از یکدیگر را در صورت کنترل مناسب تضمین می کند.

یکی از عوامل کاهش راندمان پایپ‌های نوری برای انتقال نور، میزان جذب نور توسط خود لوله‌ها است. نور هنگام عبور از لوله، بارها منعکس می شود. اتلاف نور متناسب است با نسبت طول به عرض لوله (هر چه تعداد دفعات انعکاس نور در لوله بیشتر باشد، نور بیشتر جذب می شود). اگر ابعاد پایپ نوری متناسب و بهینه باشد، می تواند نور روز مورد نیاز فضاهای داخلی ساختمان‌ها را تامین کند[۲].

پایپ نوری به یک مدل تحلیلی برای پیش بینی عملکرد آن نیاز دارد. در این مقاله از برنامه HOLIGILM برای پیش بینی عملکرد پایپ های نوری استفاده شده است.

هر کدام از اجزای پایپ نوری و ویژگی‌های اپتیکی‌اش همانند ضرایب گذردهی و جذب و انعکاس و ابعاد پایپ نوری بعلاوه فاکتورهای نصب آن ، همانند شرایط آب و هوایی و جوی آن منطقه جغرافیایی یا مختصات جغرافیایی محلی که در آن پایپ نوری را نصب می کنیم بر روی بازدهی پایپ نوری تاثیرگذار است.

باید توجه کرد که در نصب پایپ نوری برای ساختمان ها باید پارامتر های هندسی و جغرافیایی مد نظر قرار گرفته شود وگرنه یک پایپ نوری بسیار پربازده که در موقعیت کمتر مساعد نصب شده است بازدهی خود را بصورت قابل توجهی از دست می دهد.

در این مقاله به دنبال این هستیم که عملکرد یک پایپ نوری برای یک اتاق مستطیل شکل با ابعاد 3*4m که هیچ پنجره ای ندارد و تمام نورش از طریق پایپ نوری فراهم می‌شود را مورد بررسی قرار دهیم. هدف این است که با استفاده از برنامه شبیه ساز HOLIGILM تخمین بزنیم که یک پایپ نوری در طول یک سال کامل چه درصدی از روشنایی روز را می تواند برای ما فراهم کند. و در نهایت چقدر میتواند باعث صرفه جویی در مصرف انرژی شود.[۲]

مبانی نظری

گنبد باید در مقابل فشار، ضربه و اشعه UV مقاوم باشد، تا لوله را در مقابل باران و گرد و خاک محافظت کند. گنبد به

گونه‌ای طراحی می شود که که نور را دریافت و جهت آن را به داخل لوله تغییر دهد(شکل ۲).



شکل۲: گنبد جمع کننده نور

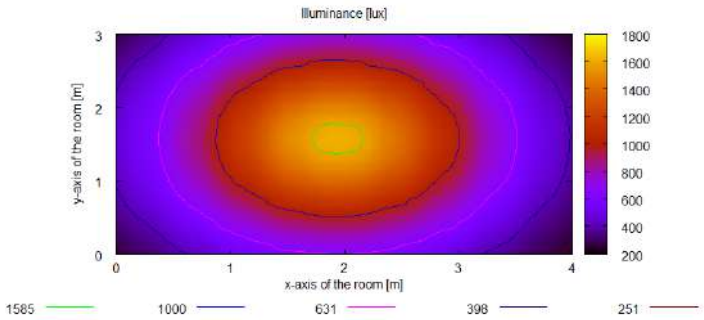
آخرین لایه لوله پایپ نوری که همان لایه درونی آن می‌باشد، توسط فیلم آلومینیومی چند لایه با میزان بازتابندگی بسیار بالا تولید می شود(حدود ۹۹٪). پایپ، نوری که از طریق گنبد وارد سیستم می شود را با چندین بازتاب به پخش‌کننده منتقل می‌کند. یک نمونه از پخش‌کننده تجاری را می توانید در شکل ۳ مشاهده کنید. پخش‌کننده دارای شکل محدب است تا بتواند نوری که به آن میرسد را بطور مساوی در محیط اتاق توزیع کند. سطح گنبد هم از جنس پلی کربنات میباشد که در بازار موجود است و از نظر قیمتی مناسب است.



شکل ۳: نمایی از دفیوزر در اتاق که همانند چراغ است.

پایپ نوری که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است قطر داخلی آن برابر با 0.53m ، و طول آن برابر با 1.0m است، که نسبت $\frac{\text{طول}}{\text{قطر}}$ آن برابر با ۱.۸۸۸ است. شکل گنبد این پایپ نوری بصورت یک نیمکره است و پایپ آن یک استوانه توخالی بدون انحنا(مستقیم) است. قطر پخش کننده و پایپ و گنبد همه برابر با ۰.۵۳ متر است. و بطور مستقیم روی همدیگر سوار شده‌اند.

ابعاد اتاق مستطیل شکلی هم که برای شبیه سازی در HOLIGILM وارد کرده ایم به این صورت است، x=4.0m و y=3.0m ؛ که ابعاد متداول برای اکثر اتاق ها در واحد های مسکونی است. محل قرارگیری پخش کننده درست در وسط اتاق است. ارتفاع y=1.50m و x=2.0mسقف اتاق است، بطوریکه است، ولی ارتفاع سقف از سطح کاری را برابر 3.0mاتاق نیز وارد کرده ایم. از آنجایی که مقدار بازتابندگی برای 2.0mبا تمام دیوار ها را برابر با صفر می‌گیریم و همچنین فرض بر این است که اتاق بدون پنجره است، پس میزان روشنایی که حسگر ها در هر ساعت از روز گزارش می‌کنند فقط حاصل از نوری است که توسط پایپ نوری مستقیما به آن شکل زیر نشاندهنده میزان روشنایی در ها رسیده است. سطح کاری است، که محوری عمودی شکل عرض اتاق و محور افقی طول اتاق را نشان می‌دهد.میزان روشنایی نیز بر حسب واحد لوکس است.



شکل ۴: نمایی از میزان روشنایی توسط پایپ نوری در ساعت ۱۱:۰۰ ، تاریخ ۱ جولای

در این مقاله کارایی پایپ نوری برای شهر تبریز مورد بررسی قرار می گیرد. بنابراین در قسمت ورودی برنامه ، عرض جغرافیایی را برابر با ۳۸ درجه گرفتیم که ارتفاع شهر تبریز می‌باشد.

مشخصات فیزیکی پایپ نوری را همانطور که در بالا گفته شد تنظیم کردیم ، و مشخصات اپتیکی را هم بصورتی

انتخاب کردیم که بتوان پایپ نوری را با هزینه کم با مواد موجود در بازار ساخت.

سپس جداولی طراحی کردیم که از هر ماه(بطور مثال سپتامبر) ۴ روز(روز های ۱ام ، ۸ام ، ۱۵ام و ۲۲ام) انتخاب می‌شد ، و میزان روشنایی ایجاد شده توسط پایپ نوری در هر ساعت در طول روز گزارش می شد. که عدد اولی مربوط به میزان روشنایی در مرکز اتاق(زیر پخش‌کننده) می‌باشد و عدد دومی حداقل میزان روشنایی است که در ۹۰٪ محیط اتاق وجود دارد. این داده ها بر حسب واحد روشنایی لوکس(lux) هستند.

جدول ۱: روشنایی برحسب لوکس

برای فصل های ***زمستان*** و ***پاییز*** ۳ مدل متفاوت برای آسمان انتخاب کردیم که عبارتند از: ۱)آسمان کاملا ابری[۲۸]

زمان(ساعت)	۵:۳۰	۶:۰۰	۷:۰۰	۸:۰۰	۹:۰۰	۱۰:۰۰	۱۱:۰۰
روشنایی بیشینه و کمینه بر حسب لوکس	40, 15.8	100, 40	350, 100	750, 251	1000, 398	1400, 450	1600, 631
زمان(ساعت)	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
روشنایی بیشینه و کمینه بر حسب لوکس	1600, 631	1400, 450	1000, 398	700, 251	350, 100	100, 40	40, 15.8

۲)آسمان کاملا پوشیده از مه[۲۹] ۳) آسمان صاف شهری آلوده[۳۰]

برای فصل ***بهار*** و ***تابستان*** هم دو مدل آسمان را برای محاسبات در نظر گرفتیم. ۱)کاملا ابری و ۲) آسمان صاف شهری، آلوده

نتایج

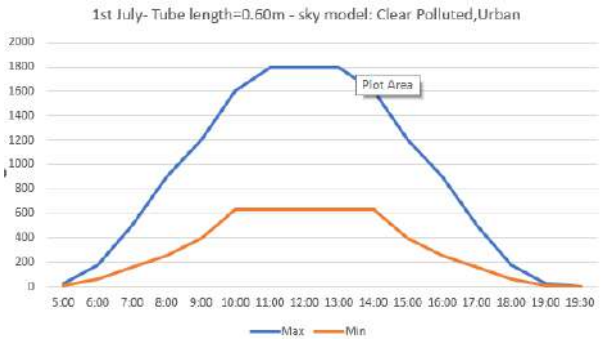
با توجه به نتایج بدست آمده و با توجه به استاندارد(مرجع ۶) که حداقل میزان روشنایی مورد نیاز در اتاق را برابر با ۲۰۰ لوکس تعیین کرده است.اگر هوا را صاف در نظر بگیریم، در فصل تابستان، بطور متوسط از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۶:۰۰ پایپ نوری بطور کامل نور مورد نیاز اتاق را برآورده می‌کند و دیگر نیازی به استفاده از چراغ نمی‌باشد.

در فصل پاییز نیز بطور میانگین از ساعت ۹:۳۰ تا ۱۵:۰۰ پایپ نوری بطور کامل نور اتاق را برآورده می‌کند.

در فصل زمستان ولی پایپ نوری تنها برای دو ساعت در طول روز می‌تواند نور اتاق را بطور کامل تامین کند، ولی به مدت ۳ ساعت هم می‌تواند مصرف برق ناشی از لامپ ها به نصف برساند.

در فصل بهار نیز پایپ نوری بطور میانگین از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۶:۰۰ میتواند نور اتاق را بطور کامل تامین کند.

اما اگر هوا بصورت کاملا ابری باشد، در فصل های پاییز و زمستان یک پایپ نوری هیچگاه نمی‌تواند بصورت کامل نور مورد نیاز را تامین کند، ولی اضافه کردن یک پایپ نوری دیگر این مشکل را رفع می‌کند، یک پایپ نوری در فصل های زمستان و بهار می‌تواند یک سوم نور مورد نیاز را از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ تامین کند.



[۲۸] CIE Overcast

[۲۹] Uniform Fog

[۳۰] CIE Clear Polluted, Urban

شکل ۵: نمودار روشنایی منتقل شده توسط پایپ نوری در روز ۱ جولای ، هوای صاف

نتیجه گیری

در این مقاله یک پایپ نوری برای تامین روشنایی یک اتاق بدون پنجره طراحی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که برای موقعیت جغرافیایی تبریز در فصلهای بهار و تابستان نورکافی تامین می شود و برای پاییز و زمستان برای ساعاتی نور تامین می شود و در بقیه روز بخشی از روشنایی مورد نیاز قابل تامین است. توسعه طراحی برای مناطق مختلف کشور می تواند چشم انداز نوید بخشی از توان تامین روشنایی به ما بدهد.

مراجع

Zhang, X., Muneer, T., 2005. A design guide for performance assessment of solar light-pipes. Lighting Research and Technology 34 (2), 149–169.

Jenkins, D., Muneer, T., 2003. Modelling light-pipe performances – a natural daylighting solution. Building and Environment 38, 965–972.

X. Zhang, Daylighting Performance of Tubular Solar Light Pipes: Measurement, Modelling and Validation. Napier University of Edinburgh, 2002

Katunský, D.; Dolníková, E.; Dolník, B. Daytime Lighting Assessment in Textile Factories Using Connected Windows in Slovakia: A Case Study. Sustainability 2018, 10, 655.

Freewan, A. Using tubular daylighting systems to improve illuminance level in double loaded corridors in educational buildings, Jordan Journal of Civil Engineering, 10 (2016), 184-196.

The Engineering ToolBox (2004). Illuminance - Recommended Light Levels. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/light-level-rooms-d_708.html

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

اندازه گیری ابعاد نانوذرات آهن با روش پراکندگی نور ایستا

فائزه اسماعیل زاده، سعید میرزانژاد و مطهره امین جراحی

بابلسر، دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک اتمی و مولکولی

saeed@umz.ac.ir,faezeh.umz@gmail.com,aminjarahi03@gmail.com

چکیده – روش پراکندگی نور ایستا(SLS) یک روش آنالیز جایگزین برای محاسبه مشخصات نانوذرات است.این روش برای اندازه گیری مولکول ها یا ذراتی با اندازه یک دهم تا دو برابر طول موج نور مورد استفاده قابل اندازه گیری است. علاوه بر این، این روش برای تعیین جرم مولی و غلظت ذرات نیز استفاده می شود. در این پژوهش یک سیستم SLS آزمایشگاهی برای اندازه گیری ابعاد نانوذرات طراحی و ساخته شده است که قابلیت اندازه گیری شعاع نانوذرات را در حالت محلول دارد. در این مقاله، ابعاد نانوذرات آهن معلق در آب مقطر با استفاده از این سیستم اندازه گیری شد و نتایج آزمایش سیستم SLS با نتایج تصویربرداری TEM نیز مقایسه شد.

کلید واژه- پراکندگی نور ایستا، محلول نانوذرات، شیب تغییرات ضریب شکست محلول.

Iron nanoparticle size measurement with static light scattering method

Faezeh Esmaeilzadeh, Saeed Mirzanejhad and Motahareh Aminjarrahi

Babolsar, University of Mazandaran, Faculty of Sciences, Atomic and Molecular Physics

saeed@umz.ac.ir,faezeh.umz@gmail.com,aminjarahi03@gmail.com

Abstract- The static light scattering method is an alternative analysis method to calculate the characteristics of nanoparticles. This method can be used to measure molecules or particles with a size in the range 1/10 of the laser wavelength up to about 2 times the laser wavelength. In addition, this method is also used to determine the molar mass and concentration of particles. . In this research, a laboratory SLS system has been designed and built to measure the dimensions of nanoparticles, which has the ability to measure the radius of nanoparticles in solution. In this article, the dimensions of iron nanoparticles suspended in distilled water were measured using this system, and the SLS system test results were compared with the TEM imaging results.

Keywords: Static Light Scattering, Nanoparticle Solvent, Refractive Index Gradient.

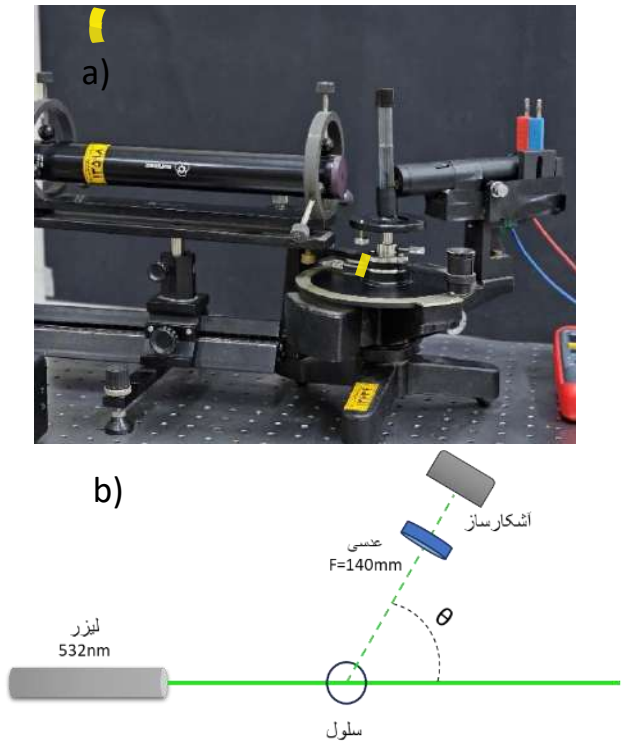
مقدمه

روش پراکندگی نور ایستا (SLS[31]) روشی برای اندازه گیری شعاع ذرات نانومتری و میکرومتری می‌باشد[7]. در این روش مشخصات نانوذرات محلول در مایع با اندازه گیری پراکندگی نور لیزر بررسی می‌شود که نسبت به روش های آنالیز دیگر از قبیل SEM,TEM که باید نمونه در حالت خشک بررسی شود این مزیت را دارد که در حوزه های بهداشتی و زیستی و یا هر حوزه ی دیگری که نمونه باید بصورت سوسپانسیونی بررسی شود، می تواند اندازه ذرات را در حالت محلول بدست‌آورد[6]. طیف سنجی پراکندگی نور ایستا روشی غیر تصویری است که در آن میزان نور پراکنده شده در زوایای مختلف اندازه‌گیری می‌شود، که روشی سریع و مقرون به صرفه و غیر مخرب برای تعیین اندازه ذرات خشک و سوسپانسیونی می‌باشد. علاوه بر اندازه ذره از این روش می‌توان برای تعیین جرم مولی و غلظت ذرات در محلول نیز استفاده کرد که اهمیت و ارزش بالای آن را مشخص می‌کند.[5,8]

اساس کار این روش پراکنده شدن نور توسط ذرات پخش شده در محلول می‌باشد. در حقیقت اندازه ذرات بصورت مستقیم اندازه گیری نمی‌شوند بلکه با بررسی توزیع زاویه ای شدت نور پراکنده شده، مشخصات نانوذرات محاسبه می گردد. بطور کلی از این روش برای بررسی اندازه ذرات معدنی، پودر های شیمیایی، اندازه ذرات دوغاب و... می‌توان استفاده نمود. هدف این مطالعه طراحی و ساخت سیستم SLS و آزمایش آن برای تعیین اندازه نانو ذرات آهن در مقایسه با نتایج تصویر برداری TEM می باشد.

چیدمان آزمایش

سیستم پراکندگی نور ایستا که در این پژوهش ساخته شده است، شامل لیزر ۵۳۲ نانومتر ۵۰ mw مدل



شکل۱. a) تصویری از چیدمان آزمایش و b) شماتیک چیدمان پراکندگی استاتیک نور

(SN:10003) نگه دارنده قابل تنظیم لیزر، صفحه گردان مدرج، سلول آزمایش و نگه دارنده آن، عدسی با فاصله کانونی۱۴۰میلی‌متر، آشکارساز STE 2/19 BPY 47 و ولتمتر دیجیتالی مدل(DEC330FC) می شود که بر روی میز اپتیکی چیده شده اند شکل(۱) و (۲). ابتدا پرتو لیزر در شدت تنظیم شده به سمت سلول تابیده شده و سپس خروجی آشکارساز در زوایای مختف خوانده می شود. این اندازه گیری باید یکبار برای حلال و بار دیگر برای محلول حاوی نانو ذرات بصورت جداگانه اندازه‌گیری شود.

[31] **Static Light Scattering**

در این آزمایش از محلول BSA[32] با غلظت مشخص در آب مقطر برای کالیبراسیون دستگاه استفاده شده است. از نکات مهم در انجام این آزمایش انتخاب غلظت مناسب محلول به جهت جذب کم در طول موج نور است.



شکل۲: نمای از بالا از دستگاه پراکندگی استاتیک نور

آماده سازی نمونه

در این آزمایش برای کالیبراسیون سیستم از محلول(BSA) که نوعی پروتئین آلبومین سرم گاوی است با غلظت mg/ml ۲.۴ استفاده کردیم. همچنین از محلول نانو ذرات کروی آهن در آب مقطر با غلظت mg/ml ۰.۵با خلوص ۹۹.۵ درصد از شرکت(US Research Nanomaterials, Inc.) استفاده کردیم. قبل از آزمایش محلول به مدت یک ساعت به روش اولتراسونیک به حالت همگن درآمد. در این آنالیز مقدار شیب ضریب شکست محلول ها dn/dc مورد نیاز است. این مقداربرای محلول BSA 0.185ml/g گزارش شده [1] و برای سوسپانسیون نانوذرات آهن مقدار آن 0.4ml/g گزارش شده است [2].

بحث و بررسی

رابطه بین شدت نور پراکنده شده و وزن مولکولی ذره و غلظت آن را می توان به شکل زیر نوشت [3]:

$$\frac{KC}{R(\theta)} = \frac{1}{MP(\theta)} + 2A_2C \qquad (۱)$$

که در آن K ثابت اپتیکی و $R(\theta)$ نرخ ریلی است و C غلظت محلول مورد نظر می باشد و A_2 نیز اندازه نیروهای برهمکنش بین ذرات است که در این تقریب برای محلول ایده آل صفر در نظر گرفته می شود. فاکتور $P(\theta)$ نیز به شکل و اندازه ذره وابسته است و با توجه به کوچک بودن زاویه پراکندگی در اینجا فقط تابعی از اندازه ذره است. بر طبق تقریب گوینر برای بردار پراکندگی داریم[6]:

$$q = \frac{4\pi n}{\lambda}.\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \qquad (۲)$$

q برداری است که چگونگی تغییر جهت نور فرودی را هنگام پراکنده شدن توضیح می دهد ،λ طول موج لیزر،n ضریب شکست محلول است و θ زاویه پراکندگی است. بنابراین در ادامه برای فاکتورP که تابعی‌از اندازه ذره داریم:

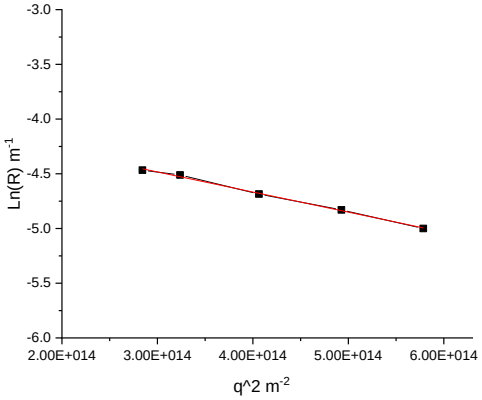
$$P(q) \approx e^{-\frac{1}{3}.R_g^2.q^2} \qquad (۳)$$

در فرمول (۳), R_g شعاع چرخش نانو ذرات می باشد. برای کالیبراسیون سیستم از رابطه زیر استفاده می شود که k ثابت کالیبراسیون است و G بهره آشکارساز و $\Delta U_{BSA} = U_{BSA} - U_0$ که U_{BSA} ولتاژ خروجی آشکار ساز برای محلول و U_0 ولتاژ حلال (آب مقطر) در یک زاویه دلخواه است.

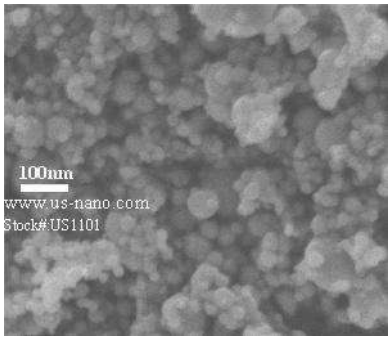
$$k = \frac{\Delta U_{BSA}}{G.\left(\frac{dn}{dc}\right)_{BSA}^2 C_{BSA} M_{BSA}} \qquad (۴)$$

[32] **Bovine Serum Albumin**

ابتدا کالیبراسیون برای ماده BSA انجام شد و با اندازه گیری ولتاژ آشکار ساز ثابت کالیبراسیون محاسبه شد. درادامه با اندازه گیری میزان ولتاژ آشکارساز در زوایای مختلف برای حلال و محلول به شکل جداگانه محاسبه می شوند. با رسم نمودار $Ln\ R(\theta)$ برحسب q^2 شیب نمودار مقدار $-\frac{1}{3}\cdot R_g^2$ را نتیجه می دهد که با آن اندازه نانوذرات را می‌توان بدست آورد. بدلیل اینکه در q^2های پایین وغلظت های خیلی زیاد پراکندگی بطور معمول زیاد میشود این نمودار برای q^2 های بالا تر رسم شده است و غلظت را ۰.۵ mg/ml در نظر گرفتیم تا از خطا جلوگیری شود [4,6]. با استفاده از شیب منحنی شکل (۳) ابعاد نانو ذرات آهن را۷۳نانومتر بدست آوردیم. همچنین تصویر TEM این نانو ذرات در حالت خشک نیز در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۳: نمودار $Ln\ R(\theta)$ برحسب q^2 (شیب نمودار۱۵-E۱.۸- است.)



شکل ۴: تصویر TEMنانوذرات آهن [9]

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک سیستم آزمایشگاهی SLS طراحی و ساخته شد که قابلیت اندازه گیری شعاع نانوذرات را در حالت محلول دارد که با استفاده از آن ابعاد متوسط نانوذرات آهن را میتوان اندازه گیری و محاسبه نمود. در این آزمایش از q^2های بالا برای بدست آوردن شیب نمودار استفاده شده و نتایج اندازه گیری برای نانوذرات آهن شعاع ۷۳ نانومتر رانشان می دهد نتایج با تصویر TEM از پودر خشک نانوذرات مقایسه شد که نشان می دهد توزیع شعاعی در یک مقیاس بوده است. نتایج حاصل با استفاده از آشکار ساز STE 2/19 BPY 47 بدست آمده است که سبب انحراف اندکی از مقدار واقعی بوده است.

سپاسگزاری

از آزمایشگاه فیزیک حالت جامد و زیست شناسی دانشگاه مازندران بخاطر همکاری هایشان قدردانی می نماییم.

مرجع‌ها

Khago, Domarin, et al. "Protein refractive index increment is determined by conformation as well as composition." Journal of Physics: Condensed Matter 30.43 (2018): 435101.

Ansari, Farahnaz, Masoud Kavosh, Robert Horvath, and Jeremy J. Ramsden. "Particle speciation during PEG–Fe 3 O 4 hybrid nanoparticle self-assembly on Si (Ti) O 2." *Journal of Nanoparticle Research* 13 (2011): 193-198.

Abe, Masahiko, ed. Measurement techniques and practices of colloid and interface phenomena. Springer, 2019.

Zhao, Y., Jamieson, A. M., Olson, B. G., Yao, N., Dong, S., Nazarenko, S., ... & Lal, J. (2006). Conformation of comb-like liquid crystal polymers in isotropic solution probed by small-angle neutron scattering. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 44(17), 2412-2424.

Slotboom, Dirk Jan, Ria H. Duurkens, Kees Olieman, and Guus B. Erkens. "Static light scattering to characterize membrane proteins in detergent solution." Methods 46, no. 2 (2008): 73-82.

Behra, Juliette S., et al. "Characterization of sodium carboxymethyl cellulose aqueous solutions to support complex product formulation: A rheology and light scattering study." ACS Applied Polymer Materials 1.3 (2019): 344-358.

Kolokolnikov, I., Elina Nepomnyashchaya, and Elena Velichko. "Static light scattering for determination of physical parameters of macro-and nanoparticles."

Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1410. No. 1. IOP Publishing, 2019.

Rooney, J. G., and G. Ver Strate. "On line determination by light scattering of mechanical degradation in the GPC process." Liquid Chromatography of Polymers and Related Materials. III. CRC Press, 2020. 207-235.

https://www.us-nano.com/inc/sdetail/164

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بهبود اثر نور کُند در ادوات تمام نوری با کمک شفافیت القایی پلاسمونیکی

محمد باقر دلقوی، عبداله علیزاده، هادی اسماعیلیان مقدم

بناب، انتهای بزرگراه ولایت، دانشگاه بناب، گروه مهندسی برق –الکترونیک، کد پستی ۵۵۵۱۷۶۱۱۶۷

mdelghavi@ubonab.ac.ir, a.alizadeh@ubonab.ac.ir, hadieysmalian1395@gmail.com

چکیده – در این تحقیق یک ساختار هیبریدی از تک لایه گرافن در روی زمینه سلیکا روی سیلیکون، جهت ایجاد پدیده شفافیت القایی پلاسمونیکی ارائه شده است. این ساختار در محدود باند تراهرتز، اثر شفافیت القائی پلاسمونیکی را از خود بروز می دهد. در پدیده شفافیت القایی پلاسمونیکی از تداخل های سازنده و مخرب بین مد روشن و مد تاریک کمک گرفته می شود. کنترل این اثر با ولتاژ فرمی گرافن امکان پذیر می باشد. تئوری انتقال بین مد های مختلف این ساختار با استفاده تئوری مد های کوپل شده یا CMD بدست می آید. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که این ساختار قابلیت جذب بسیار خوب و بالای ۵۰٪ را دارا است. همچنین با این ساختار می توان به ضریب شکست گروهی بالا با مقدار ۵۳۰ دسترسی پیدا کرد.

کلید واژه- پلاسمونیک، ضریب شکست گروهی، شفافیت القایی پلاسمونیکی ، نور کند،

Slow light effect in all-optical devices Using plasmonic induced transparency

Mohammad B. Delghavi ,Abdollah Alizadeh, Hadi Esmailiyan

Electric Engineering Department, Bonab University, Bonab

mdelghavi@ubonab.ac.ir, a.alizadeh@ubonab.ac.ir , hadieysmalian1395@gmail.com

Abstract- In this research, a Silica-on-Silicon structure with a single-layer graphene is presented to create the PIT (plasmonic induced transparency). This structure shows the effect of plasmonic induced transparency in the terahertz band. In the phenomenon of plasmonic induced transparency, the constructive and destructive interferences between the light mode and the dark mode are used. It is possible to control this effect with the Fermi voltage of graphene. The theory of transition between different modes of this structure is obtained using the CMT or coupled modes theory. The results of the simulations show that this structure has a very good absorption capacity of over 50%. Also, with this structure, it is possible to reach a high group refractive index with a value of 530.

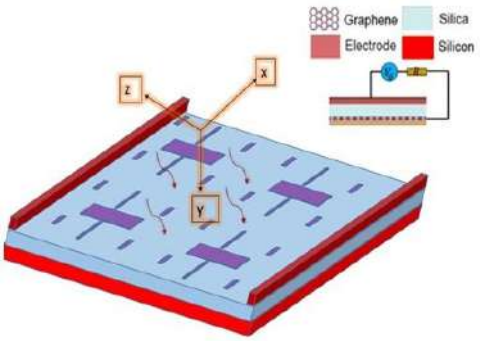
Keywords: Plasmonic, PIT(Plasmonic induced Transparency), Group index, Slow light

مقدمه

کاهش آستانه اثرات غیر خطی یکی از اهداف مهم در زمینه مهندسی نور است. یکی از روشهای کاهش این اثرات استفاده از نورکُند می‌باشد. نورکُند میزان تقابل نور با ماده را بهبود می‌بخشد و این امکان را فراهم می کند تا کنترل بیشتر و بهتری روی پهنای باند طیفی نور حاصل شود. علاوه بر کنترل بهتر، امکان ایجاد تاخیر و ذخیره موقت نور نیز فراهم می شود. یکی از را های رسیدن به نور کُند استفاده از اثر شفافیت القائی پلاسمونیکی است. این اثر در علم فوتونیک مشابه پدیده شفافیت القائی الکترومغناطیسی در سیستم های اتمی است. پدیده شفافیت القائی الکترو مغناطیسی در شرایط آزمایشگاهی بسیار سخت اتفاق می‌افتد و از نظر سایز بزرگ ادوات و گران قیمت بودن آنها دارای محدودیت هایی است[1]. اما در مقابل به دلیل ویژگی های خاص نوری از جمله شیفت ناگهانی روی فاز موج الکترو مغناطیسی هنوز مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. در سالهای اخیر پژوشگران اثر شفافیت القائی پلاسمونیکی را در بسیاری از سیستم های غیر اتمی مانند توری فلزی، موجبرهای فلز-دی‌الکتریک-فلز کشف و بدست آوردند[2,3]. اما در سیستم های ذکر شده دارای محدودیت هایی از جمله طول عمر پلاسما، عملکرد محدود ثابت دی الکتریک و تلفات اهمی بالا هستند. گرافن یک ماده دو بعدی با ویژگی های عالی از جمله قابلیت تنظیم روان، اتلاف اهمی کم و شفافیت نوری است[4,5]. به تازگی ساختارهایی بر پایه شفافیت القائی پلاسمونیکی با استفاده از گرافن طراحی شده است که در مدولاتور های فتوالکتریک، لیزر ها، تقویت کننده های نوری و بسیاری از کاربرد ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بحث دیگر در این موضوع اشاره به خواص پاشندگی قابل توجه گرافن اشاره کرد. از چنین ویژگی می‌توان برای طراحی دستگاه های نورکُند، جهت کاهش سرعت انتشار نور استفاده کرد[7].

طراحی ساختار

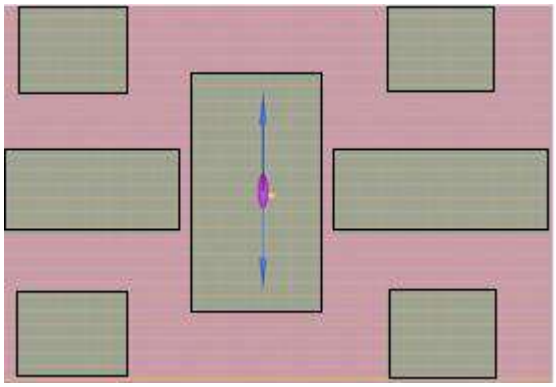
در این تحقیق، یک الگوی ساده گرافن تک لایه را بر روی زمینه سیلیکا بر روی سیلیکون که هر کدام به ضخامت ۰.۱میکرومتر در محدوده طیفی تراهرتز طراحی شده است. در ساختار طراحی شده تداخل مخرب باعث بوجود آمدن پدیده شفافیت القائی پلاسمونیکی می‌شود. پاسخ پدیده شفافیت القایی می‌تواند به صورت دینامیکی توسط پتانسیل خارجی کنترل شود. تمامی تئوری های مربوط به ساختار و نمودار های انتقالی و ضریب شکست گروهی با استفاده از تئوری مد های کوپل شده بدست آمده است. شبیه سازی در محیط FDTD انجام شده است. همچنین تاثیر تحریک گرافن بر روی اثر شفافیت القائی پلاسمونیکی و جذب ساختار بررسی شده است. ساختار دارای جذب بسیار خوب بالای ۵۰٪ می‌باشد. علاوه بر این بررسی عملکرد نورکُند توسط آنالیز نمودار های ضریب شکست و شیفت فازی از ساختار مورد نظر نشان میدهد ساختار می‌تواند ضریب شکست گروهی خوب به مقدار ۵۳۰ را حاصل کند.



شکل۱) شماتیک و لایه های مختلف ساختار برای چهار سلول

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نور در راستای Y اعمال می شود.

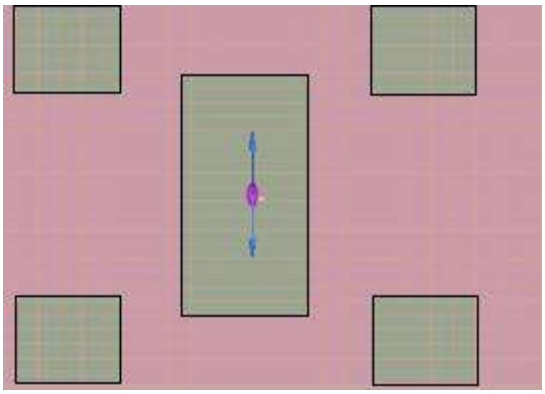
همچنین ولتاژ فرمی گرافن توسط پتانسیل بیرونی کنترل می شود.



شکل۲) لایه های گرافن برای مد های تاریک و روشن در روی یک سلول از ساختار

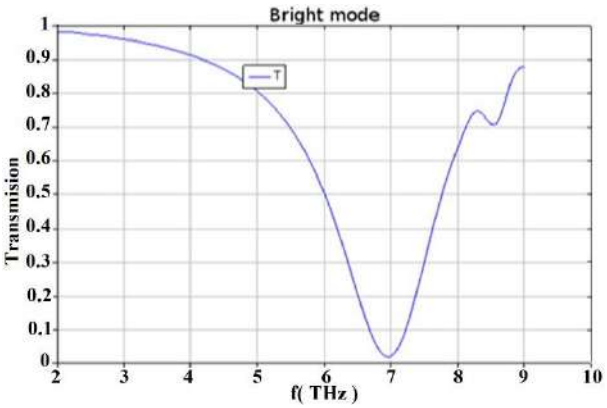
شبیه سازی

در این ساختار از هفت تکه گرافن تک لایه استفاده شده است. گرافن مرکزی با طول ۰.۲۵میکرومتر و عرض ۰.۸۵میکرومتر و چهار تکه کوچک گرافن به اندازه ۰.۷-۰.۹ میکرمتر در کنار هم مد روشن سیستم را تشکیل می دهند. همچنین دو تکه گرافنی که به صورت افقی در شکل فوق مشاهده می‌شود، هردو به طول ۱.۴میکرومتر و عرض ۰.۹ میکرومتر مد تاریک سیستم را نشان می دهد. یک موج قطبیده شده تخت در جهت منفی محورy به ساختار تابیده می‌شود. همچنین شرایط مرزی در جهت محورz-x پریودیک و در جهت محورyدارای جذب کامل است.



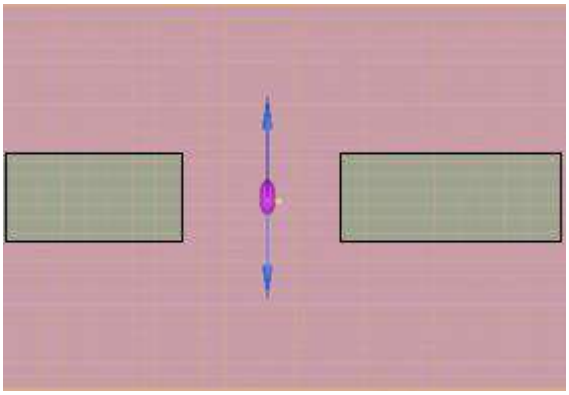
شکل ۳) لایه گرافن مربوط به مد روشن در یک سلول

مد روشن از سیستم در مقابل پرتو نور ورودی تحریک می‌شود. در مقابل مد تاریک صرفا با حضور مد روشن به سختی تحریک می‌شود. همچنین ولتاژ فرمی بلوک های گرافن از ۰.۷-۱.۴ الکترون ولت تنظیم شده است.



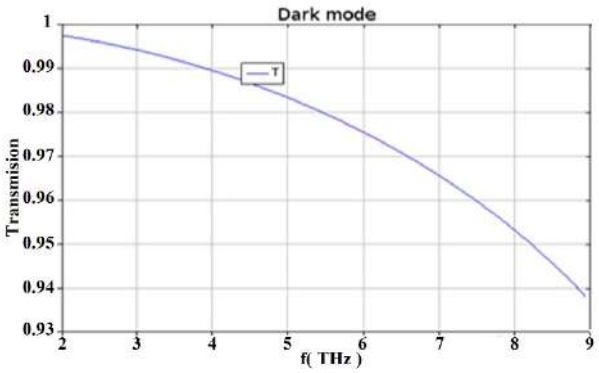
شکل ۴) تابع انتقال سیستم برای مد روشن. یک انتقال از سیستم در محدوده فرکانس هفت تراهرتز با مقدار جذب ۹۸٪ و یک انتقال در محدوده ۸.۵ تراهرتز با مقدار جذب ۲۰٪ حاصل می‌شود.

در ساختار پیشنهادی با کنار هم قرار دادن مد روشن و تاریک و بررسی اثر حضور این دو مد با استفاده از تئوری مد های کوپل شده، در اثر تداخل مخرب بین دو مد یک پدیده شفافیت القایی پلاسمونیکی رخ می‌دهد.



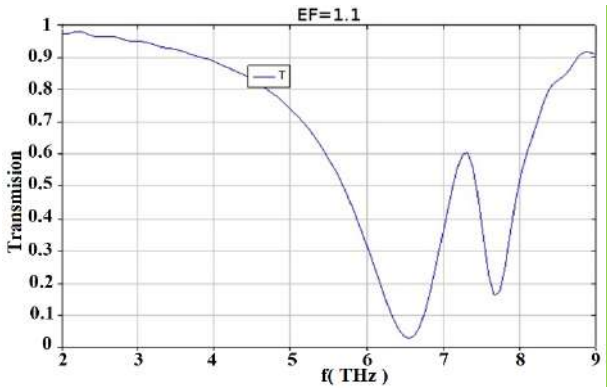
شکل ۵) لایه گرافن مربوط به مد تاریک در یک سلول

از همین رو پلاسمون پلاریتون های سطحی در داخل ساختار به شدت حبس می‌شوند. این حالت را میتوان به عنوان یک مد تابشی القا شده روشن در نظر گرفت که دارای یک طیف جذب بسیار خوب است.



شکل ۶) تابع انتقال سیستم برای مد تاریک. گرافن های تشکیل دهنده مد تاریک با پرتو نور ورودی به سختی تحریک می شوند.

این اثر را میتوان توسط ولتاژ فرمی گرافن در محدوده طیف کاری بدون تغییر شکل جابجا کرد.

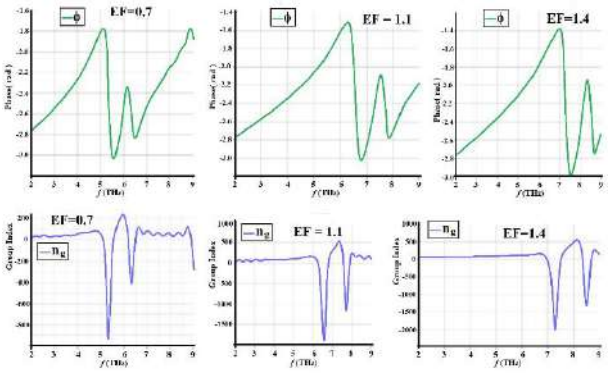


شکل ۷) نمودار انتقالی سیستم در حضور مد تاریک و مد روشن به ازای ولتاژ فرمی ۱.۱الکترون ولت.

زمانی که فرکانس نور قطبیده به محدوده فرکانس نور ورودی می‌رسد، برای نور قطبیده شده سطحی یک پاشندگی اتفاق می‌افتد. ازهمین رو ضریب شکست گروهی از سیستم دارای دو شیفت فازی بزرگ خواهد شد.

نتیجه گیری

در این تحقیق یک الگوی ساده از گرافن تک لایه را طراحی گردید. در این طراحی توسط ولتاژ فرمی گرافن می‌توان پدیده شفافیت اقائی پاسمونیکی را در محدوده طیف کاری جابجا کرد. تمامی تحلیل های مربوطه توسط تئوری مد های کوپل شده بدست آمده است. لذا نتایج شبیه سازی بسیار منطبق بر محاسبات عددی است.



شکل۷) اندازه و فاز سرعت گروه برای ولتاژهای مختلف فرمی گرافن.

های ضریب شکست گروهی مقدار ۵۳۰ را نشان می‌دهد که در شکل ۷ آورده شده است. از همین رو سیستم پاسخ نورکُند خوبی دارد. این کار موجب طراحی های متنوع در محدوده طیفی تراهرتز می‌شود.

مرجع‌ها

Liu, et al. “Slow Light Effect Based on Tunable Plasmon-Induced Transparency of Monolayer Black Phosphorus.” Journal of Physics D: Applied Physics 52, no. 40, 2019: 405203.

Gao, et al. “Dynamically Tunable Dual Plasmon-Induced Transparency and Absorption Based on a Single-Layer Patterned Graphene Metamaterial.” Optics Express 27, no. 10, 2019: 13884.

He et al. “Electromagnetically Induced Transparency and Slow Light in a Simple Complementary Metamaterial Constructed by Two Bright Slot-Structures.” Applied Physics A 116, no. 2, 2014: 799–804.

Gao, et al. “Dual Dynamically Tunable Plasmon-Induced Transparency in H-Type-Graphene-Based Slow-Light Metamaterial.” Journal of the Optical Society of America A 36, no. 8, 2019: 1306.

Xu, et al. “Novel Tunable Terahertz Graphene Metamaterial with an Ultrahigh Group Index over a Broad Bandwidth.” Applied Physics Express 11, no. 4, 2018: 042003.

Zhang, et al. “Absorption and Slow-Light AnalysisBased on Tunable Plasmon-Induced Transparency in Patterned Graphene Metamaterial.” Optics Express 27, no. 3, 2019: 3598.

Zhang, et al. “Plasmon-Induced Transparency in Metamaterials.” Physical Review Letters 101, no. 4 2008: 047401.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بهینه‌سازی چگالی نقص لایه‌های مختلف سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه‌ی قلع جهت افزایش بازدهی به‌وسیله‌ی نرم افزار اسکپس

عباسی دشتکی، احمد[۱]؛ قریشی، سید محمد باقر[۲،۱]؛ شریفی، نفیسه [۲،۱]

[۱]دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

[۲]پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

چکیده – امروزه، مواد پروسکایتی به علت داشتن ساختار مناسبی همچون پهنای باند مناسب، قیمت ارزان و تنوع، جهت بکارگیری در ساخت سلول خورشیدی مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این رو، افزایش بازدهی این نوع از سلول خورشیدی کمک شایانی به ارتقاء صنعت انرژی‌های خورشیدی تجدیدپذیر خواهد کرد. در این پژوهش، با تغییر چگالی نقص لایه‌های مختلف به وسیله‌ی نرم افزار شبیه‌ساز Scaps-1d بیشترین بازدهی که یک سلول خورشیدی پروسکایتی $FASnI_3$ در شرایط ایده‌آل تولید شده می‌دهد را ارائه خواهیم کرد.

کلید واژه- *پروسکایت، $FASnI_3$، شبیه سازی، Scaps-1d*

Optimization of defects density in different layers of Sn-based perovskite solar cell for efficiency enhancement by Scaps 1-D software

Abbasi Dashtaki, Ahmad[1]; Ghorashi, Seyed Mohammad Bagher[1,2]; Sharifi, Nafiseh[1,2]

[1]Physics Department, University of Kashan, 87317 Kashan, Iran
[2]Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, 87317 Kashan, Iran

Ahmadabbasi2015@yahoo.com/ Mghorashi@kashanu.ac.ir/ sharifi@kashanu.ac.ir

Abstract- Thesedays, Perovskite material due to having suitable structure such as, band gap appropriate, inexpensive and variety is noticeable for using in solar cell. There for, increasing efficiency this kind of solar cell, helping to improv industrial renewable solar cell energy. In this essay, with variation layers density of defect by Scaps 1-d simulation software will be expressed the highest efficiency which a Sn-based perovskite solar cell in produce under ideal situation.

Keywords: *perovskite, $FASnI_3$, simulation, Scaps_1d*

مقدمه

در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بر پایه‌ی سرب ((هالید منیل آمونیوم)) با فرمول شیمیایی $CH_3NH_3PbX_3$ به دلیل دارا بودن خواص استثنایی همچون، شکاف باند مناسب، تکنیک ساخت آسان و مهم‌تر از همه بازدهی بالا در سرتاسر جهان مورد توجه قرار گرفته است[۱]. در سال ۲۰۰۹، میزان بازدهی سلول خورشیدی پروسکایتی به مقدار ۳/۸ درصد گزارش شده بود[۲] که امروزه با توجه به اطلاعات گزارش شده، این مقدار به ۲۵/۲ درصد رسیده است. این مقدار افزایش بازدهی باعث گرایش محققان به سمت این‌گونه از سلول خورشیدی شده است.

وجود سرب موجود در این نوع از سلول‌های خورشیدی یکی از نگرانی‌های اصلی از منظر آلودگی‌های زیست محیطی است[۳]. اخیراً تلاش‌های قابل توجهی برای حذف این عنصر سمی از ترکیب سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انجام شده است. به همین منظور از ترکیباتی همچون یدید قلع فرمیدینیوم ($FASnI_3$)، یدید قلع سزیم($CsSnI_3$) و متیل آمونیوم یدید قلع($MASnI_3$) در ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی استفاده شده است[۴].

مطالعات تئوری زیادی برای کسب بهترین ساختار سلول خورشیدی با بازدهی مناسب صورت گرفته است . عواملی که باعث افزایش و یا کاهش مقدار بازدهی سلول خورشیدی می‌گردد می‌توان به ضخامت لایه‌ی جاذب و غلظت نقص‌های سطحی و داخلی اشاره کرد.

نقص عبارت است از وجود یک و یا چند اتم خارجی در یک ساختار شبکه‌ی منظم و جای‌گیری این اتم به جای اتم ذاتی در شبکه‌ی منظم ماده. از آنجایی که تمامی اتصالات شیمیایی و اتم ذاتی به صورت یک شبکه در کنار هم قرار گرفته‌اند با ورود این اتم یک حالت نقص در شبکه‌ی منظم اتفاق می‌افتد. بنابراین اضافه و یا کم شدن الکترونکه به روش های مختلف برانگیخته شده و به نوار رسانش رفته و یا از نوار ظرفیت جدا شده است، تولید بار الکتریکی آزاد می‌کند که این یک حالت نقص ساده در لایه‌های سلول خورشیدی است [۵].

علاوه بر چگالی نقص، تغییر ضخامت لایه‌ی جاذب نیز بر میزان جذب نور و جمع آوری حامل‌های بار می‌تواند اثر بگذارد [۵] به این علت که عملکرد سلول خورشیدی به این گونه است که در ابتدا با تابش نور به لایه‌ی جذاب، حامل‌های بار در این لایه تولید شده و سپس به علت اختلاف غلظت، این حامل‌ها به سمت دو لایه‌ی مجاور خود یعنی جمع کننده‌ی حفره و الکترون رفته و تحت میدان الکتریکی شارش جریان و تولید الکتریسیته اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش به بررسی چگالی نقص‌های سلول خورشیدی پروسکایتی $FASnI_3$ با شکاف باند ۱/۴ الکترون ولت می‌پردازیم و با بهینه‌سازی پارامتر چگالی نقص در لایه‌های مختلف این نوع از سلول خورشیدی بهترین پارامترها را برای بهبود عملکرد آن ارائه میدهیم.

مطالعه

شبیه سازی این مقاله به وسیله‌ی نرم افزار شبیه‌سازی Scaps 1-d انجام شده است. این نرم‌افزار توسط گروه تحقیقاتی دکتر برگلمن در دانشگاه Gent بلژیک توسعه یافته است. اساس محاسبات این نرم‌افزار سه معادله‌ی جفت شده‌ی: ۱- پیوستگی برای الکترون، ۲- معادلات پیوستگی برای حفره و ۳- معادله‌ی پواسون می‌باشد [۶].

سلول خورشیدی ارائه شده در این پژوهش به صورت $Glass/FTO/TiO_2/FASnI_3/Spiro\text{-}OMeTAD/Au$ طراحی شده است. که در آن FTO، Tinoxide آلایده شده با فلوئور است، TiO_2 به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون و Spiro-OMeTAD نیز به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره می‌باشد. در شکل ۱ شماتیک ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی بیان شده قابل مشاهده است. همچنین پارامترهای ورودی برای هر لایه شبیه‌سازی شده در جدول ۱ قابل مشاهده است [۷-۱۱]. اتصال پشتی از جنس طلا و دارای تابع کار ۵/ ۴ ev و سرعت نوترکیبی سطحی برای الکترون‌ها $1\times10^{5}s^{-1}$ و برای حفره‌ها $1\times10^{7}s^{-1}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: شماتیک ساختار سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده

جدول ۱ : پارامترهای شبیه‌سازی سلول خورشیدی پروسکایتی[۷-۱۰]

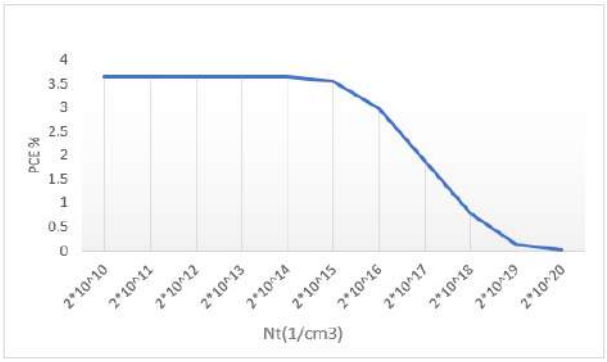
پارامتر	FTO	TiO_2	$FASnI_3$	Spiro-OMeTAD
ضخامت(nm)	۵۰۰	۳۰	۳۵۰	۲۰۰
انرژی باند E_g (eV)	۳/۵	۳/۲	۱/۴۱	۲/۸۸
الکترون خواهی χ (eV)	۴	۴	۳/۵۲	۲/۰۵
ضریب گذردهی دی الکتریک ε_r	۹	۹	۸/۲	۳
چگالی حالات موثر نوار رسانش N_c (cm^{-3})	$۲/۲\times۱۰^{۱۸}$	$۲/۲\times۱۰^{۱۸}$	$۲/۲\times۱۰^{۱۸}$	$۲/۲\times۱۰^{۱۸}$
چگالی حالات موثر نوار ظرفیت N_V (cm^{-3})	$۱/۸\times۱۰^{۱۹}$	$۱/۸\times۱۰^{۱۹}$	۱×۱۰^{۱۸}	$۱/۸\times۱۰^{۱۹}$
تحرک پذیری الکترون μ_n (cm^2/Vs)	۲۰	۲۰	۲۲	۲×۱۰^{-۴}
تحرک پذیری حفره μ_p(cm^2/Vs)	۱۰	۱۰	۲۲	۲×۱۰^{-۴}
چگالی ناخالص دهنده N_D (cm^{-3})	۲×۱۰^{۱۹}	۹×۱۰^{۱۶}	۰	۰
چگالی ناخالص پذیرنده N_A (cm^{-3})	۰	۰	۷×۱۰^{۱۶}	۲×۱۰^{۱۹}
چگالی ناخالص کلی Nt (cm^{-3})	۱×۱۰^{۱۵}	۱×۱۰^{۱۵}	۲×۱۰^{۱۵}	۱×۱۰^{۱۵}

تمامی شبیه‌سازی‌ها در روشنایی و به وسیله‌ی نور استاندارد AM 1.5G 1 Sun و تحت تابش انجام شده است. با اجرای شبیه سازی بر اساس پارامترهای بیان شده در جدول ۱ مقدار بازدهی سلول خورشیدی سه درصد می‌باشد.

نتایج و بحث

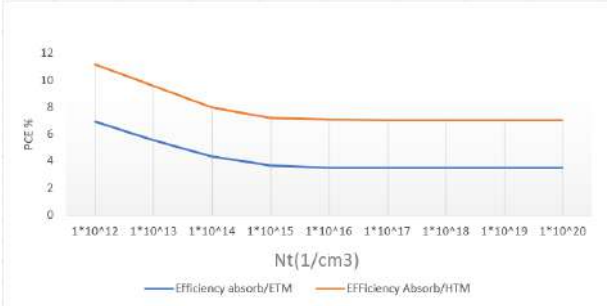
عملکرد سلول خورشیدی به گونه‌ای است که در ابتدا با تابش نور به لایه‌ی جاذب حامل‌های بار در این لایه تولید شده و سپس به علت اختلاف غلظت، این حامل‌ها به سمت دو لایه‌ی مجاور خود یعنی جمع کننده‌ی الکترون و حفره رفته و شارش جریان و تولید الکتریسیته اتفاق می‌افتد. بنابراین مقدار پارامتر چگالی نقص لایه‌ی جاذب و هم‌چنین میزان چگالی نقص سطحی بین دو لایه‌ی Absorb/HTL و ETL/Absorb می‌تواند بر روی مقدار بازدهی سلول خورشیدی تاثیر بگذارد.

در ابتدا تاثیر تغییر چگالی نقص در لایه‌ی جاذب را مورد بررسی قرار داده‌ایم. بر این اساس مقدار این چگالی نقص را از $۲\times۱۰^{۱۰}cm^{-۳}$ الی $۲\times۱۰^{۲۰}cm^{-۳}$ را تغییر داده‌ایم آنگاه مقدار بازدهی خروجی را به صورت نمودار ۱ بدست آورده شد.



شکل ۲ : تاثیر چگالی نقص‌های متفاوت در لایه‌ی جاذب بر بازدهی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی نرم‌افزار SCAPS

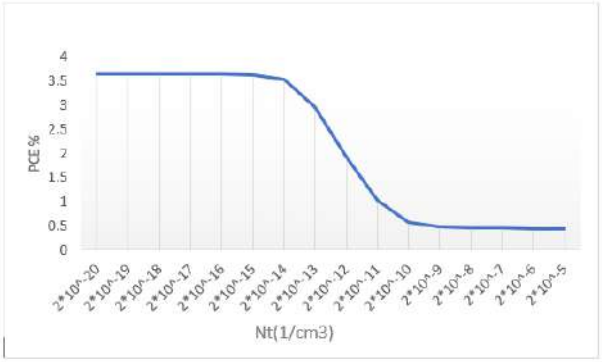
سپس تاثیر چگالی نقص در بین دو لایه‌ی جاذب و انتقال دهنده‌ی حفره و هم‌چنین لایه‌ی جاذب و انتقال دهنده‌ی الکترون را مورد بررسی قرار داده‌ایم. بر این اساس مقادیر این نقص را برای این لایه‌ها $۱\times۱۰^{۱۲}cm^{-۳}$ الی $۱\times۱۰^{۲۰}cm^{-۳}$ تغییر داده‌ایم. مقدار پارامتر بازدهی خروجی برای این بازه‌ی نقص در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳ : تاثیر چگالی نقص‌های متفاوت در بین لایه‌های(جاذب/ انتقال دهنده‌ی حفره- جاذب/ انتقال دهنده ی الکترون) بر بازدهی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی نرم‌افزار SCAPS

در نهایت تاثیر چگالی نقص سطح مقطع جذب را در لایه‌ی جاذب مورد بررسی قرار داده شد. بر این اساس تغییرات

مقادیر این نقص را از $2\times10^{-20}cm^{-3}$ الی $2\times10^{-5}cm^{-3}$ مورد بررسی قرار داده‌ایم. نتایج این تغییرات در نمودار ۴ قابل مشاهده است.



شکل ٤ : تاثیر چگالی نقص‌های متفاوت سطح مقطع لایه‌ی جاذب بر بازدهی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی نرم‌افزار SCAPS

بر اساس نمودارهای بالا مناسب‌ترین مقادیر غلظت چگالی‌ها به صورت جدول ۲ بدست آورده شد.

جدول۲ : پارامترهای بهینه شده‌ی چگالی نقص

نوع چگالی نقص	مقدار بهینه شده
لایه‌ی جاذب	$1\times10^{14}cm^{-3}$
سطح مقطع لایه‌ی جاذب	$2\times10^{-15}cm^{-3}$
لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون/ لایه‌ی جاذب	$1\times10^{12}cm^{-3}$
لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره/ لایه‌ی جاذب	$1\times10^{12}cm^{-3}$

پس از اعمال چگالی نقص‌های بدست آمده و انجام مجدد شبیه‌سازی میزان بازدهی سلول خورشیدی از ۳ درصد به ۹ درصد افزایش داشته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر چگالی نقص لایه‌های مختلف سلول خورشیدی بر پایه‌ی قلع بر میزان بازدهی خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بازدهی سلول خورشیدی معرفی شده وابسته به نقص‌های موجود در لایه‌های مختلف آن است و اگر در ساخت این نوع از سلول خورشیدی از لایه‌هایی که دارای چگالی نقص بر اساس جدول ۲ باشند استفاده شود به علت جذب بیشتر نور فرودی میزان بازدهی این سلول به ۹ درصد افزایش خواهد یافت.

مرجع‌ها

[1] Momblona, Cristina, Lidón Gil-Escrig, Enrico Bandiello, Eline M. Hutter, Michele Sessolo, Kay Lederer, Jan Blochwitz-Nimoth, and Henk J. Bolink. "Efficient vacuum deposited pin and nip perovskite solar cells employing doped charge transport layers." *Energy & Environmental Science* 9, no. 11 (2016): 3456-3463.

[2] Kojima, Akihiro, Kenjiro Teshima, Yasuo Shirai, and Tsutomu Miyasaka. "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells." *Journal of the american chemical society* 131, no. 17 (2009): 6050-6051.

[3] Babayigit, Aslihan, Anitha Ethirajan, Marc Muller, and Bert Conings. "Toxicity of organometal halide perovskite solar cells." *Nature materials* 15, no. 3 (2016): 247-251.

[4]Abuhelaiqa, Mousa, Sanghyun Paek, Yonghui Lee, Kyung Taek Cho, Sung Heo, Emad Oveisi, Aron Joel Huckaba et al. "Stable perovskite solar cells using tin acetylacetonate based electron transporting layers." *Energy & Environmental Science* 12, no. 6 (2019): 1910-1917.

[5] Lutz, G. "Effects of deep level defects in semiconductor detectors." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 377, no. 2-3 (1996): 234-243.

[6] Burgelman, Marc, Peter Nollet, and Stefaan Degrave. "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells." *Thin solid films* **361** (2000): 527-532

[7] Koh, Teck Ming, Thirumal Krishnamoorthy, Natalia Yantara, Chen Shi, Wei Lin Leong, Pablo P. Boix, Andrew C. Grimsdale, Subodh G. Mhaisalkar, and Nripan Mathews. "Formamidinium tin-based perovskite with low E g for photovoltaic applications." *Journal of Materials Chemistry A* 3, no. 29 (2015): 14996-15000.

[8] Hima, Abdelkader, Nacereddine Lakhdar, Boubaker Benhaoua, Achour Saadoune, Imad Kemerchou, and Fatiha Rogti. "An optimized perovskite solar cell designs for high conversion efficiency." *Superlattices and Microstructures* 129 (2019): 240-246.

[9] Abdelaziz, Saied, A. Zekry, Ahmed Shaker, and M. Abouelatta. "Investigating the performance of formamidinium tin-based perovskite solar cell by SCAPS device simulation." *Optical Materials* 101 (2020): 109738.

[10] Niemegeers, Alex, and Marc Burgelman. "Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells." In *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1996*, pp. 901-904. IEEE, 1996.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

ساخت روی هیدروکسی کینولین با استفاده از سورفکتانت ستیل تری متیل آمونیوم برماید برای کاربرد در دیود های نورگسیل آلی

زهرا شیخی زازرانی،محمدرضا جعفری ،عزالدین مهاجرانی و کوروش رحیمی

zahraaa22071375@gmail.com , mo.jafari@alzahra.ac.ir, e-mohajerani@sbu.ac.ir , k.rahimi@alzahra.ac.ir

چکیده – نانو ذرات روی هیدروکسی کینولین(Znq_2) با گسیلندگی بالا با روش هم رسوبی به شکل خالص و با سورفکتانت کاتیونی ستیل تری متیل آمونیوم برومایدسنتز شدند.گروه های عاملی ذرات با استفاده از طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه تایید شد.شکل و اندازه ی نانو ترکیب ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.خواص نوری ذرات با استفاده از طیف سنجی فوتولومینسانس مورد مطالعه قرار گرفت واین نانو ذرات برای کاربرد در دیودهای نورگسیل آلی به عنوان لایه‌های گسیل و انتقال الکترون بررسی شد.

کلید واژه- دیودهای نورگسیل آلی، روی هیدروکسی کینولین, فوتولومینسانس

Synthesis of Znq_2 nanocomplex using CTAB surfactant for application in organic light-emitting diodes

Zahra sheikhi zazerani ,Mohammadreza Jafari , Ezeddin Mohajerani , Kourosh Rahimi

Sheikhi.zahra@yahoo.com , mo.jafari@alzahra.ac.ir, e-mohajerani@sbu.ac.ir , k.rahimi@alzahra.ac.ir

Abstract- Zinc hydroxyquinoline (Znq_2) nanoparticles with high luminescence were synthesized by coprecipitation method in pure form and with cationic surfactant of cetyltrimethylammonium bromide . The functional groups of the particles were confirmed using Fourier transform infrared spectroscopy . The shape and size of the nanocomplexes were checked using scanning electron microscope images. The optical properties of the particles were studied using photoluminescence spectroscopy and these nanoparticles were studied for use in organic light-emitting diodes (OLEDs) as emission and electron transport layers.

Keywords: OLED, Znq_2, Photoluminescence, nanocomplex

۱. مقدمه

Znq_2 یک ترکیب فلزی آلی است که برای استفاده در دیودهای نورگسیل آلی (OLED) سنتز شده است. Znq_2یکی از مواد معدنی فلورسنت است که در معرض نور ماوراء بنفش ، نورمرئی از خود ساطع می کند[۱] .هنگامی که یک الکترون با جذب یک فوتون پرانرژی (نور با طول موج کوتاه) از حالت پایه به سطح انرژی بالاتر برانگیخته می شود، تمایل دارد با گسیل یک فوتون انرژی خود را از دست بدهد و به حالت پایه برگردد. تحقیقات اخیر نشان داده است که Znq_2 دارای خواص موجبری و لیزری قوی است که آن را به ماده ای امیدوارکننده برای توسعه دستگاه های فوتونیک کوانتومی و همدوس تبدیل می کند. خواص نوری، حرارتی و الکتریکی پودرهای Znq_2 برای کاربرد در OLED ها ارزیابی شده است. نتایج این کار نشان می‌دهد که Znq_2 یک ماده امیدوارکننده برای OLED با کارایی بالا وهمچنین به عنوان یک ماده انتقال دهنده در(OLED) به دلیل خواص عالی انتقال الکترون آن استفاده می شود که این به دلیل همپوشانی بهتر π-π اوربیتال های مولکولی مشتقات روی است. گسیلندگی ترکیب های آلی- فلزی به دلیل انتقال الکترون بین اوربیتال های فلزی و لیگاندی است[۳]. تفاوت انرژی بین حالت برانگیخته و پایه ترکیب ، طول موج نور ساطع شده را تعیین می کند. خواص گسیلندگی ترکیب های آلی فلزی را می توان با اصلاح ساختار لیگاند، فلزمرکزی و عوامل محیطی تنظیم کرد[۳]. سورفکتانت ها مولکول هایی هستند که دارای هر دو گروه آبگریز و آب دوست هستند که آنها را برای تثبیت امولسیون ها و سوسپانسیون ها مفید می کند. هنگامی که سورفکتانت ها به یک محلول اضافه می شوند، می توانند با فلز مرکزی تعامل کنند و خواص الکترونیکی و فضایی ترکیب را تغییر دهند. این می تواند بر واکنش پذیری و پایداری ترکیب و همچنین حلالیت و پراکندگی آن در حلال های مختلف تأثیر بگذارد. ماهیت و میزان این تغییرات به سورفکتانت خاص مورد استفاده، غلظت سورفکتانت و ساختار ترکیب آلی- فلزی بستگی دارد. افزودن سورفکتانت‌ها می‌تواند شدت نور را با افزایش حلالیت و پراکندگی ترکیب افزایش دهد، که می‌تواند منجر به گسیل نور بهتر شود[۳].

دراین پژوهش به سنتزZnq_2 وZnq_2:CTAB پرداختیم واثرات اضافه کردن سورفکتانت ستیل تری متیل آمونیوم برماید(CTAB) را بررسی کردیم.

۲. بخش تجربی

۲-۱ . مواد

روی نیترات $Zn(No_3)_2.6H_2O$ ،*هیدروکسی کینولین* $C_9H_6NO(HQ)$ ، *که همگی از برند* Merck *هستند به عنوان ماده اولیه استفاده شد. ستیل تری متیل آمونیوم برماید(*CTAB*) به عنوان سورفکتانت استفاده شد.*

۲-۲. ساخت نانو ترکیب Znq_2

ذرات Znq_2 به روش همرسوبی با استفاده از روی نیترات ، هیدروکسی کینولین در نسبت استوکیومتری ۲:۱ سنتز شدند. ۱.۱۵۵ گرم روی نیترات۶ آبه را در۱۰۰میلی لیتر آب دیونیزه به مدت یک ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی همگن شد. ۱.۲۸۲گرم هیدروکسی کینولین را در۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه و ۴ میلی لیتر استیک اسید به مدت یک ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی همگن شد. محلول هیدروکسی کینولین به صورت قطره ای به محلول روی نیترات اضافه شد و به مدت یک ساعت همزده شد تا محلول یکنواخت بدست آید. سپس ۴ میلی لیتر آمونیاک قطره قطره به محلول حاصل اضافه شد رسوب زرد رنگ بلافاصله ایجاد شد رسوب با سانتریفیوژ با دور ۳۰۰۰دور در دقیقه جدا شد سپس رسوب به مدت ۶ساعت در آون خلاء خشک شد.

۲-۳. ساخت نانوترکیب Znq_2:CTAB

ذراتZnq_2: CTAB به روش همرسوبی با استفاده از روی نیترات ، هیدروکسی کینولین و ستیل تری متیل آمونیوم برمایدCTAB در نسبت استوکیومتری ۱:۲:۱ سنتز شدند. **۱.۱۵۵** گرم روی نیترات ۶آبه را در۱۰۰میلی لیتر

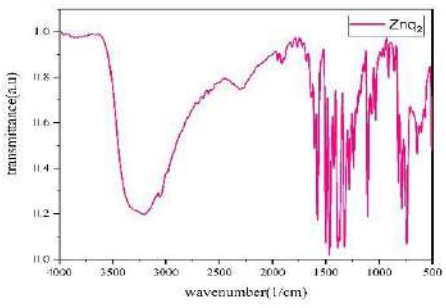
آب دیونیزه به مدت یک ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی همگن شد۰.۰۳۴۳۵گرم ستیل تری متیل آمونیوم برمید را در ۲۰میلی لیتر آب دیونیزه به مدت یک ساعت استفاده از همزن مغناطیسی همگن شد. ۱.۲۸۲ گرم هیدروکسی کینولین را در۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه و۴ میلی لیتر استیک اسید به مدت یک ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی همگن شد. سپس محلول CTAB به صورت قطره قطره به محلول روی نیترات اضافه شد و به مدت بیست دقیقه همزده شد تا محلول یکنواخت بدست آید. محلول هیدروکسی کینولین به صورت قطره ای به محلول روی نیترات و CTAB اضافه شد و به مدت یک ساعت همزده شد تا محلول یکنواخت بدست آید سپس ۴ میلی لیتر آمونیاک قطره قطره به محلول حاصل اضافه شد. رسوب زرد رنگ بلافاصله ایجاد شد. رسوب با سانتریفیوژ با دور ۳۰۰۰دور در دقیقه جدا شد سپس رسوب به مدت ۶ساعت در آون خلاء خشک شد.

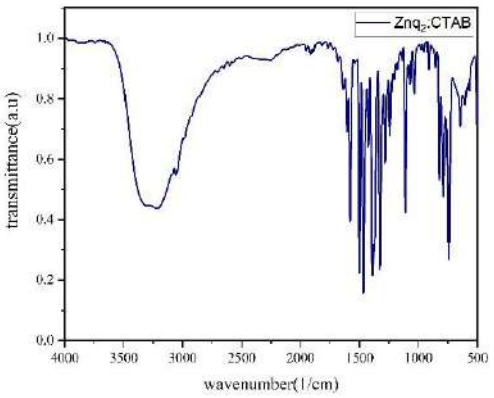
۳ . شناسایی

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) ، میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) ، فوتولومینسانس(PL) مورد مطالعه قرار گرفت. طیف فروسرخ در گستره ی $۴۰۰۰-۲۰۰cm^{-1}$ با Shimadzu 470 FT-IR با استفاده از قرصKBr ثبت شد. طیف PL با استفاده از لیزر ۴۰۵ نانومتر تحریک شد. تصاویر FESEM نانو ترکیب با دستگاه مدلFE-SEM HV:300 گرفته شد.

۳-۱. بررسی طیف های FTIR

طیف FT-IR از نانو ترکیب های Znq_2 و $Znq_2:CTAB$ در شکل ۱ نشان داده شد.



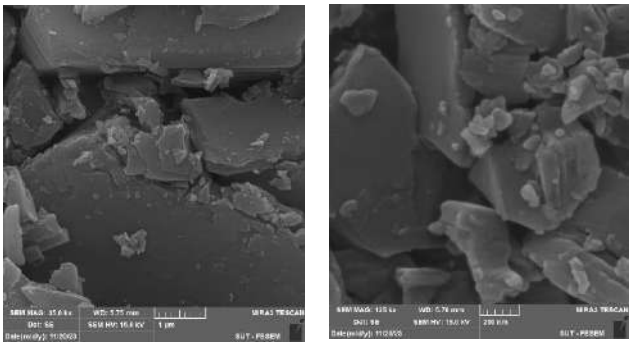


شکل ۱: طیف FT-IR نانو کمپلکس های Znq_2و $Znq_2:CTAB$

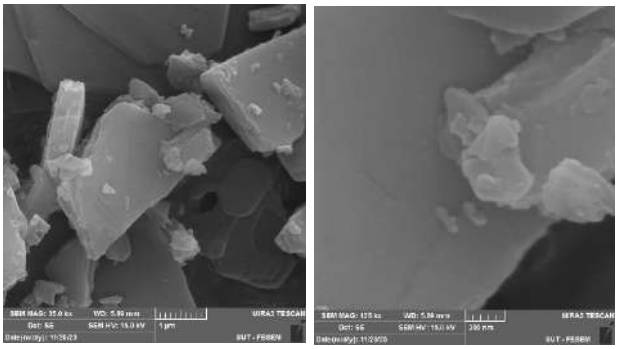
برای ارتعاشات در $۱۳۰۰cm^{-1}$ تا ۱۶۰۰ مربوط به گروه کینولین است. باند های اتصالی ارتعاشی $۱۴۶۶cm^{-1}$و۱۴۹۹ مربوط به هر دو گروه پریدیل و فنیل وقله ها در گستره ی $۷۴۲ cm^{-1}$ و۶۰۶ مربوط به از بین رفتن حلقه های بین صفحه ها و باندهای اتصالی ارتعاشی در گستره بی$۵۰۰cm^{-1}$ن تا ۶۰۰ مربوط به پیوند فلزی با اکسیژن ونیتروژن است. قله های جذبی در$۳۰۵۸ cm^{-1}$ و۳۲۱۵ مربوط به حضور مدهای ارتعاشی گروه متیل است که حضور CTAB در نانو ترکیب را تایید می کند.[۱].

۳-۲ . بررسی تصاویرمیکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با دو بزرگنمایی از نانو کمپلکس Znq_2 و $Znq_2:CTAB$ در شکل ۲ و۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ترکیب Znq_2

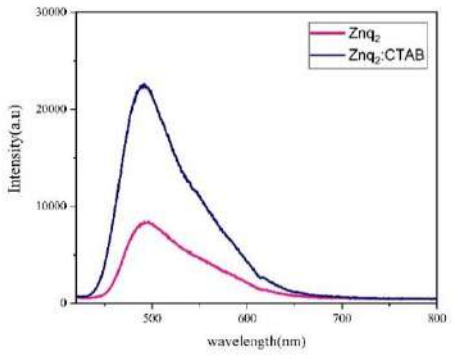


شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ترکیب $Znq_2:CTAB$

ماهیت لایه لایه ای ساختار Znq_2 و $Znq_2:CTAB$ درتصاویر مشهود است. کاهش ضخامت صفحات و نانوساختار شدن کمپلکس شدن کمپلکس $Znq_2:CTAB$ نسبت به کمپلکس Znq_2 بدون استفاده ازماده فعال در سطح متاثرازCTAB است که ممکن است روی روند هسته زایی ورشد بلوری در طول ساخت تاثیر گذاشته باشد.[۱]

۳-۳ . بررسی طیف های فوتولومینسانس

طیف های فوتولومینسانس از نانوترکیب های ZnQ2 و $Znq_2:CTAB$ باطول موج تحریک۴۰۵ نانومتر در شکل ۳نشان داده شده است . بیشینه شدت فوتولومینسانس مربوط به $Znq_2:CTAB$ و Znq_2 و به ترتیب ۴۹۹و۴۹۸ نانومتردر گستره ی نور آبی مایل به سبزاست که برای ساخت دیود های نورگسیل آلی برای نمایشگرهای فلورسنت کریستال مایع و برنامه های نوردهی حالت جامد مناسب است . افزایش شدت نورتابی Znq_2 را با اضافه کردن سورفکتانتCTAB مشاهده کردیم.



شکل ۴: طیف فوتولومینسانس Znq_2و$Znq_2:CTAB$

.نتیجه گیری

در این مطالعه روش همرسوبی برای ساخت نانو ترکیب Znq_2و$Znq_2:CTAB$ ارائه شد. ویژگی های نانو ترکیب ها توسط آنالیز های FTIR ، PL, FESEM بررسی شدند. نتایج FTIR تشکیل حلقه کینولین و حضور سازنده های کینولین را دراین کمپلکس های فلزی تایید کرد.اضافه کردن سورفکتانت CTAB باعث نانوساختار شدن کمپلکس ها و افزایش شدت نورتابی شده است. نتایج نشان داد ترکیب های آلی-فلزی Znq_2 از نظر ویژگی نوری عالی بوده که نه تنهابرای کاربردهای دیود های نورگسیل آلی،همچنین برای نمایشگر های نیز قابل استفاده هستند.

۵ . مرجع‌ها

[1] Bharathi Devi, V., Arulmozhichelvan, P. and Murugakoothan, P., 2017. Synthesis and characterization of Znq2 and Znq2: CTAB particles for optical applications. *Bulletin of Materials Science*, *40*, pp.1049-1053.

[2] Shahedi, Z., Zare, H. and Sediqy, A., 2021. Manufacturing of nanoflowers crystal of ZnQ 2 by a co-precipitation process and their morphology-dependent luminescence properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *32*, pp.6843-6854.

[3] Shahedi, Z., Jafari, M.R. and Zolanvari, A.A., 2017. Synthesis of ZnQ 2, CaQ 2, and CdQ 2 for application in OLED: optical, thermal, and electrical characterizations. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *28*, pp.7313-7319.

[4] Mabrouk, M.M., Hamed, N.A. and Mansour, F.R., 2022. Physicochemical and electrochemical methods for determination of critical micelle concentrations of surfactants: A comprehensive review. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, *153*(2), pp.125-138

[5] Bauri, J., Choudhary, R.B. and Mandal, G., 2021. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: a review. *Journal of Materials Science*, pp.1-30.

[6] He, G., 2015. Organic Semiconductor Electroluminescent Materials. *Organic Optoelectronic Materials*, pp.241-302.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

شبیه سازی و طراحی دیود تمام نوری غیرخطی دو کاواکی با استفاده از بلور فوتونی یک بعدی با عملکرد در پهنای فرکانسی زیاد و محدوده وسیعی از شدت ورودی

محمود حسینی فرزاد*، مژده جان فدا

دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

*hosseinif@shirazu.ac.ir

Mozhde.janfada@gmail.com

چکیده – انتشار نور در ساختار نامتقارن چند لایه، متشکل از یک بلور فوتونی خطی که دارای دو کاواک و یک لایه غیرخطی درون هر کاواک است به طور نظری بررسی شده است. این ساختار به علت عدم تقارن در تعداد لایه‌ها و عدم تقارن در ضخامت کاواک‌ها و لایه غیرخطی ساختار می‌تواند باعث عبور یکسویه و در نتیجه دیود نوری شود. پهنای عملکردی این ساختار در ناحیه فرکانس و در ناحیه شدت نور وارد شده زیاد می باشد که مشکل حساسیت موارد پیشین را بهبود میبخشد.

کلید واژه- دیود نوری ، اثرات غیرخطی، دوپایداری، بلورفوتونی.

Simulation and design of a broad bandwidth nonlinear all-optical diode by using two cavity 1D- photonic crystal

***Mahmood Hosseini farzad, Mozhdeh Janfada**

Department of Science, Faculty of Physics, Shiraz University

***hosseinif@shirazu.ac.ir**
Mozhde.Janfada@gmail.com

Abstract- Light propagation in an asymmetric multilayered structure, composed of two nonlinear defective photonic crystal, is theoretically investigated. Because of asymmetry in the number of layers, thickness of defect layers and nonlinear layer this structure can provide non-reciprocal transmission to achieve an optical diode. This structure was optimized in order to have a broad band optical diode in the frequency range and broad input intensity compare to other works and it improve sensitivity problems.

Keywords: Optical diode, Nonlinearity, Bistability, Photonic crystal

مقدمه

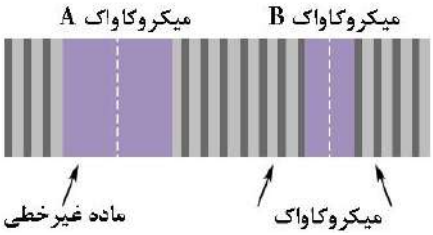
با پیشرفت روز افزون فنآوری، ضروری است که ذخیره سازی و مخابرات داده‌ها با سرعت و حجم بیشتری انجام شود. ابزارهای الکترونیکی در سرعت و پهنای نواری انتقال اطلاعات محدود هستند و اتلاف انرژی زیادی دارند. بنابراین نیاز به جایگزینی ابزارهای الکترونیکی وجود دارد و نور گزینه مناسبی برای این جایگزینی است چرا که نور دارای سرعت بالایی است، پهنای نواری وسیع و اتلاف کمی دارد. یکی از ابزارهای مورد نیاز در مخابرات نوری، دیود نوری است.

در سامانه‌های تار نوری، اتصالات و ابزارهای نوری در خروجی فرستنده قرار دارند و می‌توانند باعث بازتاب، شکست و پراکندگی سیگنال نوری شوند، که ممکن است سبب بازگشت نور به منبع شود و عملکرد منبع را مختل کند. به منظور کاهش اثرات تداخل در سامانه‌های تار نوری به دیود نوری نیازمندیم. این وسیله انتشار نور از یک سمت را قطع می‌کند و مشکلات ناشی از بازتاب ناخواسته را حذف می‌کند و پتانسیل فراوانی جهت کاربرد در مخابرات نوری و پردازش اطلاعات دارد.

طراحی دیود نوری

برای طراحی دیود نوری بعضی از پدیده‌های فیزیکی مانند مغناطیس نوری[۱] ، بلورهای مایع [۲]و اثر غیرخطی کِر[۳] مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، اثر غیرخطی کِر ویژگی‌های مناسبی برای طراحی دیود نوری دارد. یکی از این ویژگی‌های اثر کِر دوپایداری نوری است، که دو حالت پایدار در خروجی به ازای یک شدت ورودی می‌تواند وجود داشته باشد. از این پدیده در طراحی دیود نوری می‌توان استفاده کرد[۶]. ضریب شکست ماده‌ی دارای خاصیت غیرخطی کِر به شدت نور درون ماده وابسته است، $n = n_0 + n_2 I$ ، n_0 ضریب شکست خطی، n_2 ضریب شکست غیرخطی(که به پذیرفتاری مرتبه سوم وابسته است) و I نشان دهنده شدت نور در محیط غیر خطی است. با تغییر شدت، راه نوری و بنابراین شرایط تشدید در ساختار چند لایه یک بعدی تغییرخواهد کرد[۵].

برای کنترل و افزایش برهمکنش نور با ماده‌ی غیرخطی از یک بلور فوتونی یک بعدی استفاده می‌کنیم. ساختار مورد بررسی ما از دو کاواک فابری پرو تشکیل شده است. تعداد لایه های بِرگ ساختار فابری پروی اول را P_a و ضخامت لایه نقص مرکز فابری پروی اول را $۲m_a\lambda_{Phc}/(۴n_D)$ ، و تعداد لایه های بِرگ ساختار فابری پروی دوم را P_b و ضخامت لایه نقص مرکز فابری پروی اول را $۴m_b\lambda_{Phc}/(۴n_D)$در نظر می‌گیریم. که n_D ضریب شکست ماده غیرخطی است. ساختار مورد استفاده را با شکل (۱) نمایش می‌دهیم.



شکل(۱): نمای شماتیک ساختار .

از سیلیکا ($SiO_۲$) به جای ماده‌ی A با ضخامت d_A و دی اکسید تیتانیوم به جای ماده‌ی B با ضخامت d_B در رابطه‌ی (۱) استفاده کرده‌ایم ($n_A = ۱/۴۷$ و $n_B = ۲/۳$) و ماده‌ی D ماده‌ی غیرخطی پلی‌دیاکتیلن با ضریب شکست خطی $n_D =$ ۱/۵۶، ضخامت d_D و ضریب شکست غیرخطی $n_{2D} =$

$\frac{cm^2}{MW}$ ۱۰$^{-۵}$ است. ساختار را برای کار در طول موج λ_{Phc} = ۱۵۵۰ nm [۳۳] طراحی می‌کنیم. بطوریکه:

$$n_A d_A = n_B d_B = n_D d_D = \lambda_{Phc}/4 \quad (۱)$$

فرض کرده‌ایم این ساختار در ماده‌ای همگن با ضریب شکست یک قرار گرفته است و پرتو نور با طول موج λ به طور عمودی در جهت z از فضای آزاد به سطح چند لایه‌ای می‌تابد. شدت پرتو نوری که در فضای آزاد به ساختار می‌تابد شدت فرود نامیده می‌شود. ساختار بلور فوتونی یک گاف فوتونی در فرکانس $\frac{2\pi c}{\lambda_{Phc}}$ دارد.

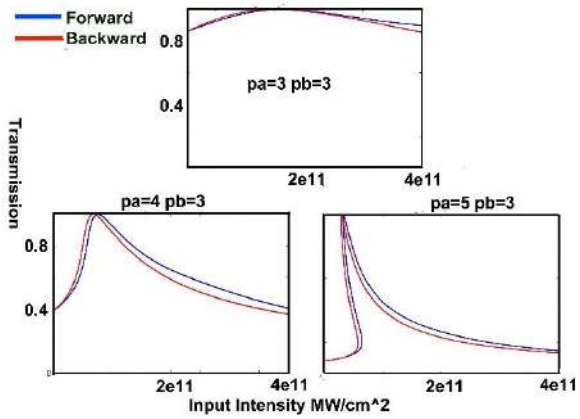
طیف عبور بوسیله‌ی روش ماتریس خطی و غیرخطی محاسبه می‌شود. ماتریس انتقال j امین لایه با ضریب شکست n_j، ضخامت d_j و عدد موج k_j برای امواج الکترومغناطیس با قطبش TE به صورت زیر است[۵].

$$M_j = \begin{bmatrix} cos(k_j d_j) & \frac{-i}{n_j} sin(k_j d_j) \\ -i n_j sin(k_j d_j) & cos(k_j d_j) \end{bmatrix} \quad (۲)$$

پس از انجام محاسبات، عبور $T = \left|\frac{E_{out}}{E_{in}}\right|^2$، بدست می‌آید.

بررسی خصوصیات هندسی ساختار

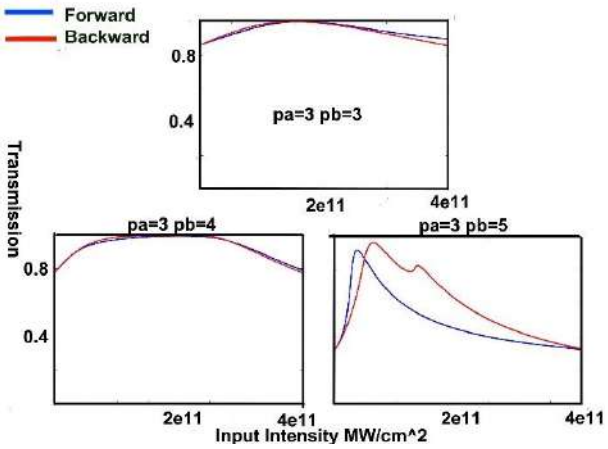
در ابتدا ضخامت های لایه غیر خطی D در دو قسمت را برابر با هم در نظر می گیریم(m_a = ۵ m_b = ۵). در ابتدا گرافن را در ساختار وارد نمی‌کنیم. نمودارهای عبور را در یک طول موج خاص و شدت نورهای تابشی متغیر برای تعداد لایه‌های برگ متفاوت رسم می‌کنیم. خط قرمز نمایانگر طیف عبور غیرخطی در شرایطی است که نور از سمت راست به ساختار شکل(۱)



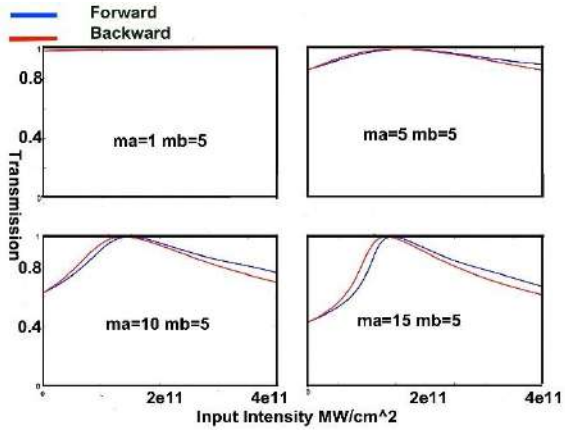
شکل(۲): حلقه‌ی پسماند شدت در تعداد متفاوت P_a. $(m_a = ۵, m_b = ۵, P_b = ۳, P_a = ۳,۴,۵)$.

تابیده است و خط آبی نمایانگر طیف عبور غیرخطی در شرایطی است که نور از سمت چپ به ساختار شکل (۱) تابیده است.عبور نور پس رونده ظاهر می‌شود. در این حالت نیز با افزایش لایه‌های برگ قله عبور باریکتر و تفاوت عبور نور پس رونده و پیش رونده بیشتر می‌شود که این رویداد در نتیجه افزایش اثرات غیرخطی است. توجه شود که در این شرایط، حالت P_a = ۳ و P_b = ۴ نیز پهنای مناسبی دارد.

[33] Phc مخفف Photonic crystal معادل با بلور فوتونی است.

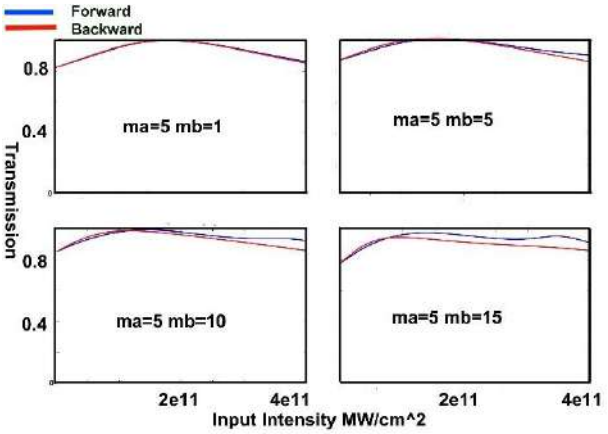


شکل(۳) :حلقه‌ی پسماند شدت در تعداد متفاوت P_b.
$(m_a = ۵, m_b = ۵, P_a = ۳ و P_b = ۳،۴،۵)$



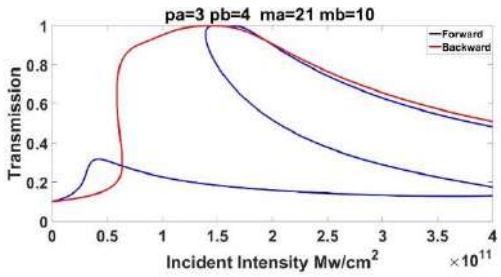
شکل (۴): حلقه‌ی پسماند شدت در تعداد متفاوت m_a.
$(P_a = P_b = ۳, m_b = ۵, m_a = ۱،۵،۱۰،۱۵)$

برای ادامه‌ی کار در مورد $P_a = ۳$ و $P_b = ۳$ ضخامت لایه‌ی غیر خطی میانی را تغییر می‌دهیم(m_b و m_a). انتظار داریم با افزایش ضخامت لایه‌های m_a و m_b خاصیت غیر خطی افزایش یابد و تفاوت عبورهای پیش رونده و پس رونده بیشتر شود. به این ترتیب که ابتدا m_b را ثابت در نظر گرفته و m_a را تغییر می‌دهیم. با ثابت بودن m_b و افزایش m_a ، پهنای قله‌ی عبور کاهش می‌یابد و تفاوت دو طیف عبور پیش رونده و پس رونده بیشتر می‌شود. در حالتی که m_b ثابت است و m_a افزایش می یابد، با افزایش m_a جدایی دو نمودار عبور پیش رونده و پس رونده افزایش می‌یابد این در حالی است که پهنای نمودار تغییر قابل توجهی ندارد.



شکل (۵): حلقه‌ی پسماند شدت در تعداد متفاوت m_b.
$(m_a = ۵ و m_b = ۱،۵،۱۰،۱ \; P_a = P_b = ۳)$

یک حالت با پهنای مناسب و تفاوت قابل قبول میان طیف عبور پیش رونده و پس رونده در حالت $P_a =$ و ۴ $= P_b$ و $m_a =$ ۲۱ و ۱۰ $= m_b$ اتفاق می‌افتد. ما نمودار عبور بر حسب شدت فرودی را برای این حالت در شکل (۶) رسم کرده ایم و در ادامه‌ی کار طیف عبور در طول موج‌های مختلف را برای این مورد شکل (۷) رسم نمودیم.

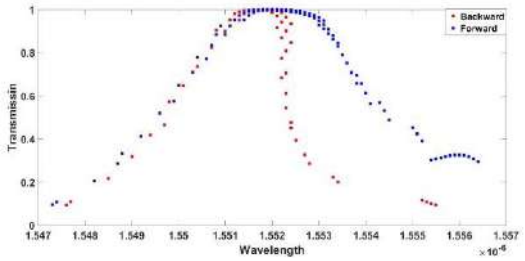


شکل(۶): حلقه‌ی پسماند شدت برای مورد $P_a =$ ۳ و $P_b =$ ۴ و $m_a =$ ۲۱ و $m_b =$ ۱۰.

نتیجه گیری

در شکل(۶) مشاهده می شود که که در اطراف طول موج ۱۵۵۰ نانومتر در محدوده شدت نور ۶/۷ × ۱۰^{۱۰} $\frac{W}{m^2}$ تا ۱/۴ × ۱۰^{۱۱} $\frac{W}{m^2}$ که پهنای ۷/۳ × ۱۰^{۱۰} $\frac{W}{m^2}$ را دارد طیف قرمز عبور زیادی درر حالی که طیف آبی عبور کمی دارد و خاصیت دیودی دیده می شود. این همان خاصیت دیودی است که ما به دنبال ایجاد آن هستیم. پهنای عملکرد دیود در ناحیه شدت نیز پهنای مناسبی است. شکل(۷) عبور بر حسب طول موج در شدت

$\frac{W}{m^2}$ ۱۰^۱۱ × ۱ را نشان می‌دهد. پهنای طول موجی عملکرد حدود ۲ نانومتر است.



شکل(۷): طیف عبور برای مورد ۳ = P_a و ۴ = P_b و m_a = ۲۱ و ۱۰ = m_b.

سپاسگزاری

با سپاس از صندوق حمایت از پژوهشگران که حامی مالی این پژوهش با کد طرح ۴۰۰۴۷۸۶ بودند.

مرجع‌ها

[1] J. Fujita, M. Levy, R.M. Osgood, L. Wilkens, H. D¨otsch, "Waveguide optical isolator based on Mach–Zehnder interferometer", App. Phys. Lett.,V. 76 ,2000.

[2] J. Hwang, M.H. Song, B. Park, S. Nishimura, T. Toyooka, J.W. Wu, Y. Takanishi, K. Ishikawa, H. Takezoe,” Electro-tunable optical diode based on photonic bandgap liquid-crystal heterojunctions”, Nature Materials,V. 4,pp. 383–387, 2005.

[3] M. Scalora, J.P. Dowling, C.M. Bowden, M.J. Bloemer, “The photonic band edge optical diode”, J. Appl. Phys., V. 76 ,1994.

[4] R.W. Boyd, Nonlinear Optics, ACADEMIC PRESS 2003.

[5] P. Yeh, Optical Waves in Layered Media, Wiley 2005.

[6] M. Janfada, M. Malekmohammad, M. Soltanolkotabi, “Design of high-efficiency small-size passive all-optical diodes based on photonic crystal and graphene”, Journal of the Optical Society of America B,V. 38, pp. 1748-1758,2019.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی اثر زاویه ناهم‌راستایی و تغییر شکل آینه‌ها بر توزیع شدت میدان و الگوی فازی میدان دور تشدیدگر ناپایدار هم‌کانون برای لیزر گازکربنیک نوع TEA

علی میرحیدری[۱]، رضا ترابی[۲]، محمد ثاقب‌فر[۳]، معصومه مهری تلیابی[۴]

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع علوم کاربردی، شاهین شهر

alimirheydari1376@gmail.com, [۲]r.torabi@yahoo.com [۳]saghebfar2017@gmail.com, [۱] [۴]masoumeh.mehri1376@gmail.com.

چکیده-در این مقاله به بررسی اثر زاویه ناهم‌راستایی و تغییر شکل مربعی به مستطیلی آینه‌ها در تشدیدگر ناپایدار هم‌کانون شاخه مثبت برای لیزر گازی دی اکسید کربن نوع فشار جوی برانگیخته عرضی، جهت بررسی تغییر توزیع شدت میدان دور و انتشار بهتر پرتوی خروجی در راستای ارتقاء پارامترهای کیفیت پرتوی خروجی لیزر گازی ساخته شده با استفاده از روش شبیه‌سازی تبدیل فوریه‌ی سریع پرداخته شده است. همچنین بررسی تغییرات عدد فرنل معادل و بزرگنمایی تشدیدگر لیزری بر نتایج حاصل بررسی شد.

کلید واژه- هم‌راستاسازی، هم‌کانون، توزیع شدت، میدان، عدد فرنل.

Investigating the effect of misalignment angle and Change shape of the mirrors on the far field intensity distribution and phase pattern of the unstable confocal resonator for the homemade TEA CO_2 laser

Ali Mirheydari[1], Reza Torabi[2], Mohammad Saghebfar[3], Masoumeh Mehri Telyabi[4]

Faculty of Applied Sciences, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran.

alimirheydari1376@gmail.com, [2]r.torabi@yahoo.com [3]saghebfar2017@gmail.com, [1] [4]masoumeh.mehri1376@gmail.com.

Abstract- In this article, the effect of the misalignment angle and variation of the square to rectangular shape of the mirrors in the positive branch confocal unstable resonator for the TEA CO2 laser type, in order to investigate the change in the far field intensity distribution and then improvement of the output beam in order to improve the quality parameters of the output beam of a TEA CO_2 gas laser has been discussed using the fast Fourier transform simulation method. Also, the changes of the equivalent Fresnel number and the magnification of the laser resonator were checked on the results.

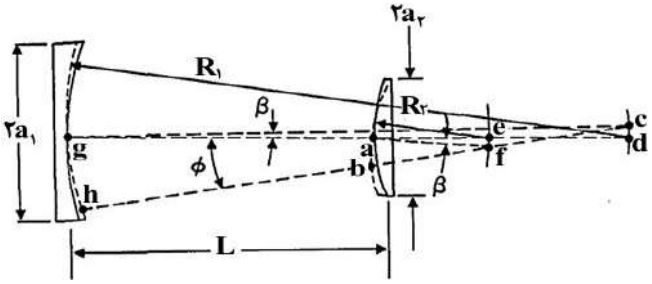
Keywords: Alignment, Confocal, Intensity Distribution, Field, Fresnel Number.

مقدمه

درک اثر تغییر شکل آینه‌ها از مربعی به مستطیلی و زاویه‌ی ناهم‌راستایی آینه‌ها در نتایج خروجی تشدیدگر یکی از موضوعات مهم می‌باشد. اثر ناهم‌راستایی یک تشدیدگر به اثری گفته می‌شود که در صورت رخ دادن، تلفات توان خروجی به دلیل شیب آینه، تغییر می‌کند. به‌عبارت دیگر شیب و هم‌راستایی آینه‌ها از عوامل تأثیرگذار در شکل شدت خروجی لیزر هستند؛ ناهم‌راستایی آینه‌ها در مواردی موجب خارج شدن فوتون‌ها از محدوده محور نوری و برخورد به سایر قسمت‌های تشدیدگر شده و در نهایت نابودی آن‌ها را در پی خواهد داشت. برای چرخش‌های زاویه‌ای کوچک، تأثیر زاویه ناهم‌راستایی آینه بر روی حجم مد به گونه‌ای است که آن‌را کمی به یک طرف تشدیدگر منتقل می‌کند , منجر به تغییر تلفات در آینه خروجی می‌شود که در هرصورت این تغییر به معنای نوسان در توان خروجی لیزر است. یک اثر بسیار مهم دیگر ناهم‌راستایی آینه‌ها، تغییر جهت پرتو (هدایت پرتو به یک سمت) است. لرزش آینه‌های تشدیدگر، توزیع شدت میدان دور را مرتعش خواهد کرد. تغییر جهت پرتو باعث تار شدن توزیع شدت میدان دور، ناشی از افزایش واگرایی پرتو می‌شود. به دلیل ویژگی ذاتی تشدیدگرهای ناپایدار، جابه‌جایی زاویه‌ای توزیع میدان دور به طور قابل توجهی بیشتر از جابجایی زاویه‌ای آینه‌ها خواهد بود[۱, ۲]. هم‌گام با تحقیقات جهانی در زمینه توسعه محصولات لیزری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر نیز در این راستا قدم‌هایی برداشته[۳] و به این جزئیات نیز توجهاتی داشته است.

تکنیک محاسبه و نتایج

β را زاویه چرخشی آینه‌ها حول خطی که مرکز آینه‌ها را به هم متصل می‌کند در نظر می‌گیریم. در این حالت، موقعیت محور چرخانده شده تشدیدگر (تحت ناهم‌راستایی آینه‌ها) می‌تواند به روشی مشابه روش کروپکه و سوی[۱]،که در ادامه توضیح داده خواهد شد، محاسبه شود. هندسه تشدیدگر مورد استفاده، برای یافتن محور در شکل ۱ نشان داده شده است. هنگامی که آینه ۱ حول نقطه g با زاویه β و آینه ۲ به مقدار مساوی حول نقطه a کج شود، محور نوری از g-a-e-d به h-b-f-c تبدیل می‌شود. مراکز انحنای آینه‌های ۱ و ۲ بعد از این ناهم‌راستایی به ترتیب c و f هستند.



شکل ۱: تشدیدگر هم‌کانونی ناپایدار و ناهم‌راستایی آینه‌ها[۲].

مقدار چرخش ϕ برای محور نوری جدید با استفاده از معادله زیر داده می‌شود:

$$\phi = \frac{\overline{cd} - R_2\beta}{\overline{ed}} = \beta(R_1 - R_2)/(R_1 + R_2 - L) \qquad (1)$$

استفاده از روابط بین شعاع (R) و حساسیت زاویه‌ای ($\mathcal{M}$) برای یک تشدیدگر هم‌کانون شاخه مثبت به ما این امکان را می‌دهد که معادله ۱ را به شکل زیر تعدیل کنیم:

$$\phi = \mathcal{M}\beta \qquad (2)$$

که در آن $\mathcal{M}$:

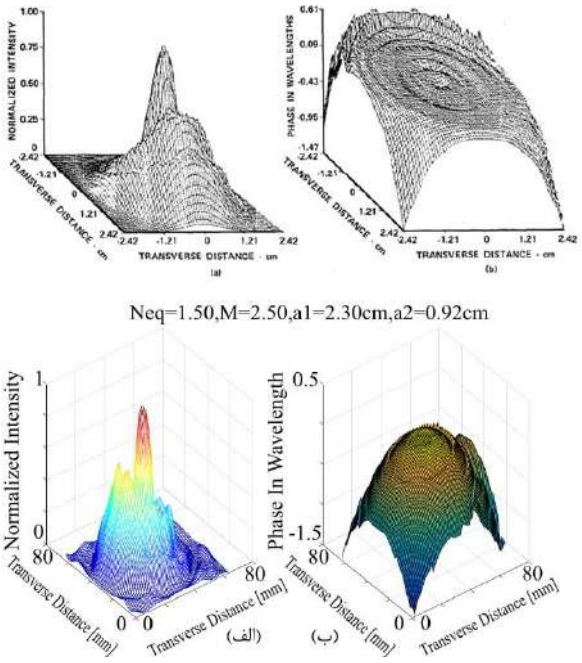
$$\mathcal{M} = 2(M + 1)/(M - 1) \qquad (3)$$

و M بزرگنمایی تشدیدگر است. معادله فوق با بیان کروپکه و سوی، متفاوت است زیرا ما هر دو آینه تشدیدگرا را کج می‌کنیم، هرچند می‌شود از این معادله نیز به بیان کروپکه و سوی رسید[۲, ۴]. معادله فوق را با در نظر گرفتن میزان کج‌شدگی متفاوت برای یک آینه محدب M_2 و آینه مقعر M_1 تشدیدگر، می‌توان به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$\phi = \frac{2M\beta_1 - 2\beta_2}{M-1} \qquad (4)$$

از آنجایی که شیب β_2 در آینه M_2 معادل شیب $\beta_1 = \beta_2/M$ در آینه M_1 است، می‌توان فقط روی ایجاد شیب در یکی از آینه‌ها تمرکز کرد. با چشم‌پوشی از بهره محیط، توزیع شدت به صورت غیر متقارن و جبهه فاز مطابق با معادله ۴، تغییر می‌کند[۵]. توزیع شدت خروجی در این حالت با روش تبدیل فوریه سریع، قابل محاسبه و شبیه‌سازی است[۵-۷].

صحت عملکرد برنامه نوشته شده با استفاده از نتیجه موجود در منبع [۵]، در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: نمایش (الف) شدت بهنجار و (ب) فاز نمونه در منبع [۵] (شکل بالا) و عملکرد برنامه نوشته شده (شکل پایین) تحت زاویه ناهم‌راستایی ۵۰ میکروراديان، به ترتیب a_1 و a_2 قطر آینه ورودی و آینه خروجی، N_{eq} عدد فرنل معادل و M بزرگنمایی تشدیدگر است (تفاوت جهت شکل‌ها به دلیل تفاوت زاویه‌ی نمایشی است).

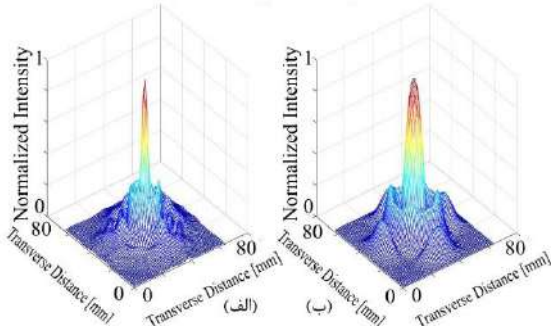
در ادامه در شکل‌های ۳ تا ۶ نتایج ایجاد زاویه‌ی ناهم-راستایی و تغییر شکل آینه‌ها از مربعی به مستطیلی برای ۱ نمونهٔ منتخب از ۲۴ نمونهٔ بررسی شده، که در جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات اعمال شده روی آن بیان گردیده، نشان داده خواهند شد.

جدول ۱: مشخصات تغییر شکل آینه‌ها برای دو نمونه‌ی منتخب

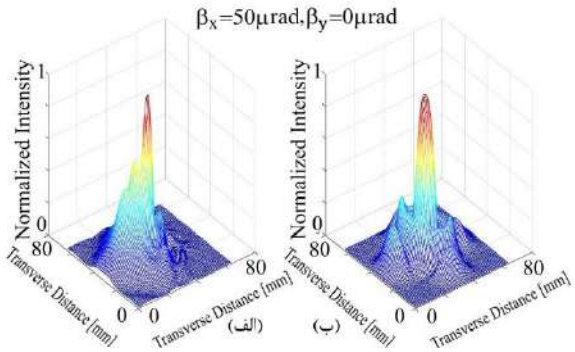
	طول و عرض‌های مختلف مورد بررسی برای آینه‌های نمونه منتخب (cm)	
	y	x
حالت ۱	۱	۸/۰
حالت ۲	۱	۶/۰
حالت ۳	۱	۵/۰

جدول ۲: تعدادی از زوایای ناهم‌راستایی مورد بررسی برای نمونه

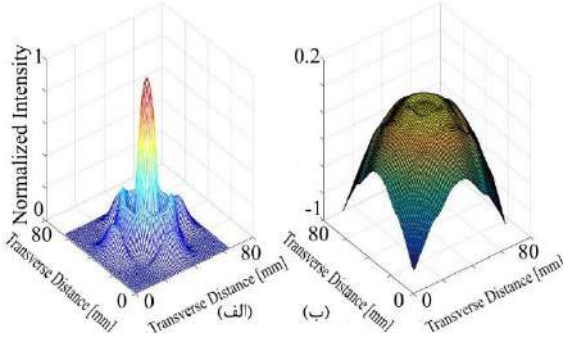
۱۲	زوایای ناهم‌راستایی مورد بررسی در جهت x و y (μrad) برای نمونه	
	β_y	β_x
حالت ۱	۰.۰	۵
حالت ۲	۰	۲۵
حالت ۳	۲۵	۲۵
حالت ۴	۰	۵۰
حالت ۵	۵۰	۵۰
حالت ۶	۵	۰.۰
حالت ۷	۲۵	۰.۰
حالت ۸	۵۰	۰.۰



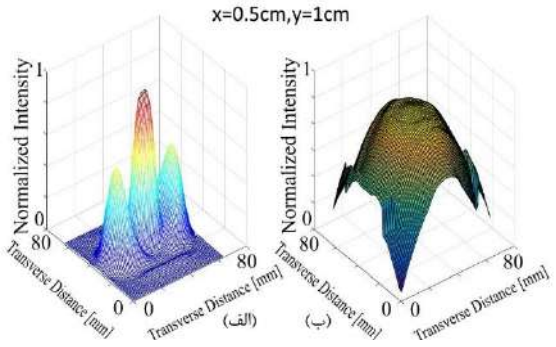
شکل ۳: توزیع شدت بهنجار میدان دور اولیهٔ نمونه در دو حالت تشدیدگر (الف) دایروی و (ب) مربعی



شکل ۴: تاثیر زاویه‌ی ناهم‌راستایی بر توزیع شدت بهنجار میدان دور نمونه در دو حالت تشدیدگر (الف) دایروی (ب) مربعی



شکل ۵: (الف) توزیع شدت بهنجار میدان دور و (ب) فاز اولیهٔ نمونه برای حالت مربعی



شکل ۶: تاثیر تغییر شکل آینه از مربعی به مستطیلی برای (الف) توزیع شدت بهنجار میدان دور و (ب) فاز نمونه

تحلیل و نتیجه‌گیری

طبق نتایج به‌دست آمده تغییر شکل آینه‌ها از مربعی به مستطیلی، سبب ایجاد تغییر الگوی شدت و همینطور الگوی فازی در راستای بلندتر می شود. به‌عبارتی به‌نظر می‌رسد با بزرگتر شدن سطح مقطع آینه، قله‌های جانبی در سایر نقاط از بین رفته و قله‌های مرکزی تقویت شده‌اند. مقدار زاویه‌ی ناهم‌راستایی قابل چشم‌پوشی، بسیار کم و در حدود ۵ تا ۲۰ میکروراديان است. در این محدوده عملا اشکال قابل توجهی مشاهده نمی‌گردد، در حالیکه با افزایش زاویه ناهم-راستایی، ایجاد قله‌های جانبی مرتفع و یا جهت‌گیری قله‌ها به یک سمت دیده شد. با توجه به محدوده‌ی بسیار کوچک زاویه ناهم‌راستایی، دقت در هم‌راستاسازی آینه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. هم‌چنین تاثیر عدد فرنل و بزرگنمایی در تشدیدگر مورد بررسی را در دو حالت (الف) افزایش هم‌زمان عدد فرنل معادل و بزرگنمایی و (ب) افزایش بزرگنمایی و کاهش هم‌زمان عدد فرنل معادل نیز بررسی کردیم. در حالت (الف) روند تضعیف یا بهبود نتایج روند مشخصی ندارد زیرا در نمونه‌هایی سبب تضعیف ولی در نمونه‌های دیگر سبب بهبود نتایج شده است اما در حالت (ب) قله مرکزی پهن‌تر و دامنه شدت‌های جانبی افزایش یافته است.

مرجع‌ها

[1] W. Krupke and W. Sooy, "Properties of an unstable confocal resonator CO2 laser system," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 5, no. 12, pp. 575-586, 1969.

[2] D. B. Rensch and A. N. Chester, "Iterative diffraction calculations of transverse mode distributions in confocal unstable laser resonators," Applied Optics, vol. 12, no. 5, pp. 997-1010, 1973.

[3] R. Torabi, H. S. Nejhad, B. Kazemi, and M. H. Sarshogh, "Some experimental studies on the UV spark pin-array pre-ionization in TEA CO2 laser," Laser Physics, vol. 32, no. 4, p. 045002, 2022.

[4] D. Rensch, "Three-dimensional unstable resonator calculations with laser medium," Applied Optics, vol. 13, no. 11, pp. 2546-2561, 1974.

[5] E. A. Sziklas and A. E. Siegman, "Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: Fast Fourier transform method," Applied Optics, vol. 14, no. 8, pp. 1874-1889, 1975.

[6] P. Heckbert, "Fourier transforms and the fast Fourier transform (FFT) algorithm," Computer Graphics, vol. 2, pp. 15-463, 1995.

[7] E. A. Sziklas and A. Siegman, "Diffraction calculations using fast Fourier transform methods," Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 3, pp. 410-412, 1974.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

طراحی و شبیه‌سازی نانو حسگر پلاسمونیکی تشخیص گروه خونی انسان به عنوان حسگر زیستی

محدثه آرست، امین قادی

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

arast.m1997@gmail.com, a.ghadi@umz.ac.ir

چکیده – در این مقاله یک حسگر زیستی پلاسمونیکی ضریب‌شکست برای تشخیص گروه خونی مختلف (A,O,B) انسان با استفاده از ساختار فلز_عایق_فلز (MIM) طراحی و شبیه‌سازی شده است. این ساختار با استفاده از یک شبکه مربعی هوا، که در بستری از جنس نقره قرار میگیرد، با مدل درود شبیه سازی شده است. با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه‌ی زمانی (FDTD)، با تغییر ضریب شکست از ۱ تا ۱.۱ با گام ۰.۰۲، میزان حساسیت و معیار شایستگی را محاسبه کردیم. و در این تحقیق نشان میدهیم که این حسگر قابل استفاده برای تشخیص گروه‌های خونی مختلف نیز هست.

کلید واژه- «گروه خونی»، «پلاسمونیک»، «نانوساختار»، «پلاریتون پلاسمون‌های سطحی»، «حسگر زیستی»

Design and simulation of plasmonic nanosensor for human blood type detection as a biosensor

Mohadese Arast & Amin Ghadi

Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Mazandaran, Babolsar

Abstract- In this paper, a plasmonic refractive index biosensor for detection of different blood group (A, O, B) with Metal-Isolator-Metal structure is designed and simulated. This structure is based on an air square grid in an Ag substrate that is simulated with Drude model. We calculated the sensitivity (S) and figure of merit (FOM) with using Finite Difference Time Domain (FDTD) method and by changing refractive index from 1 to 1.1 with step 0.02. In this research, we show that this sensor can be used for detection of different human blood group.

Keywords: blood group; plasmonic; nanostructure; Surface Plasmon Polariton; biosensor

مقدمه

پلاریتون پلاسمون‌های سطحی امواج الکترومغناطیسی هستند که به‌شکل یک موج محوشونده در سطح مشترک بین فلز و دی‌الکتریک منتشرمی‌شوند و به‌دلیل قابلیت های بالایی که دارند مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. دستگاه‌های پلاسمونیک به‌دلیل توانایی انتشار در زیر حدپراش، طراحی در ابعاد بسیار ریز و ساخت دستگاه‌های نوری زیر طول موج مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانوحسگرهای‌پلاسمونیکی حساسیت بالایی نسبت به تغییرات ضریب‌شکست محیط دارند و به‌شدت به مواد و ساختار حسگر وابسته است. نانوحسگرهای ضریب‌شکست پلاسمونیکی به چهار دسته تقسیم می‌شود: حسگرهای ضریب‌شکست پلاسمونیک مبتنی بر فلز، مبتنی بر دی-الکتریک، هیبریدی پیشرفته و مواد یکپارچه دوبعدی[1]. در سال‌های اخیر بسیاری از ابزارهای اپتیکی بسیار فشرده مبتنی بر موجبر پلاسمون پلاتریتون سطحی اختراع و شبیه سازی شد مانند موجبر پلاسمونیک هیبریدی، فیلتر ها، نانو سیم ها. یکی از کاربردهای این نوع حسگرها تشخیص گروه خونی مختلف (A,O,B) انسان است[2]. در پژوهش‌های اخیر از حسگرهای پلاسمونیکی برای شناسایی نارسایی بافت معده و انواع بافت کبد انسان استفاده شده است-3] .4]

ر این مقاله، می‌خواهیم یک حسگر پلاسمونیکی برای شناسایی گروه‌های خونی مختلف *(A,O,B)* انسان شبیه سازی کنیم.

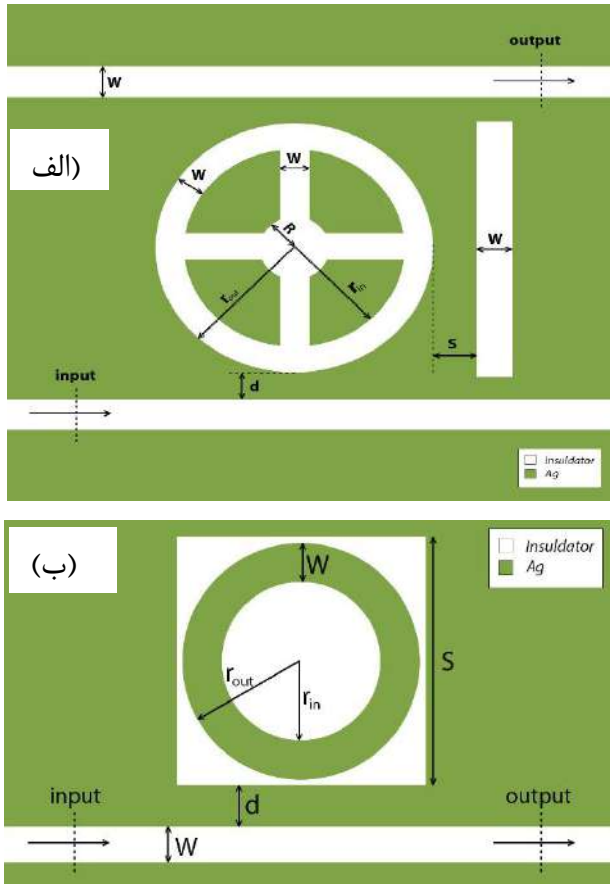
ساختار و تحلیل نظری

ساختار حسگر پیشنهادی به‌صورت شماتیک در شکل(۱) نشان داده شده است. محیط تشدیدگر و موجبر ها هوا و ضریب شکست آن ۱ است (n=1). فلز زمینه و رینگ نقره هستند که با مدل درود مشخص میشود:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \qquad (1)$$

که ω فرکانس زاویه‌ای، $\varepsilon_{\infty} = ۳.۷$ ثابت دی‌الکتریک در فرکانس بی نهایت، $\omega_p = ۱.۳۸ \times ۱۰^{۱۶}\ (rad/s)$ فرکانس پلاسما و $\gamma = ۲.۷۳ \times ۱۰^{۱۳}\ (rad/s)$ فرکانس نوسان الکترون/ست[5].

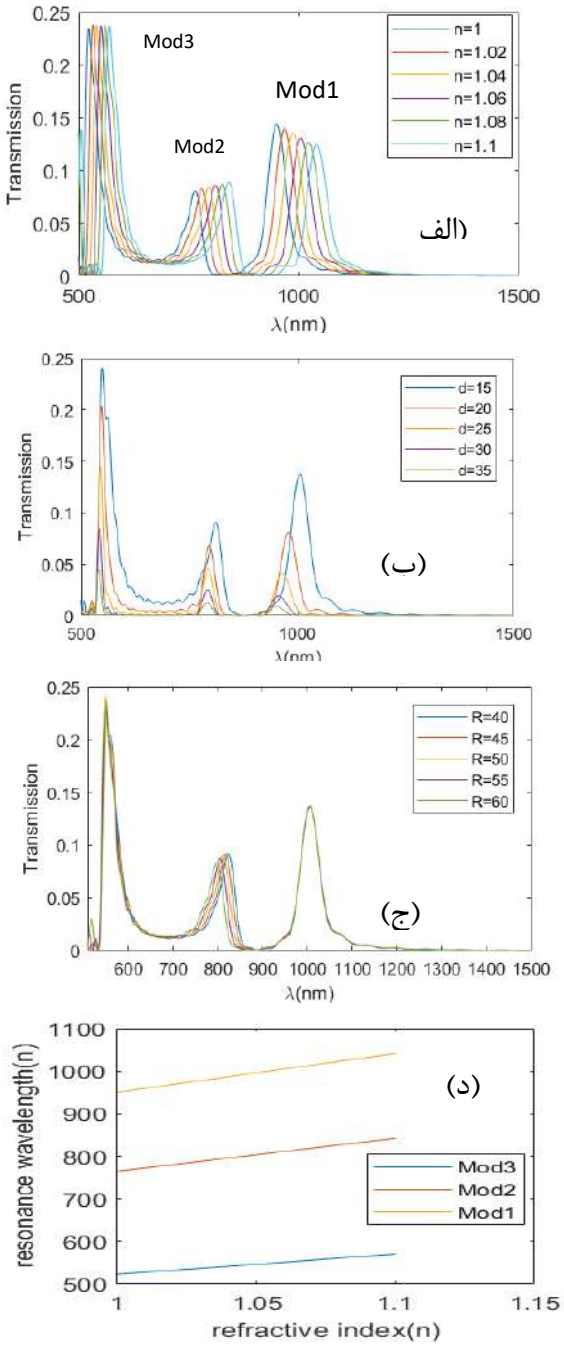
از روش دو بعدی *FDTD* در این شبیه سازی استفاده کردیم. شکل۱، دو ساختار مشابه با تشدیدگرهای مختلف را نشان می‌دهد که برای تشخیص ضریب شکست گروه خونی طراحی شده‌اند. درگاه ورودی در هردو ساختار در موجبر پایینی و درگاه خروجی در شکل(۱-الف) در موجبر بالا و در شکل(۱-ب) هم در موجبر پایینی در نظر گرفته شده است.



شکل۱: تشدیدگر حلقوی با مشخصه‌ی ساختاری w=50, d=15, R=50, s=15 و $r_{in} = 90\ , r_{out} = 140$نانومتر (الف) و تشدیدگر مربعی و حلقوی با مشخصه‌ی ساختاری w=50, S=210, d=15 و $r_{in} = 90\ , r_{out} = 140$, d=15 نانومتر (ب)

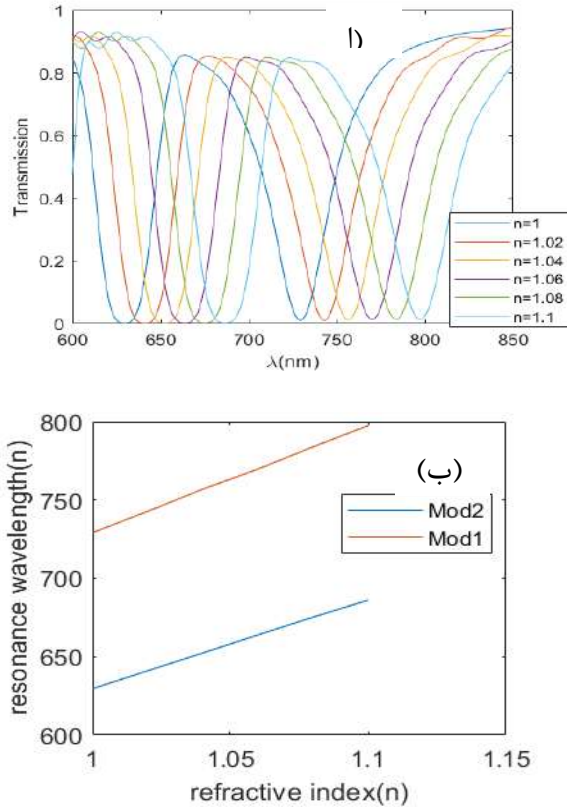
در ابتدا تاثیر ضریب شکست بر طول موج تشدید را بررسی کردیم. با افزایش ضریب شکست از ۱.۰ تا ۱.۱ با گام ۰.۰۲، طیف انتقال سنسور مربوط به شکل(۱-الف) در شکل (۲-الف) رسم شده است. با افزایش ضریب شکست طول موج‌های تشدید جابه‌جایی قابل توجهی دارند و این تغییرات برای مد۱ بیشتر از مد۲و ۳ به دلیل اتلاف بیشتر در انتشار موج است. همچنین با تغییر فاصله جفت شدگی d از ۱۵ تا ۳۵ نانومتر و شعاع دایره از ۴۰ تا ۶۰ نانومتر طیف انتقال را در شکل های (۲-ب) و (۲-ج) نشان دادیم. علاوه بر این شکل(۲-د) نشان میدهد که رابطه خطی بین طول موج تشدید و ضریب شکست برای سه مد ۱ و۲ و۳ وجود دارد. حساسیت برای سه مد به‌ترتیب ۹۶۵، ۸۰۵ و ۵۰۵ نانومتر

بر واحد ضریب شکست محاسبه شد. اولین مد تشدیدگر حساسیت بالایی نسبت به مد سوم دارد در حالی که قدرت مد سوم تشدیدگر بیشتر از حالت اول است، در نتیجه یک مبادله بین حساسیت و توان خروجی وجود دارد. این نتیجه برای مد سوم و دوم هم مشهود است.



شکل۲: طیف انتقال بر اساس ضرایب شکست مختلف (الف)، طیف انتقال برای تغییر فاصله کوپل شدگی (ب)، طیف انتقال برای شعاع‌های مختلف (ج) و تغییر طول موج تشدید در مقابل ضریب شکست های مختلف.(د)، مربوط به ساختار شکل(۱-الف).

شکل(۳-الف) با تغییرات ضریب شکست طیف انتقال سنسور را برای ساختار دوم رسم کردیم. و همچنین رابطه خطی بین طول موج تشدید و ضریب شکست برای دو مد ۱و۲ در شکل(۳-ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود با افزایش ضریب شکست طول موج‌های تشدید نسبت به یکدیگر جابجایی دارند که این تغییرات به‌دلیل اتلاف در انتشار موج است. مقدارحساسیت برای مد اول و دوم به‌ترتیب برابر ۷۰۰ و ۶۲۵ نانومتر بر واحد ضریب شکست می‌باشد.



شکل۳: طیف انتقال بر اساس ضرایب شکست مختلف (الف)، تغییر طول موج تشدید در مقابل ضریب شکست های مختلف (ب) مربوط به ساختار شکل(۱-ب).

کاربرد به عنوان حسگر گروه خون

سنسور تشدیدگر پلاسمون سطحی برای سنجش پارامترهای بیولوژیکی مختلف مانند سنجش ایمنی و بافت‌های پوستی گزارش شده است[2]. تشدیدگر پلاسمون سطحی میتواند یک گزینه مهم برای شناسایی گروه خونی انسان باشد که طراحی این نوع حسگر در کار ما بررسی شده است. از آنجایی که گروه‌های خونی مختلف بر اساس ترکیبات شیمیایی خاص خود دارای ضریب شکست ویژه‌ای هستند، تشدید پلاسمون باید در طول موج های مختلف اتفاق بیفتد که بطور آزمایشگاهی مشاهده شده که تغییرات ضریب شکست گروه های خونی متفاوت در بازه‌ی طول موجی نور مرئی و نزدیک مادون قرمز

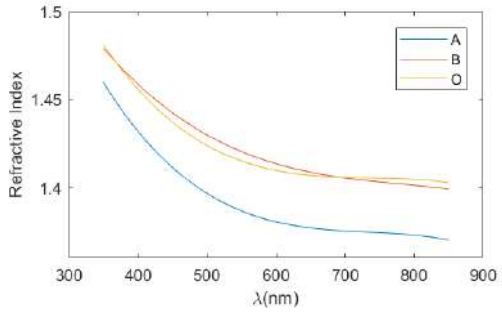
(۸۶۰-$۳۸۰ nm$) می‌باشد. پراکندگی ضریب شکست برای سه گروه خونی (A,O,B) به‌شکل فرمول کوشی مشخص می‌شود:

$$n(\lambda) = 1.357 + \frac{\delta_1}{\lambda^2} + \frac{\delta_1}{\lambda^4} \qquad (2)$$

با اصلاح فرمول بالا به عبارت زیر میرسیم[6]:

$$n = n_0 + \alpha C + \beta T + \left(\gamma_1 \lambda + \frac{\gamma_2}{\lambda}\right) + \gamma_3 \lambda^3 + \gamma_4 \lambda^4 \qquad (3)$$

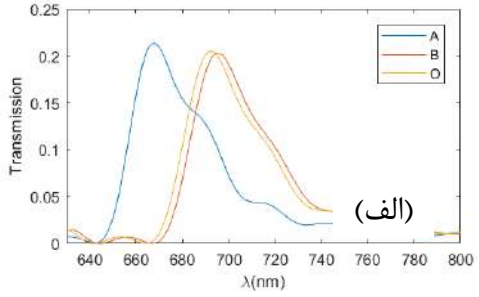
در استفاده از این حسگر به عنوان حسگر گروه خونی، از نقره به عنوان ماده‌ی زمینه وسپس نمونه خون در داخل رینگ استفاده شده است. در شکل(۴) تغییرات ضریب شکست را برای سه گروه خونی مختلف در

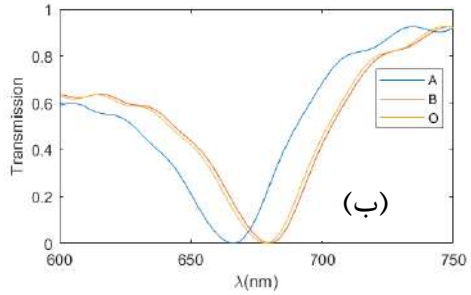


مقابل طول موج برای $C_B = 140.4\, g/l, C_O =$ $135.33\, g/l, C_A = 150.2\, g/l$ در دمای اتاق نشان می‌دهد. همچنین تغییرات رفتار غیر خطی در ضریب شکست‌ها با توجه به طول موج در سه گروه خونی مختلف مشاهده می‌شود، که ضریب شکست به‌صورت غیر خطی با افزایش طول موج کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که به‌دلیل فعالیت نوری بسیار بالای پلاسمون‌ها در حسگر تشدید پلاسمون سطحی به مقدار بسیار کمی از نمونه مورد نیاز است.

شکل۴: تغییرات ضریب شکست برای سه گروه خونی مختلف A,B,O

شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) بترتیب طیف انتقال ساختار حسگر را برای سه گروه خونی مختلف مربوطبه شکل(۱-الف) و(۱-ب) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، طول موج تشدید گروه های خونی مختلف نسبت به یکدیگر شیفت چند نانومتری دارند.





شکل۵: منحنی های انتقال برای حسگر پیشنهادی با گروه خونی مختلف. الف) ضریب عبور مربوط به شکل(۱-الف) و ب) ضریب عبور مربوط به شکل (۱-ب)

نتیجه‌گیری

در این مقاله حسگر پلاسمونیکی مبتنی بر ساختار فلز-عایق-فلز، مرکب از تشدیدگر و موجبر طراحی و شبیه سازی شده است که مورد استفاده برای گروه خونی قرار میگیرد. با بکارگیری ساختارهای متفاوت از تشدیگرها سعی شده است بیشترین حساسیت برای حسگر گروه خونی بدست آید. نتایج نشان میدهند بالاترین حساسیت در طول موج 1.06 برابر $965 nm/RIU$ و معیار شایستگی در این طول موج برابر $18.95 RIU^{-1}$ است. بالاترین میزان معیار شایستگی در طول موج 1.02 برابر $19.26 RIU^{-1}$ بدست آمده است.

مرجع ها

[1] Xu Y, Bai P, Zhou X, Akimov Y, Png CE, Ang L-K, et al. Optical Refractive Index Sensors with Plasmonic and Photonic Structures: Promising and Inconvenient Truth. Advanced Optical Materials. 2019;7(9):1801433.

[2] Rakhshani MR, Mansouri-Birjandi MA. High sensitivity plasmonic refractive index sensing and its application for human blood group identification. Sensors and Actuators B: Chemical. 2017;249:168-76.

[3] Azadi F, Hatami M. Plasmonic Sensor with Microstructure Optical Fiber for Stomach Failure Detection. opsi. 2020;26(0):373-6.

[4] Popescu VA. Application of a Plasmonic Biosensor for Detection of Human-Liver Tissues. Plasmonics. 2018;13(2):575-82.

[5] Ye Y, Xie Y, Song T, Liu B, Chai J, Zhang L, et al. Tunable plasmon-induced transparency in dual hexagonal resonators with rotatable embedded bar. IEEE Photonics Journal. 2019;11(6):1-13.

[6] Sagor RH, Hassan MF, Sharmin S, Adry TZ, Emon MAR. Numerical investigation of an optimized plasmonic on-chip refractive index sensor for temperature and blood group detection. Results in Physics. 2020;19:103611.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

امکان‌سنجی آزمایشگاهی اندازه گیری وزن قطار با استفاده از حسگر های توری براگ فیبری

محدثه شاهدادی، محمد واحدی و شروان عطایی

دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران

mohadese_shahdadi@physics.iust.ac.ir, mvahedi@iust.ac.ir, ataei@iust.ac.ir

چکیده - توزین در حین حرکت قطار یکی از راه‌های نظارت بر نحوه بهره‌برداری از زیرساخت می‌باشد که برای کنترل بار عبوری و جلوگیری از آسیب به سازه کاربرد دارد. حسگرهای توری براگ فیبری به دلیل دقت در اندازه‌گیری، زمان پاسخ کوتاه، مصونیت در برابر تداخلات الکترومغناطیسی و نظارت از راه دور بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. هدف این مقاله، توزین در حال حرکت بار محوری قطار توسط حسگرهای توری براگ فیبری براساس پایش طیف نوری است. در ابتدا دو حسگر با زاویه ۴۵ درجه روی تار خنثی ریل نصب شد و سپس تغییرات طول‌موج با استفاده از دستگاه آنالیزگر طیف نوری به ازای اعمال بار، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج بدست آمده، کرنش برشی و در نتیجه وزن اعمال شده تا حدود ۱۱ تن با خطای ۷۳/۱ گرم اندازه‌گیری شد.

کلید واژه- توری براگ فیبری، ریل، توزین در حال حرکت، کرنش، فیبر نوری

Feasibility Study of Weighting Train Using Fiber Bragg Grating Sensors

Mohadeseh Shahdadi, Mohammad Vahedi and Shervan Ataei

Iran University of Science and Technology

Abstract- Weight of motion of train is one of the ways to monitor the weight of the infrastructure, which is used to control the passing load and prevent damage to the structure. Fiber Bragg grating sensors have been highly regarded due to their accuracy in measurement, short response time, immunity to electromagnetic interference, and remote monitoring. The aim of this research is to weigh the moving axle load of the train by fiber Bragg grating sensors based on optical spectrum monitoring. At first, two sensors were installed at an angle of 45 degrees on the neutral line of the rail, and then the changes in wavelength were analyzed using an optical spectrum analyzer for different loads. Using the obtained results, the shear strain and as a result the applied weight was measured up to 11 tons with an error of 73.1 grams.

Keywords: Fiber Bragg Grating, Rail, Weight in Motion, Strain, Optical Fiber

مقدمه

خطوط مترو و راه‌آهن به عنوان یکی از سامانه‌های حمل و نقل از مکان‌های پرتردد در سطح کشور است. این نقاط هنگام بحران بسیار آسیب‌پذیر و خسارت‌بار خواهند بود. نظارت بر نحوه بهره‌برداری از زیرساخت به منظور حفظ ایمنی قطار و گسترش عمر خطوط ریلی راه‌آهن استفاده شده است[۱].

یکی از روش‌های نظارت بر بارهای بهره‌برداری از زیرساخت، اندازه‌گیری وزن بار در حال حرکت (WIM) روی ریل است. توزین دینامیکی وسایل نقلیه در حال حرکت را می‌توان به راحتی از طریق ایستگاه‌های اندازه‌گیری تخصصی، بدون توقف وسایل نقلیه انجام داد که باعث صرفه‌جویی در وقت و جلوگیری از ترافیک می‌شود[۲].

از جمله حسگرهای مورداستفاده در زمینه‌ی نظارت بر سلامت سازه‌های عمرانی، حسگر توری براگ فیبری (FBG) است. این حسگرها برای اندازه‌گیری پارامترهایی چون کرنش، فشار، دما، ضریب‌شکست، جابه‌جایی، غلظت گاز و ... مورداستفاده قرار گرفته‌اند. حسگر FBG به نسبت حسگرهای معمولی مزیت‌های زیادی مثل ایمنی در برابر تداخل الکترومغناطیسی، طول‌عمر طولانی، دقت بالا، دوام، سنجش از راه دور، امکان تسهیم چندین حسگر در یک کابل نوری و... دارد. به همین دلیل می‌توان از آن‌ها برای بررسی سلامت ریل استفاده کرد[۳].

این مقاله به امکان‌سنجی استفاده از حسگر FBG در اندازه‌گیری وزن در حال حرکت با اندازه‌گیری نیروی کرنش برشی می‌پردازد.

مبانی نظری

FBG یک ساختار تناوبی در قسمتی از هسته‌ی فیبر است که باعث تشکیل نوعی بازتابنده توزیعی در این قسمت از فیبر می‌شود و معمولا با استفاده از حساسیت به نور[۳۴] فیبر ایجاد می‌شود. حساسیت به نور باعث تغییر دائمی در ضریب‌شکست هسته فیبر هنگام قرارگرفتن در معرض نور می شود. هنگامی که نور پهن‌باند از این توری عبور می‌کند، طول‌موج خاصی از نور بازتاب می‌شود و بقیه طول‌موج‌ها عبور می‌کنند. این زمانی اتفاق می‌افتد که شرط براگ برآورده شود، زمانی که دوره توری برابر با نصف طول‌موج نور ورودی است. طول‌موجی که این بازتاب در آن رخ می‌دهد، طول‌موج براگ(λ_B) نامیده می‌شود و با رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \qquad (۱)$$

که در آن Λ دوره تغییرات ضریب‌شکست و n_{eff} ضریب‌شکست موثر هسته فیبر است.

ویژگی‌های طیف بازتابی توری به پارامترهای توری بستگی دارد. با اعمال کرنش، به دلیل کشیدگی فیزیکی فیبرنوری تغییراتی در دوره تناوب ایجاد می‌شود که به سبب آن، طول‌موج براگ در طیف نور بازتابی تغییر می‌کند. از نظر

[34] photosensitivity

ریاضی، تغییر در طول‌موج براگ ($\Delta\lambda_B$) به دلیل فشار اعمال شده به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial l} + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial l}\right)\Delta l \qquad (۲)$$

در این رابطه l و Δl به ترتیب طول اولیه و تغییر طول حسگر هستند.

ازآنجا که تغییرات مکان در توری براگ فیبری برابر با تغییر مکان دوره توری براگ است، پس پارامتر اول برابر یک می‌باشد.

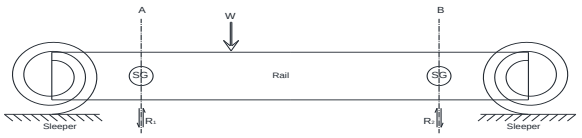
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon \qquad (۳)$$

که P_e ضریب کرنش نوری و ε تغییرات کرنش است[۴] و [۶].

برای اندازه‌گیری وزن در حال حرکت (WIM)، در صورتی که ریل قرار گرفته بین دو تراورس به صورت یک تیر در نظر گرفته شود، طبق محاسبات مقاومت مصالح، اگر این تیر تحت عبور یک بار متمرکز قرار بگیرد، تنش‌های برشی و خمشی در تیر ایجاد خواهد شد [۵]. تعیین بار اعمالی با استفاده از میزان تنش‌های خمشی بوجود آمده از خمش عملاً قابل‌استفاده نیست. زیرا این تنش محوری، تابعی از طول تیر، شرایط تکیه‌گاهی، محل اندازه‌گیری و توزیع بار چرخ در محل تماس چرخ و ریل است[۵]. در مقابل تعیین بار چرخ، با اندازه‌گیری برش هیچ یک از این محدودیت‌ها را ندارد.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است مجموع نیروهای برشی R_1 و R_2 در دو نقطه A و B مستقل از محل و نحوه توزیع بار در سطح تماس، طول آزاد تیر بین دو تکیه‌گاه، شرایط تکیه‌گاهی و محل اندازه‌گیری است. این مقدار مادامی‌که بار بین A و B باشد ثابت و برابر با بار چرخ است.

$$W = R_1 + R_2 \qquad (۴)$$



شکل ۴۲: طرح یک سیستم اندازه‌گیری وزن در حال حرکت

برای اندازه‌گیری تنش برشی باید کرنش برشی نظیر آن را با استفاده از حسگر FBG تعیین کرد. برای این کار باید دو حسگر را در محل تار خنثی (خطی فرضی در تیر که نه فشار و نه کشش در آن تعریف شده است) در نقاط A و B و در زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط افقی روی بدنه ریل نصب شود. دلیل این کار این است که سنسور تنها تحت تاثیر تنش برشی باشد. تنش‌های برشی (τ) با روابط (۵) و (۶) بدست می‌آید [۵]:

$$\tau_1 = {R_1}/{I}\,{Q}/{t} \qquad (۵)$$

$$\tau_2 = {R_2}/{I}\,{Q}/{t} \qquad (۶)$$

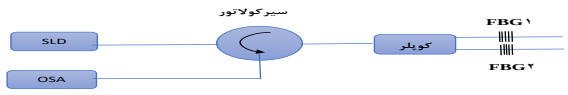
و در نهایت مقدار وزن بار واردشده برابر است با:

$$W = \frac{E.I}{{Q}/{t}}\,2\varepsilon \qquad (۷)$$

که E مدول الاستیسیته، Q ممان اول، I ممان اینرسی و t ضخامت عرضی محل نصب حسگر است.

انجام آزمایش

طرحواره چیدمان اپتیکی آزمایش در شکل ۲ نمایش داده شده است. به این صورت که منبع پهن‌باند (SLD) به یک پورت سیرکولاتور وصل شده است. دو حسگر ۱۵۵۰nm توسط یک کوپلر به پورت دیگر سیرکولاتور وصل شده است تا نور بارتاب شده را از سمت دیگر سیرکولاتور به دستگاه آنالیزگر طیف نوری (OSA) وارد کند.



شکل ۴۳: طرحواره چیدمان اپتیکی

برای انجام این کار سیستم را متقارن در نظر می‌گیریم و یک حسگر را با زاویه ۴۵ درجه طبق شرایط گفته شده با چسب ۱۲۳ روی ریل UIC۶۰ به طول ۹۹.۵cm می‌چسبانیم، همانطور که در شکل ۴۴ مشاهده می‌شود. یک کرنش‌سنج الکتریکی از نوع فویل مقاومتی که به یک دیتالاگر متصل است زیر ریل چسبانده شده است وکرنش محوری را اندازه‌گیری می‌کند.

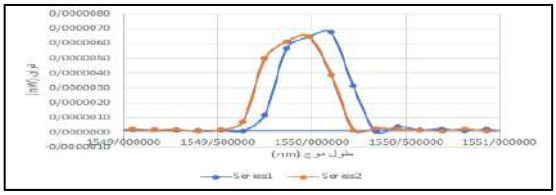


شکل ۳: نحوه قرارگیری حسگر روی تار خنثی ریل (حسگر مشخص شده است.)

برای اعمال کرنش یک جک هیدرولیک ۲۰ تنی را وسط ریل قرار می‌دهیم. با اعمال نیرو توسط جک، کرنش‌سنج‌ها تحت کرنش قرار می‌گیرند. دیتالاگر میزان کرنش محوری ایجاد شده و دستگاه OSA طول‌موج جابه‌جاشده را نشان می‌دهد.

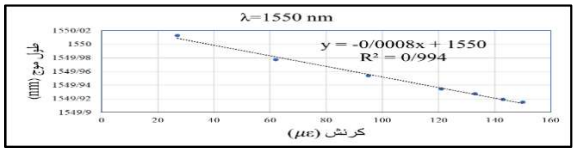
نتایج آزمایش

در این آزمایش، کرنش صفر برای زمانی که نیرویی به جک وارد نشده، اندازه‌گیری می‌شود. سپس به صورت مرحله‌ای به جک نیرو وارد می‌شود و در هر مرحله طول موج جابه‌جا شده و میزان کرنش ثبت می‌شود. شکل ۴، نتایج به دست آمده از دستگاه OSA را برای حسگر نشان می‌دهد که می‌توان میزان جابه‌جایی طول‌موج را نسبت به زمانی که نیرویی به جک وارد نشده را محاسبه کرد.



شکل ۴: نمودار طول‌موج جابه‌جاشده حسگر

و با توجه به داده‌های بدست آمده از دیتالاگر به نمودار در شکل ۵ می‌رسیم. نمودار حسگر ۱۵۵۰، همبستگی خوب داده‌ها را نشان می‌دهد و میزان تغییرات طول‌موج را به ازای ۱۲۳με مقدار ۹۸ pm می‌باشد.



شکل ۵: نمودار نتایج حاصل از حسگر FBG با طول موج ۱۵۵۰nm

با فرض تقارن در سامانه، با استفاده از کرنش‌های برشی محاسبه شده از این سیستم، وزن وارد شده بر ریل تا حدود ۱۱/۴ تن با خطا ۷۳/۱ گرم محاسبه شد. باید تذکر داد که این اندازه‌گیری‌ها استاتیکی بوده و هنوز توزین دینامیکی بار قطار صورت نگرفته است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله از حسگر FBG برای اندازه‌گیری وزن در حال حرکت استفاده شد. به این صورت که سیستم متقارن فرض شد و از یک حسگر FBG استفاده شد و سپس با اندازه‌گیری کرنش برشی ناشی از نیرویی که به ریل اعمال می‌شود، وزن محاسبه شد. از دستگاه آنالیزگر طیف نوری به عنوان سیستم بازیاب برای بررسی تغییرات طول‌موج استفاده شد که برای حسگر به ازای με ۱۲۳ مقدار pm ۹۸ می‌باشد. با فرض متقارن بودن سیستم، توانستیم وزن وارد شده را تا ۱۱/۴ton با خطای ۷۳/۱ gr محاسبه کنیم.

مرجع‌ها

[39] Filograno, M.L., et al., Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors. IEEE Sensors Journal, 2011. 12(1): p. 85-92.

[40] Rindi, A., L. Pugi, and E. Meli, *An innovative high speed weigh in motion system for railway vehicles.* Mechatronic and embedded systems and applications (MESA), Senigallia, Italy, 2014.

[41] Milojević, A., M. Tomić, and N.T. Pavlović. Application of FBG sensors in smart railway. in XV International Scientific-Expert Conference on Railways. 2012.

[42] Sahota, J.K., N. Gupta, and D. Dhawan, Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical

parameters: A comprehensive review. Optical Engineering, 2020. 59(6): p. 060901-060901.

[43] Craig Jr, R.R. and E.M. Taleff, Mechanics of materials. 2020: John Wiley & Sons.

[۴۴] بیات، آمنه (۱۴۰۱)،"ساخت حسگر کرنش ریل بر اساس پایش طیف توری براگ فیبر نوری "، رساله کارشناسی ارشد فیزیک گرایش اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

اثر زمان برهمکنش پلاسمای سرد با محیط کشت کامل در تولید گونه‌های فعال با بکارگیری طیف‌سنجی تفکیک زمانی

فاطمه کربلایی میرزاحسینی، دنیا طاهری، اسماعیل حیدری، کمال حاجی شریفی، حسن مهدیان

آدرس: پژوهشکده پلاسما، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

fatemeh.kmh@khu.ac.ir, donyataheri55@khu.ac.ir, e.heydari@khu.ac.ir, hajisharifi@khu.ac.ir, mehdian@khu.ac.ir

چکیده – سرطان از بیماری های تهدید کننده برای سلامت انسان محسوب می‌شود. پلاسمای سرد فشار اتمسفری به دلیل رفتار بیوفیزیکی از جمله توانایی تولید مقادیر گونه‌های فعال ، به عنوان یک ابزار درمانی نوظهور برای درمان سرطان مورد توجه است. در این کار با استفاده از روش فوتونیکی طیف سنجی تفکیک زمانی به صورت آنی به ارزیابی اثر فاصله پلاسما بر میزان تولید غلظت این گونه‌ها می‌پردازیم. نتایج می‌تواند مدت زمان فعال بودن محیط تیمار شده توسط پلاسما و میزان غلظت گونه‌های فعال غالب را برای زمان های تیمار مختلف مشخص کند. مشاهده شد با افزایش مدت زمان تیمار میزان اکسیژن محلول کاهش یافته که متناظر با افزایش غلظت گونه های فعال در محیط است.

کلید واژه- پلاسمای سرد فشار اتمسفری، حسگر فوتونیکی، درمان سرطان، طیف سنجی تفکیک زمانی، گونه‌های فعال

The Effect of Cold Plasma Interaction Time with Complete Culture Medium on the Generation of Reactive Species

Fatemeh Karbalaee Mirzahosseini, Donya Taheri, Esmaeil Heydari, Kamal Hajisharifi, Hasan Mahdian

fatemeh.kmh@khu.ac.ir, donyataheri55@khu.ac.ir, e.heydari@khu.ac.ir, hajisharifi@khu.ac.ir, mehdian@khu.ac.ir

Abstract- In the recent decades, while there have been significant advances and new methods has been developed for the treatment of cancer, this disease is still one of the deadliest threats to the human health worldwide according to the latest reports. Comparing to the conventional and traditional strategies which are employed for the cancer treatment, the cold atmospheric pressure plasma jet is considered as an emerging tool for the cancer treatment due to its unique biophysical effect such as efficient generation of reactive oxygen and nitrogen species. In this work, we evaluate the realtime effect of cold atmospheric pressure plasma jet treatment time on the production of reactive oxygen and nitrogen species using a photonic method based on time-resolved phosphorescence spectroscopy of PtTFPP platinum complex oxygen sensitive probe doped in a polystyrene oxygen permeable matrix. The results of this work can determine the activation time span of the cold atmospheric pressure plasma jet-treated complete cell culture medium, as well as the level of dominant reactive oxygen species generated in different treatment durations in a complete cell culture medium.

Keywords: Atmospheric pressure cold plasma, cancer treatment, photonic sensor, Reactive species, Time resolution spectroscopy

مقدمه

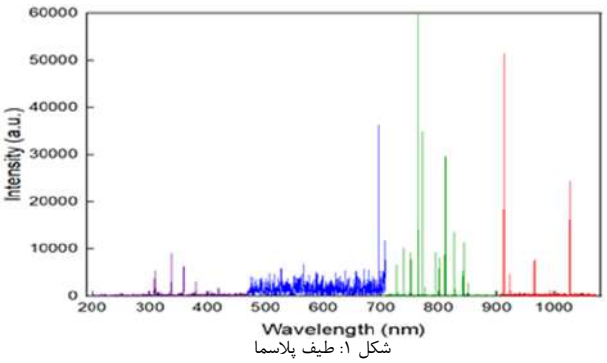
در حال حاضر، دامنه پیشرفت در فناوری علم پزشکی بسیار گسترده است. روش‌های نوین و نوآورانه‌ایی در پزشکی در دست مطالعه است که پلاسمای غیرحرارتی یکی از مواردی است که میتوان به آن اشاره کرد. یکی از نوآورانه ترین جنبه‌ها برای درمان، استفاده از پلاسمای سرد فشار اتمسفری است که در طول ۲۰ سال گذشته بدون شک در درمان سرطان مورد توجه واقع شده است. از آنجا که اولین استفاده از پلاسمای سرد فشار اتمسفری به عنوان یک ابزار مقابله با سرطان بر روی سلول های پستانداران در شرایط برون‌تنی و بعدا درون‌تنی گزارش شده است، میتوان به اثربخشی بهینه آن امیدوار بود[۱]. با توجه به تولید پلاسمای آزمایشگاهی از نظر دما که به سه دسته اصلی سرد، گرم و داغ طبقه‌بندی میشوند، اغلب در پلاسما پزشکی از پلاسمای سرد استفاده میشود که به اجزای اصلی آن میتوان به الکترون، یون، اشعه‌ایکس، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال اکسیژنی و نیتروژنی اشاره کرد. برای به دست آوردن فرآیندهای برهمکنش پلاسما با بافت زنده یا محیط کشت مورد نظر، یکی از فرآیندهای مهم آن نقش و تاثیر تولید گونه‌های فعال اکسیژنی و نیتروژنی است. از طرفی با در نظر گرفتن ناپایدار بودن و واکنش‌پذیر بودن این گونه‌ها بایستی به میزان متعادل بودن این گونه‌ها در محیط به دلیل آسیب دی‌ان‌ای و عدم تعادل در استرس اکسیداتیو از اهمیت زیادی برخودار است. در دهه گذشته، جت های پلاسما فشار اتمسفر به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند، زیرا به دلیل چگالی کم باعث تولید پلاسماهایی با دمای پایین نزدیک به دمای اتاق می‌شود. این دو مزیت مهم و ایمن بودن آن باعث شده‌است که استفاده از جت‌های پلاسمایی در پلاسما پزشکی مورد توجه قرار بگیرد. جت های پلاسمای غیرحرارتی فشار اتمسفری بسته به نوع گاز حامل که میتواند شامل هوا، گاز نیتروژن و یا گاز نجیب (نئون ، آرگون ، هلیوم) باشند، طبقه‌بندی می‌شوند. جت شامل یک لوله دی الکتریک با دو الکترود حلقه‌ایی فلزی است. هنگامی که گاز ورودی از طریق لوله خارجی دی الکتریک جریان پیدا میکند، و به منبع تغذیه با ولتاژ بالا اعمال شودکه باعث پلاسما سرد در هوای اطراف تولید می‌شود[۲]. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته مبتنی بر اثرات موثر درمانی توسط جت‌های پلاسمای غیرحرارتی بر بهبود سرطان و عملکرد گونه‌های فعال اکسیژنی تولید شده بر ساختار سلول و محیط کشت، در این مطالعه از روشی اپتیکی با استفاده از حسگرهای نوری مبتنی بر طیف‌سنجی تفکیک زمانی در حضور حسگر فوتونیکی اکسیژن کپسوله شده در یک ماتریس پلیمری متخلخل برای ارزیابی اثر پلاسما در محیط بیولوژیکی استفاده شده است.

مواد و روش ها

برای تهیه کردن حسگرهای فوتونیکی مقدار ۱۰ میلی‌گرم ماده رنگینه حساس به اکسیژن PtTFPP در ۲ میلی‌لیتر حلال تولوئن حل می‌شود. برای ساخت ماتریس پلیمری ۱ گرم پلی‌استایرن را در ۵ میلی‌لیتر تولوئن حل کرده و به محلول کمپلکس اضافه می‌شود. برای هر حسگر ۱۰۰ میکرولیتر از محلول را روی لام میکروسکوپی ریخته و داخل آون در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار می‌دهیم. درنهایت با استفاده از بایوپسی پانچ، حسگرها را

پانچ می‌کنیم. توسعه حسگر بر اساس یک منبع پالسی دیودی با طول پالس های نانوثانیه است[۳].

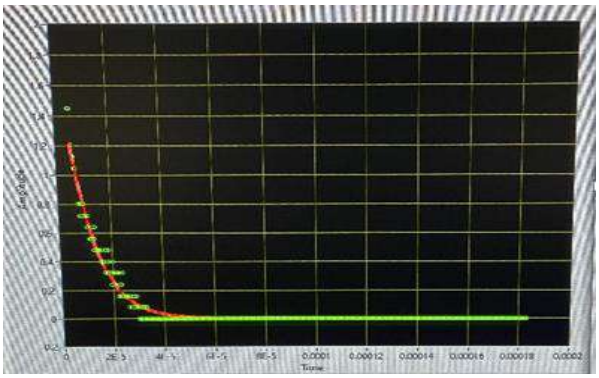
بحث و نتایج



شکل ۱: طیف پلاسما

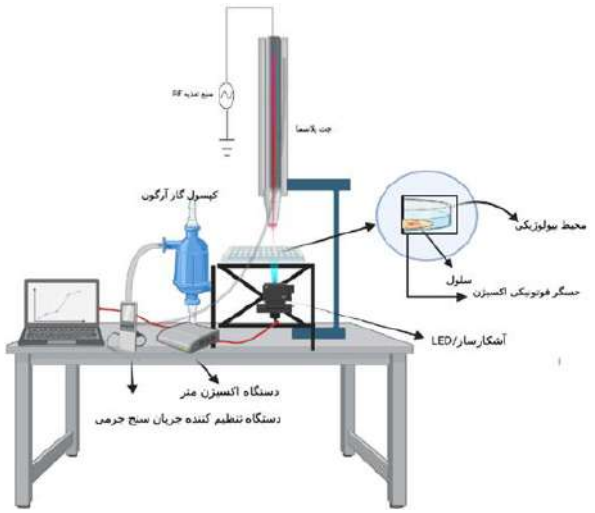
طیف جذبی محیط بیولوژیکی تیمار شده توسط پلاسما را با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذبی نوری چهار کاناله Avantes اندازه گیری شدند. این طیف سنج امکان اندازه گیری طیف از طول موج ۱۸۰ نانومتر تا حدودا ۱۱۰۰ نانومتر با قدرت تفکیک ۰/۱۹ نانومتر فراهم می آورد از طرفی آورد با توجه به شکل شماره ۱ در ناحیه فرابنفش بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ تولید گونه‌هایی شامل هیدروکسیل، نیتروژن و دی‌نیتروژن که به ترتیب با طول موج ۳۰۹، ۳۳۷ و ۴۲۷ نانومتر مشاهده می‌شوند. بیشینه های تابش در ناحیه طیفی فروسرخ نزدیک (۷۰۰-۹۰۰ نانومتر) عمدتاً مولکول های برانگیخته آرگون را نشان می دهند. در شکل شماره ۱ طیف پلاسما نشان داده شده است.

در ادامه تغییرات طول عمر فسفرسانس تابشی بررسی شد. با توجه به شکل شماره ۲ به منظور برانگیخته کردن حسگر ساخته شده از منبع نور ال‌ای‌دی که از ماده رنگینه حساس به اکسیژن به نام PtTFPP ساخته شده است، استفاده می‌شود. در این فرآیند طول عمر تابشی ماده فسفرسانس کاهش می‌یابد و در گذار از حالت برانگیخته به حالت پایه تابش می‌کند. با استفاده از آشکارساز و الگوریتم لونبرگ-مارکوارت، این تابش‌ها هر ۲.۹ ثانیه ثبت شده و با تابع نمایی


شکل۲ : نمودار فروافت تابش

برازش داده می‌شوند که خط قرمز رنگ در شکل۲، تابع نمایی برازش داده شده و نمودار سبز رنگ اطلاعات فروافت شدت ماده فسفرسانس پس از برهمکنش با اکسیژن می‌باشد.

برای انجام آزمایش از جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری به روش تخلیه سد دی‌الکتریک که حامل گاز آرگون محیط کشت کامل که حاوی ۴۵ میلی‌لیتر DMEM/f12، ۱۰٪ سرم جنین گاوی FBS و مقدار ۰/۵ میلی‌لیتر پنسترپ اسپترومایسین است استفاده می‌شود. توان منبع تغذیه ۳۵ وات، در فاصله ثابت ۸ میلی‌متراز نازل پلاسما تا سطح محیط کشت و نرخ جریان گاز ثابت ۳/۵ اس‌ال‌ام در نظر گرفته شده است. از طرفی به منظور تاثیر زمان فعال ماندن

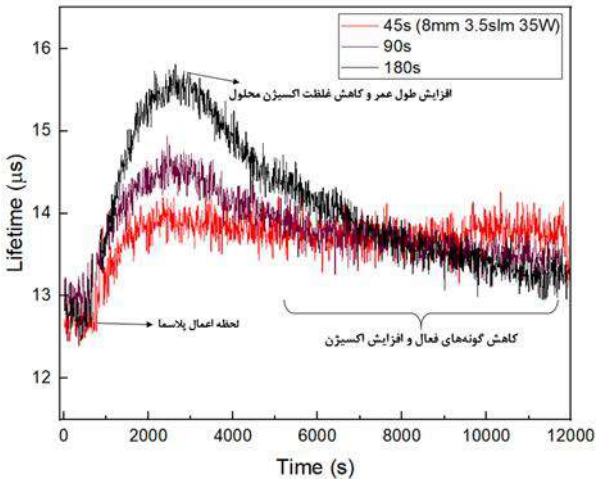


شکل ۳: شماتیکی از چیدمان آزمایش

محیط کشت تحت تیمار، در سه زمان مختلف ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ ثانیه تنظیم شده است. با توجه به تصویر شماره ۳ که

شماتیکی از چیدمان آزمایش نشان داده شده است که شامل سه بخش اصلی است. بخش اول مربوط به پلاسما است که از منبع تغذیه RF، جت پلاسما، کپسول گاز آرگون و دستگاه دبی‌سنج جرمی تشکیل شده است. بخش دوم مربوط به قسمت فوتونیک که شامل دستگاه اکسیژن متر، آشکارساز و حسگر است و بخش آخر مربوط به زیست پزشکی که شامل پلیت، سلول و محیط بیولوژیکی مورد استفاده است در نظر گرفته شد.

در سه زمان مختلف ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ ثانیه با توان ۳۵ وات در فاصله ۸ میلی‌متر با پلاسما در حالتی که سنسور به کف یکی از خانه‌های پلیت چسبانده شده است، تغییرات طول عمر فسفرسانس تابشی را بررسی شد. با توجه به نمودارهای به دست آمده، میتوان نتیجه گرفت که پس از اعمال پلاسما طول عمر تابشی ماده فسفرسانس افزایش یافته است. این بدان معناست که اکسیژن موجود در محیط مصرف شده و منجر به تولید گونه های فعال اکسیژنی در فاز مایع شده است. از طرفی با در نظر گرفتن مولکول اکسیژن که نقش اصلی را ایفا میکند، واکنشهایی برای ما حائز اهمیت است که با مصرف کردن اکسیژن محلول در محیط تولید میشوند. مطابق با نمودارهای نمایش داده شده در شکل ۴ می‌توان دریافت که با اعمال پلاسما به مدت ۱۸۰ ثانیه به محیط کشت کامل مصرفی بیشترین کاهش اکسیژن محلول را به محض اعمال پلاسما نشان خواهد داد که می‌توان نتیجه گرفت هر چه مدت زمان اعمال پلاسما به محیط بیشتر باشد، گونه‌های فعال بیشتری تولید خواهد شد. بنابراین افزایش طول عمر تابشی فسفرسانس برای مدت زمان ۱۸۰ ثانیه اعمال پلاسما از ۹۰ ثانیه بیشتر است و همچنین ۹۰ ثانیه نیز بیشتر از ۴۵ ثانیه بوده.



شکل ۴: آهنگ تغییرات طول عمر در سه زمان ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ ثانیه

نتیجه گیری

با توجه به نمودارهای به دست آمده و اندازه‌گیری غلظت اکسیژن محلول می‌توان دریافت که تولید گونه های فعال موجود در فاز گازی پلاسما طول عمری کوتاه داشته و بسیار واکنش‌پذیر هستند، این گونه‌های فعال بلافاصله پس از ورود به محیط کشت کامل با اکسیژن محلول واکنش داده و به گونه‌های فعال پایدارتری در محیط تبدیل می‌شوند.پس در نهایت افزایش طول عمر تابشی به معنای کاهش اکسیژن محلول در محیط برای تولید گونه‌های فعال پایدارتری است.

مرجع‌ها

[1] M. Laroussi, "Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma", IEEE Transact. Plasma Science, 24, No. 3, 1188-1191, 1996.

[2] L. Xinpei, M. Laroussi, and V. Puech. "On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets", Plasma Sources Sci. Technol., Vol.21, No. 3, 034005, 2012.

[3] B. Ungerböck, Birgit, V. Charwat, P. Ertl, and T. Mayr. "Microfluidic oxygen imaging using integrated optical sensor layers and a color camera", Lab on a Chip, Vol.13, No. 8, 1593-1601, 2013.

[4] E. Heydari, P. Bagheri, H. Zare-Behtash. "Photonic-based time-resolved multipulse oxygen sensor", IEEE Sensors, Vol. 22, No. 13, 12746-12753, 2022.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

مطالعه خواص اپتیکی و الکترونیکی مکسین Nb_2C و N_2N با و بدون پایانه سطحی O_2

مینا نریمانیان تازه‌کند، دکتر سعید اصغری‌زاده

گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

asgharizadeh@tabrizu.ac.ir, minanarimaniyan@gmail.com

چکیده- مکسین‌ها نانومواد دوبعدی تازه ظهوری هستند که از زمان اولین گزارش در سال ۲۰۱۱ به دلیل خواص الکترونیکی، اپتیکی، مغناطیسی، گرمایی و مکانیکی منحصربه‌فردشان و به تبع آن کاربردهای گسترده‌ای که در زمینه‌های متعددی از قبیل: «حسگرها، اپتوالکترونیک،کاربردهای زیست پزشکی و ...» دارند تا کنون مورد توجه پژوهشگران قرارگرفته‌اند. در این کار تحقیقاتی خواص الکترونیکی مکسین Nb_2C و Nb_2N برای مشخص کردن فلز یا نیم‌رسانا بودن آن در حضور پایانه سطحی O_2 و بدون آن را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. نیز خواص اپتیکی این ماده برای مشاهده نحوه تغییر طیف جذبی ماده، تحت تأثیر پایانه سطحی O_2 را به دست خواهیم آورد.

کلید واژه: مکسین، نانومواد دوبعدی، الکترونیکی، اپتیکی

Study of optical and electronical properties of Nb2C and Nb2N Mxene with and without O2 surface termination

Mina Narimaniyan Tazehkand, Dr Saeid Asgharizadeh

Physics of Solid state physics Department, Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Mxenes are a new type of two-dimensional nanomaterials that have gained a lot of attention since their first report in 2011. They possess unique properties in electronics, optics, magnetism, heat, and mechanics, and have a wide range of applications in various fields, such as sensors, optoelectronics, and biomedical applications. In this research, we will investigate the electronic properties of Nb_2C and Nb_2N Mxenes, to determine whether they are metallic or semiconducting, with or without O_2 surface terminations. Furthermore, we aim to explore the optical properties of these materials, specifically, observing changes in their absorption spectra under the influence of surface terminations by O_2.

Keywords: Mxene, two-dimensional, electronics, optics

مقدمه

مواد دوبعدی، با مزایای چشمگیر در مقایسه با همتایان سه-بعدی خود، از زمان سنتز گرافن، در زمینه‌های تحقیقاتی بی‌شماری مورد توجه قرار گرفته‌اند. مکسین‌ها خانوادهٔ بزرگی از کاربیدها و نیتریدها و کاربینیتریدهای فلزات واسطه دوبعدی هستند که ساختاری متشکل از دو یا چند لایه اتم فلز واسطه (اتم‌های M) دارند که در یک شبکه لانه زنبوری که توسط لایه‌های کربن و یا نیتروژن (اتم‌های X) که یک هشت‌وجهی را اشغال می‌کنند، قرار گرفته‌اند[۱]. مکسین‌ها اکنون در بسیاری از زمینه ها، فراتر از آنچه صحبت کردیم مورد مطالعه قرار می‌گیرند. خواص مکانیکی برجسته، ضریب اصطکاک کم، رسانایی بالا با سطح فرمی قابل تنظیم الکتروشیمیایی، و خواص نوری آن‌ها را برای کاربردهای متنوع جذاب می‌کند. فرمول کلی مکسین‌ها $M_{n+1}X_nT_x$ است، (n از ۱ تا ۴) که در آن M نشان‌دهندهٔ فلزات واسطه (Ti, Nb, V, Cr و...)، X نشان‌دهندهٔ نیتروژن و کربن یا هر دو و T نشان‌دهندهٔ پایانه‌های سطحی روی سطح لایه‌های فلز واسطه خارجی است. (مثل O, OH, F و ...) مکسین‌ها را می‌توان با استفاده از روش سنتز بالا به پایین سونش اسیدی انتخابی از والدین فازمکس $(M_{n+1}AX_n)$ به دست آورد، که A نشان‌دهندهٔ عناصر گروه ۱۳ و ۱۴ جدول تناوبی است[۲]. و پیش‌بینی می‌شود که همه مکسین‌های بدون پایانه‌های سطحی رسانای فلزی باشند که در آنها الکترون‌های آزاد فلزات واسطه به عنوان حاملین بار عمل می‌کنند، با این حال تغییر پایانه‌های سطحی می‌توانند خواص الکترونیکی مانند چگالی حالات و ساختار نواری و خواص نوری مانند ضریب جذب، ضریب شکست و بازتاب را تغییر دهند[۳]. پس بر این اساس انتظار می‌رود که خواص مکسین مورد مطالعهٔ ما با اعمال پایانه سطحی تغییر کند.

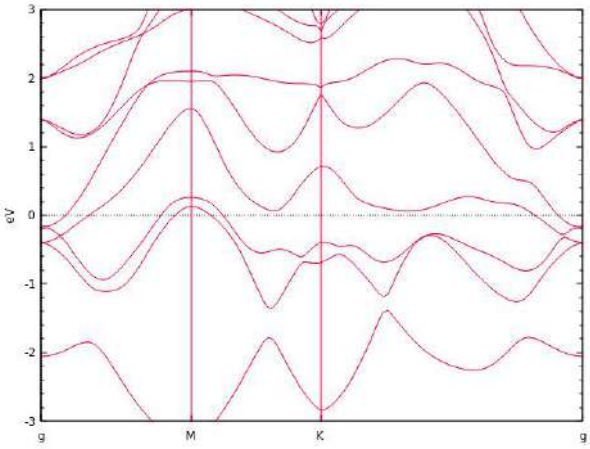
روش تحقیق:

به طور کلی، مکسین‌ها به صورت نظری با استفاده از نظریه تابعی چگالی (DFT) در تقریب گرادیان تعمیم یافته (GGA) مورد مطالعه قرار می‌گیرند. تابع تبادل همبستگی (PBE) در حال حاضر پرکاربردترین ابزار برای مطالعه ساختارهای دوره‌ای است. اگرچه این یک واقعیت شناخته شده است که PBE تا حد زیادی پهنای باند را کوچک می‌گیرد. بنابراین، برای بهبود شکاف باند، عملکرد ترکیبی پیشنهادی برای محاسبات حالت جامد (HSE06) اغلب استفاده می‌شود. این روش‌ها به دست آوردن خواص و روندهای کلی مورد انتظار در مکسین‌ها را ممکن می-کنند[۴]. لذا در این بررسی همه محاسبات بر اساس کدهای محاسباتی بر پایهٔ نظریه تابعی چگالی (DFT) در بسته شبیه‌سازی کوانتوم اسپرسو (QS) پیاده‌سازی می‌شود.

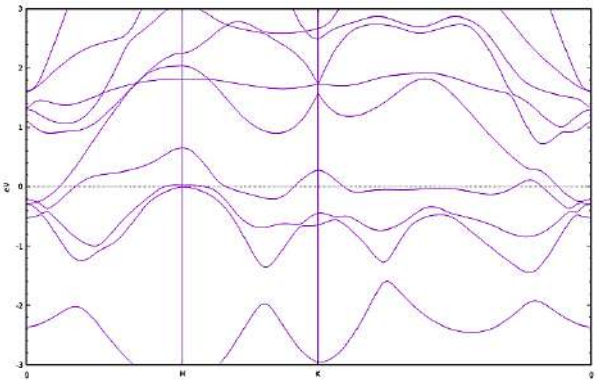
نتایج و بحث

با توجه به شکل۱ و شکل۲ به دلیل وجود نداشتن گاف در ساختار نواری مواد Nb_2C و Nb_2N هر دو این مواد فلز هستند. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر عنصر X در

فرمول مکسین (در اینجا نیتروژن را جایگزین کربن کردیم) باعث تغییر در خواص ماده از جمله خواص الکترونیکی و ساختار باندی آن می‌شود.

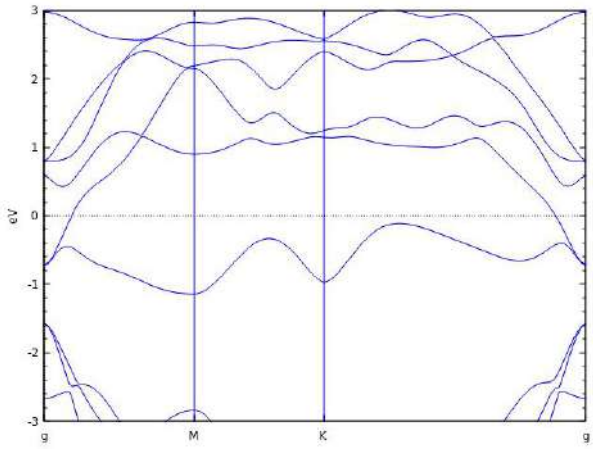


شکل ۱: ساختار نواری ماده Nb_2C

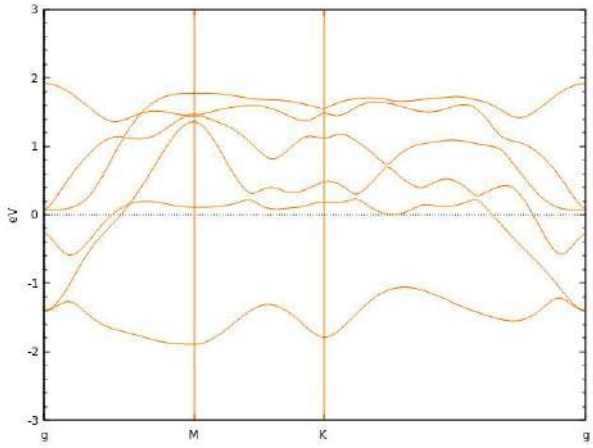


شکل۲: ساختار نواری ماده Nb_2N

همچنین با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ به دست می‌آید که مواد Nb_2C و Nb_2N در حضور پایانه سطحی O_2 نیز همچنان فلز هستند؛ اما ساختار نواری آنها و در نتیجه خواص الکترونیکی آنها تغییر می‌کند.

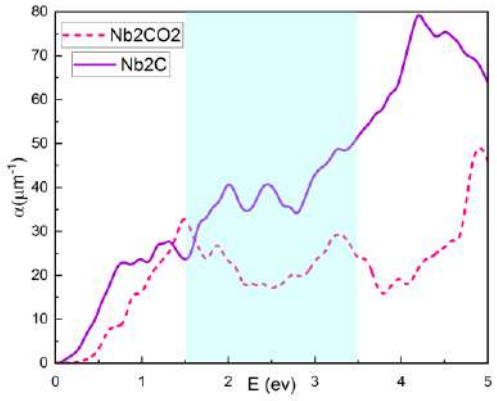


شکل ۳: ساختار نواری ماده Nb_2CO_2

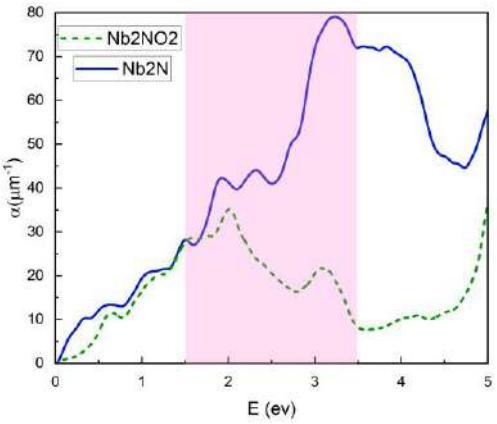


شکل ۴: ساختار نواری ماده Nb_2NO_2

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای ماده Nb_2C در ناحیه مرئی دو پیک در حدود $۲ev$ و $۲/۵ev$ قرار دارد، افزودن پایانه سطحی O_2 باعث کاهش قله‌ها و کاهش جذب در ناحیه مرئی می‌شود. در مورد ماده Nb_2N نیز از شکل ۶ میتوان نتیجه مشابهی را به دست آورد، این ماده در ناحیه مرئی یک پیک بزرگ در حدود $۳/۲ev$ و دو پیک کوچکتر در $۲ev$ و $۲/۳ev$ دارد که با افزودن پایانه سطحی، قله‌ها و در نتیجه جذب در ناحیه مرئی کاهش یافته است. البته این کاهش جذب فقط مربوط به ناحیه مرئی نیست و در مورد نواحی فرابنفش و مادون قرمز نیز با افزودن پایانه سطحی جذب کاهش می‌یابد.

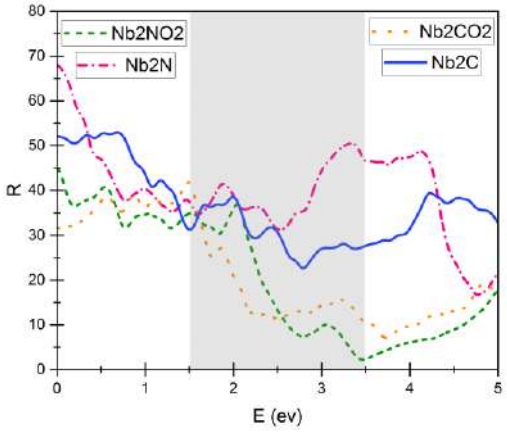


شکل۵: طیف جذبی ماده Nb_2C و Nb_2CO_2



شکل ۶: طیف جذبی ماده Nb_2C و Nb_2NO_2

با توجه شکل ۷ نیز به این نتیجه می‌رسیم که بازتاب مواد Nb_2C و Nb_2N نیز با افزودن پایانه سطحی کاهش می‌یابد.



شکل ۷: طیف بازتابی Nb_2N, Nb_2CO_2,Nb_2C Nb_2NO_2 ,

نتیجه‌گیری

مطالعه ویژگی‌های الکترونیکی و اپتیکی مکسین Nb_2C و Nb_2N با حضور و بدون حضور پایانه سطحی به ما این علم را می‌دهد که خواص مکسین‌ها به شدت به پایانه‌های سطحی وابسته است و با تغییر آنها خواص مکسین‌ها هم تغییر می‌کند.

مرجع‌ها

[۱] M. Naguib et al., Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti3AlC2. Adv. Mater. 23, 4248–4253.(۲۰۱۱)

[۲] M. Naguib, O. Mashtalir, J. Carle, V. Presser, J. Lu, L. Hultman, Y. Gogotsi, and M. W. Barsoum, ACS Nano 6, 1322 (2012).

[۳] N. M. Caffrey, Effect of mixed surface terminations on the structural and electrochemical properties of two-dimensional Ti3C2T2 and V2CT2 MXenes multilayers. Nanoscale 10, 13520–13530 (2018).

[۴] J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, Generalized gradient approximation made simple, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 3865–3868.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

شبیه‌سازی سردسازی لیزری گاز پوزیترونیوم

مهدی خنگال، مسعود رضوانی جلال (rezvanijalal@gmail.com)، ابراهیم غلامی حاتم

گروه فیزیک، فوتونیک و مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

چکیده – در این مقاله به سردسازی گاز پوزیترونیوم (یعنی حالت مقید الکترون-پوزیترون) با برهم‌کنش لیزری به صورت شبیه‌سازی در یک بعد پرداخته می‌شود. دمای اولیه گاز پوزیترونیوم ***K*** ۳۰۰ لحاظ می‌گردد که پهنای باند دوپلری آن برای گذار تابشی از تراز ۲ به تراز ۱ معادل با ***GHz*** ۴۶۲ می‌باشد. یک باریکه پالسی لیزر با پهنای باند ***GHz*** ۱۰۰ که فرکانس مرکزی آن قدری (به اندازه ***GHz*** ۵۰) از فرکانس تابشی پوزیترونیوم بیشتر است و طول پالس ۲۰۰ نانوثانیه دارد از دو طرف به این گاز تابیده می‌شود. محاسبات نشان می‌دهند که این برهمکنش قادر است که دمای گاز را قبل از اینکه دچار فروپاشی و فنا شود به حدود ***K*** ۵۰ برساند.

کلید واژه- پوزیترونویم، سردسازی لیزری، معادلات آهنگ، نیروی پس زنی.

Simulation of Laser Cooling of Positronium Gas

Mahdi Khangal, Masoud Rezvani Jalal, Ebrahim Gholami Hatam

Department of Physics, Photonics and Optics and lasers Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Abstract- In this paper, the cooling of positronium gas (i.e. electron-positron bound state) in the interaction with a laser is simulated in one dimension. The initial temperature of the positronium gas is considered to be 300 *K* which is equivalent with 462 *GHz* of Doppler broadening for level 2 to level 1 transition. A pulsed laser beam of 100 *GHz* which whose frequency is rather detuned (by 50 *GHz*) form the radiation frequency of the positronium and has 200 *ns* pulse length is incident on the gas from the both sides. Calculations show that such an interaction is able to cool the gas before its annihilation down to 50 *K*.

Keywords: Positronium, Laser cooling, Rate equations, Recoil force.

مقدمه

پوزیترون (پاد ذره الکترون) دارای بار مثبت است [۱و۲]. برهمکنش الکترون و پوزیترون امکان ایجاد اتم الکترون-پوزیترون را دارد که به آن پوزیترونیوم گفته می‌شود [۲]. پوزیترونیوم دارای طول‌عمر بسیار کوتاهی است و بسته به اینکه در چه حالت کوانتومی باشد عمر آن متفاوت است [۳و۴]. پوزیترونیوم با حالت اسپینی سه‌گانه به اورتو-پوزیترونیوم معروف است و بیشترین عمر به اندازه ۱۴۲ ns را دارا می‌باشد. برای اینکه بتوان کارآیی آن را افزایش داد و در کاربردهای نوینی همچون تداخل‌سنجی، طیف‌سنجی و ساخت مولکول پوزیترونیوم و یا آنتی‌هیدروژن و نیز چگالش بوز-اینشتین استفاده کرد لازم است که مورد سردسازی قرار گیرد [۴]. سردسازی لیزری یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای انجام این کار می‌باشد. در این سردسازی، نور لیزر با گاز برهمکنش می‌کند و تحت شرایط خاصی باعث سرد شدن آن می‌شود. البته در گاز پوزیترونیوم که طول عمر بسیار کوتاهی دارد باید مشخصات لیزر جوری باشد که بتواند در کوتاه‌ترین زمان ممکن و قبل از آنکه گاز پوزیترونیوم مورد واپاشی قرار گیرد سردسازی را انجام داده باشد. شبیه‌سازی این فرایند در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است و عملیات تجربی آن در مرحله انجام می‌باشد [۴-۶]. البته مباحث بسیاری در این خصوص وجود دارند که هنوز مورد دقت و وارسی قرار نگرفته‌اند مثل تاثیر میدان الکتریکی و مغناطیسی خارجی در سردسازی لیزری و یا سردسازی با پالس‌های بسیار کوتاه فمتوثانیه و روند اجرای آن [۴و۵].

در مقاله حاضر، شبیه‌سازی یک بعدی سردسازی لیزری گاز پوزیترونیوم با تقریب جذب کامل و از طریق حل عددی معادلات آهنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختار مقاله به این صورت است که ابتدا فرمول‌بندی مسئله ذکر می‌گردد. سپس، نتایج شبیه‌سازی و بحث در مورد آنها ارائه می‌شود. انتهای مقاله نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ختم می‌گردد.

مبانی نظری

با حل معادله شرودینگر پوزیترونیوم و احتساب برهمکنش اسپین-مدار، ترازهای انرژی به شکل زیر پیدا می‌شوند [۴]:

$$E = E_h\left[-\frac{1}{2n^2}+\frac{2\alpha^2}{n^3}\left(\frac{11}{64n}-\frac{1+\varepsilon/2}{2(2l+1)}\right)\right] \qquad (۱)$$

که در آن n=1,2,… عدد کوانتومی مداری، α=1/137 ثابت ساختار ریز، E_h=2.18×10^{-18}J انرژی هارتری و l اندازه حرکت مداری می باشد. ε برای اسپین کل S=0 دارای مقدار ε=0 است، برای S=1 و l=0 نیز دارای مقدار ε=-7/3 می‌باشد و برای S=1 و سایر l ها نیز با رابطه زیر پیدا می‌شود:

$$\varepsilon = \delta_{j,l+1}\frac{-(3l+4)}{(l+1)(2l+3)}+\delta_{j,l}\frac{l}{(l+1)} + \delta_{j,l-1}\frac{(3l-1)}{l(2l-1)} \qquad (۲)$$

نماید طیفی تراز پایه پوزیترونیوم با اسپین سه‌گانه به صورت $1\,^3S_1$ است. حالت‌های برانگیخته با اسپین سه‌گانه نیز دارای نماد $2\,^3P_{J(=0,1,2)}$ می‌باشند. معمولاً تراز برانگیخته $2\,^3P_1$ برای سردسازی لیزری لحاظ می‌شود [۵و۶]. با رابطه (۱) می‌توان فهمید که اختلاف انرژی تراز $1\,^3S_1$ با تراز $2\,^3P_1$ در حدود 5.1 eV است که معادل طول‌موج λ_0=243 nm می‌باشد. از طرف دیگر، پوزیترونیوم‌های درون گاز دارای سرعت‌های تصادفی گرمایی هستند و، از این رو، گذار تابشی بین ترازهای انرژی مذکور دارای پهن‌شدگی دوپلری خواهد بود. پهنای خط دوپلری در گازی به دمای T و جرم اتمی m و فرکانس مرکزی ν_0 نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\nu = \sqrt{\frac{8kT\,Ln2}{mc^2}}\nu_0 \qquad (۳)$$

که در یک گاز پوزیترونیومی با T=300 K و m=2m_e (که m_e جرم الکترون است) دارای مقدار ۴۶۲ GHz می‌باشد. لیزرهایی که پهنای باند زیاد دارند عموماً حالت جامد با پهنای نوعی ۱۰۰ GHz هستند. مثلاً لیزر Ti:Sapphire

دارای پهنای GHz ۴۰ است که می‌تواند درصد خوبی از پهنای دوپلری گاز پوزیترونیوم را پوشش دهد [۴].

در یک گاز (اینجا یک بعدی) سرعت‌های اتمی به صورت متقارن و به شکل گاوسی حول $v=0$ توزیع شده‌اند. اتم‌هایی که سرعت صفر دارند همان فرکانس مرکزی v_0 را گسیل و جذب می‌کنند و اتم‌های با سرعت غیر صفر نیز فرکانس‌های کمتر یا بیشتر را انتخاب می‌کنند. از آنجا که در سردسازی لیزری قرار است اتم‌های در حال حرکت به سرعت‌های کمتر (و حتی صفر) برسند لازم است که فرکانس لیزر فرودی با فرکانس مرکزی v_0 متفاوت و ناکوک باشد چون اگر با آن مساوی باشد آنگاه با اتم‌های ساکن برهمکنش خواهد کرد که نه تنها کمکی به سردسازی نمی‌کند بلکه باعث گرم‌تر شدن گاز نیز می‌شود [۴]. از طرف دیگر، ناکوکی باید مثبت باشد یعنی فرکانس لیزر باید از v_0 بیشتر باشد چون در غیر این صورت باز هم به جای سردسازی، گرمایش رخ می‌دهد.

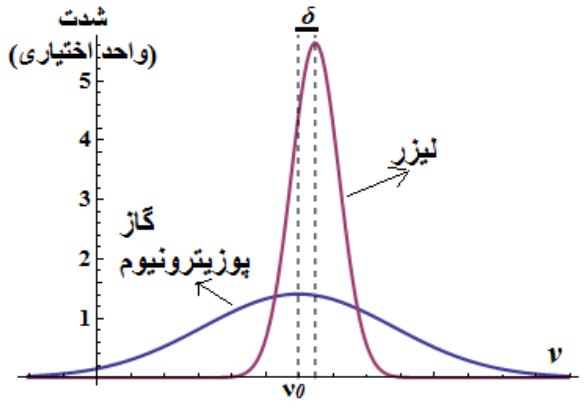
حال که با مشخصات گاز و لیزر آشنایی حاصل شد به بررسی برهمکنش لیزر-گاز پوزیترونیوم پرداخته می‌شود. برای این منظور از معادلات آهنگ استفاده خواهد شد. در برهمکنش لیزر با گاز سه پدیده جذب، گسیل خودبه‌خودی و گسیل القایی رخ می‌دهد. از آنجا که هدف از این مقاله به دست آوردن بیشترین مقدار بازدهی سردسازی است از گسیل القایی صرف نظر می‌شود. با این فرض، در برهمکنش لیزر و گاز فقط فرض می‌گردد که فوتون‌ها توسط اتم‌ها جذب می‌شوند و تمام تکانه خود را به آنها منتقل می‌کند. با این فرض، اگر شرایط لیزر (از بابت پهنای فرکانسی و ناکوکی) و شرایط گاز (هندسه و دما) مناسب باشد آنگاه تکانه منتقل شده از فوتون‌ها به اتم‌ها باعث سردسازی خواهد شد. معادله آهنگ جمعیت تراز پایه $1\,^3S_1$ به صورت زیر است [۴]:

$$\frac{d\Delta N(\nu)}{dt}=\frac{\Delta N_t-\Delta N(\nu)}{\tau_s}-AI(\nu)\Delta N(\nu) \qquad (۴)$$

که در آن A ضریب جذب، $I(\nu)$ شدت طیفی لیزر و ΔN_t نیز تعداد پوزیترونیوم‌ها در بازه $\Delta\nu$ می‌باشد. $\Delta N(\nu)$ جمعیتی از پوزیترونیوم‌ها در تراز پایه را نشان می‌دهد که فرکانس جذبی آنها ν باشد. τ_s زمان گسیل خودبه‌خود است که برای ارتو-پوزیترونیوم $\tau_s=3.2\ nm$ می‌باشد [۴]. برای یک لیزر که طول پالس خیلی بلندتری از این مقدار دارد (مثلاً ns ۲۰۰) می‌شود جواب حالت پایای رابطه (۴) را به صورت $\Delta N(\nu)=\frac{N}{1+\tau_s AI(\nu)}$ پیدا کرد. با این جواب به راحتی می‌توان جمعیت ترازها و از آنها نیز نیروی پس‌زنی وارد بر هر پوزیترونیوم و سردسازی ناشی از آنرا محاسبه نمود.

شبیه‌سازی

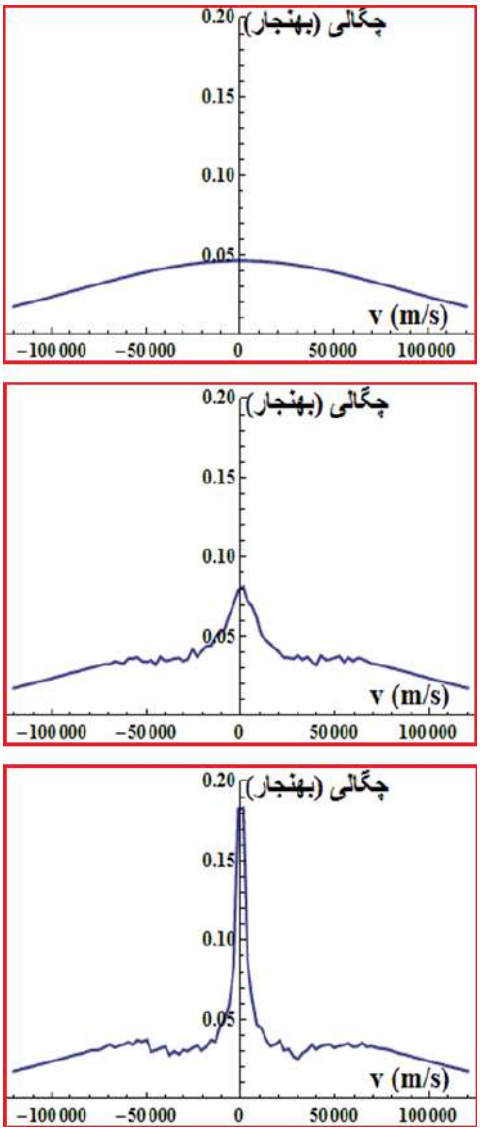
برای شبیه‌سازی، یک گاز حاوی $N=1000$ پوزیترونیوم که همگی در حالت پایه با دمای K ۳۰۰ هستند لحاظ می‌گردد. از یک لیزر پالسی با توزیع گاوسی و پهنای $\Delta\nu_L=100\ GHz$ که فرکانس مرکزی آن به اندازه $\delta=50\ GHz$ از فرکانس تشدیدی پوزیترونیوم (ν_0) ناکوکی مثبت دارد برای سردسازی استفاده می‌گردد. در شکل ۱ توزیع فرکانسی بهنجار شده لیزر و نیز توزیع فرکانس جذبی گاز پوزیترونیوم برای مقایسه آورده شده است.



شکل ۱: توزیع فرکانس تابش لیزر و فرکانس جذبی گاز پوزیترونیوم.

در شکل ۲ نیز تحول زمانی توزیع سرعتی گاز پوزیترونیوم برای زمان‌های ns ۰، ns ۱۰۰ و ns ۲۰۰ نشان داده شده است. در این شبیه سازی از پالسی به طول ns ۲۰۰ استفاده

شده است. از شکل ۲ به وضوح معلوم است که در برهمکنش لیزر با گاز پوزیترونیوم، توزیع سرعت که در ابتدا به شکل گاوسی پهن است با گذشت زمان به شکل یک تابع تیز که در سرعت $v=0$ دارای بیشینه تیز است تبدیل می‌شود. این همان سردسازی لیزری پوزیترونیوم است که امکان‌پذیر بودن آنرا با لیزر پالسی تایید می کند.



شکل ۲: توزیع سرعتی گاز پوزیترونیوم در زمان‌های مختلف سردسازی ns ۰، ns ۱۰۰ و ns ۲۰۰ به ترتیب از بالا به پایین.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به شبیه‌سازی سردسازی گاز پوزیترونیوم از طریق برهمکنش با یک لیزر پالسی و نیز استفاده از معادلات آهنگ ترازهای انرژی پرداخته شد. معلوم گردید که با استفاده از یک لیزر پالسی (با طول پالس چند صد نانوثانیه) که دارای پهنای طیفی زیاد (برای پوشش دادن مناسب توزیع طیف دوپلری گاز پوزیترونیوم) است و ناکوکی مناسبی از فرکانس مرکزی تابش پوزیترونیوم دارد می‌توان گاز را در کمتر از زمانی که دچار واپاشی و فنا شود تا دماهای بسیار کم سردسازی کرد. برازش نمودار شکل ۲-پایین با توزیع بولتزمن (که در اینجا آورده نشده است) نشانگر این است که دما به ۵۰ کلوین در کمتر از ۲۰۰ نانوثانیه رسیده است. این آهنگ بسیار سریع کاهش دما از ویژگی‌های برجسته سردسازی لیزری است که مخصوصاً برای پوزیترونیوم که طول عمر بسیار کوتاهی دارد مناسب است.

بررسی اثر سایر عوامل فیزیکی همچون میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی خارجی در ابعاد بالاتر (مخصوصاً سه بعد) جزء کارهای در حال انجام نویسندگان مقاله می‌باشد.

سپاسگزاری

از دانشگاه ملایر به خاطر حمایت از این کار پژوهشی قدردانی می‌شود.

مرجع‌ها

Paweł Moskal and et al., “**Positronium in medicine and biology**”, Nature Reviews: Physics, Vol. 1 (2019) 527.

David B. Cassidy, “**Experimental progress in positronium laser physics**”, Eur. Phys. J. D (2018) 72: 53.

Nagendra Nath Mondal, “**A novel detection system for laser cooling of ortho-positronium**”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 495 (2002) 161–169.

Christian Zimmer and et al., “**Positronium laser cooling in a magnetic field**”, PHYSICAL REVIEW A 104, 023106 (2021).

S. Aghion and et al., “**Producing long-lived 2^3S positronium via 3^3P laser excitation in magnetic and electric fields**”, PHYSICAL REVIEW A 98, 013402 (2018).

K. Shu1, Y. Tajima, R. Uozumi, and et al, “**Laser cooling of positronium**”, arXiv:2310.08761v2 [physics.atom-ph] (2023).

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

پهن‌شدگی دوپلری خطِ تابش یک دوقطبی نوسانیِ مرتعش

مسعود رضوانی جلال (rezvanijalal@gmail.com)، فاطمه اله‌بخشی و زهرا اله‌بخشی

گروه فیزیک و مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

چکیده – در این مقاله به پهن‌شدگی خط تابش یک دوقطبی الکتریکی نوسانی که در حال حرکت ارتعاشی نیز است و اثر دوپلر آن را دریافت می‌کند پرداخته می‌شود. ابتدا فرمول حاکم بر اثر دوپلر ارتعاشی و تاثیر آن بر فاز و میدان الکتریکی تابش دوقطبی به دست می‌آید. سپس، فرکانس‌های تولید شده در هر دامنه سرعت ارتعاشی و نیز میانگین‌گیری آماری آن بر روی تعداد بسیار زیادی نوسانگر با به کارگیری تابع توزیع بولتزمن به صورت عددی محاسبه می‌گردد. نشان داده می‌شود که برخلاف پهن‌شدگی دوپلری معمولی که دارای شکل خط گاوسی است، پهن‌شدگی ناشی از ارتعاش دارای شکل نوک‌تیز لاپلاسی می‌باشد. این اثر می‌تواند بنیان‌گذار نوع جدیدی از طیف‌سنجی اتمی و مولکولی در جامدات تلقّی گردد.

کلید واژه- آنالیز فوریه، اثر دوپلر ارتعاشی، پهن‌شدگی خط، تابش دوقطبی، توزیع لاپلاس.

Doppler Broadening in the Radiation Line of a Vibrating Oscillating Dipole

Masoud Rezvani Jalal, Fatemeh Allahbakhshi, Zahra Allahbakhshi

Department of Physics and Optics and lasers Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Abstract- In this paper, the radiation line broadening of an oscillating electrical dipole which also has a vibrational motion and, hence is affected by its Doppler effect, is considered. Firstly, the governing equation on the vibrating Doppler effect and its influence on the phase and electric field of the dipole radiation is obtained. Then, the generated frequencies for each velocity vibration amplitude and also statistical averaging on many oscillators using Boltzmann distribution function is numerically calculated. It is shown that contrary to the traditional Doppler effect which is Gaussian, the broadening due to vibration has a sharp Laplace shape. Such an effect can be a base for a new kind of atomic and molecular spectroscopy in solids.

Keywords: Fourier analysis, Vibrating Doppler effect, Line broadening, Dipole radiation, Laplace distribution.

مقدمه

با روش‌هایی همچون بار الکتریکی شتابدار، نوسان دوقطبی الکتریکی و مغناطیسی، گذار بین ترازهای انرژی، خلق و نابودی زوج و ... می‌توان تابش الکترومغناطیسی تولید کرد. تابش دوقطبی آشناترین و آموزنده‌ترین مسئله مربوط به تابش می‌باشد. در این تابش، فاصله بین دو بار غیرهم‌نام به صورت نوسانی با فرکانس ω تغییر می‌کند و در نتیجه آن یک موج الکترومغناطیسی با فرکانس ω گسیل می‌شود. فرمول‌بندی این مسئله در متون الکترومغناطیس موجود است [۱]. موضوعی که می‌تواند از لحاظ مطالعاتی و نیز کاربردی جالب باشد حرکتِ یک دوقطبی نوسانی است. وقتی که یک دوقطبی نوسانی در حالِ تابش، حرکت هم داشته باشد آنگاه تابش آن دچار اثر دوپلر می‌گردد و فرکانسی غیر از ω توسط ناظر دریافت خواهد شد [۲]. اگر حرکت به صورت یکنواخت با سرعت معلوم باشد آنگاه به راحتی می‌توان فرکانس جدید را حساب کرد. اگر هم مجموعه‌ای از دوقطبی‌های نوسانی با حرکت‌های انتقالیِ گرمایی وجود داشته باشد یک پهن‌شدگی در خط تابشی ایجاد می‌گردد. این پهن‌شدگی از نوع ناهمگن با تابع توزیع گاوسی است که در مراجع به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. حال اگر دوقطبی تابشی به جای حرکت یکنواخت یک حرکت ارتعاشی داشته باشد پیچیدگی مسئله بیشتر می‌شود. در کار قبلی نویسندگان مقاله حاضر نشان داده شده است که اثر دوپلر در یک دوقطبی نوسانیِ مرتعش منجر به تولید فرکانس‌های جدید متعدد می‌گردد [۴]. تعداد این فرکانس‌ها به دامنه ارتعاشی نوسانگر بستگی دارد و هرچه دامنه بیشتر شود فرکانس‌های جدید بیشتری ایجاد می‌گردند. سؤالی که اکنون پیش می‌آید این است که اگر مجموعه‌ای از چنین دوقطبی‌های نوسانی مرتعش وجود داشته باشد و دامنه ارتعاشی آنها دارای یک توزیع (مثلاً توزیع حرارتی ماکسول) باشد آنگاه تابع پهن‌شدگی خط تابشی به چه صورت خواهد بود؟ برای پاسخ به این سؤال باید به مکانیک آماری متوسّل شد که در مقاله حاضر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

ساختار مقاله بدین صورت است: ابتدا فرمول‌بندی اثر دوپلر در تابش دوقطبی الکتریکی نوسانیِ مرتعش ارائه می‌گردد. سپس، توزیع فرکانس و پهن‌شدگی ناشی از حرکت ارتعاشی گرمایی شبیه‌سازی شده و تحت بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ذکر می‌گردد.

فرمول‌بندی

یک دوقطبی که با فرکانس ω در حال نوسان است و مکان آن نیز دارای حرکت ارتعاشی با فرکانس ω_v می‌باشد در نظر گرفته می‌شود. نوری که توسط این دوقطبی نوسانی گسیل می‌گردد دارای فرکانس ω است ولی به خاطر سرعت ارتعاشی که دارد دچار اثر دوپلر می‌شود. سرعت ارتعاشی آن را می‌توان به صورت هارمونیک در نظر گرفت:

$$v(t) = v_0 Cos(\omega_v t) \qquad (۱)$$

که در آن v_0 دامنه سرعت ارتعاش است. با استفاده از فرمول اثر دوپلر معلوم می‌گردد که فرکانس لحظه‌ای گسیل شده توسط این دوقطبی نوسانیِ ارتعاشی به شکل زیر است [۴]:

$$\omega' = \omega \frac{1}{1 - v_0 Cos(\omega_v t)/c} \qquad (۲)$$

که در آن c سرعت نور در محیط می‌باشد. فاز حرکت ارتعاشی نیز با انتگرال این فرکانس به دست می‌آید:

$$\phi(t) = \int_0^t \omega' \, dt \qquad (۳)$$

با توجه به اینکه سرعت ارتعاشی از سرعت نور خیلی کوچک‌تر است می‌توان فهمید که v_0/c در رابطه (۲) عدد کوچکی از مرتبه 10^{-2} (و حتی کمتر) است. با این وضع می‌توان رابطه (۲) را به شکل زیر ساده‌تر کرد:

$$\omega' = \omega(1 + v_0 Cos(\omega_v t)/c) \qquad (۴)$$

با این رابطه، فاز (۳) نیز به شکل زیر به صورت تحلیلی به دست می‌آید:

$$\phi(t) = \omega t + \omega \frac{v_0}{c\omega_v} Sin(\omega_v t) \qquad (۵)$$

که اگر در میدان الکتریکی تابش قرار داده شود رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$E(t) = E_0 Cos\left(\omega t + \omega \frac{v_0}{c\omega_v} Sin(\omega_v t)\right) \qquad (۶)$$

با ترسیم زمانی میدان و آنالیز فوریه آن می‌توان فرکانس‌های موجود در تابش را شناسایی کرد. اگر v_0 یا ω_v در رابطه (۶) برابر با صفر باشد یعنی هیچ ارتعاشی وجود ندارد و فقط فرکانس ω که همان فرکانس تابش دوقطبی است ظاهر می‌گردد. اگر v_0 مخالف با صفر باشد آنگاه غیر از فرکانس اصلی ω فرکانس‌های دیگر هم ظاهر خواهند شد. تعداد این فرکانس ها همانطور که مرجع [۴] ذکر شده است به v_0 بستگی دارد و هرچه v_0 بیشتر شود تعداد آنها نیز بیشتر می‌گردد. این موضوع متفاوت از اثر دوپلر در یک سیستم تابشی با سرعت ثابت است که در آن فقط یک فرکانس جدید ایجاد می‌شود.

حال فرض می‌شود که v_0 مربوط به تابنده‌های ارتعاشی از یک تابع توزیع تبعیت کنند. از لحاظ آمار ماکسول-بولتزمن، این تابع توزیع همان عامل بولتزمن است. می‌دانیم که انرژی مکانیکی کل یک سیستم ارتعاشی به صورت زیر است:

$$U(v_0) = \frac{1}{2} m v_0^2 \qquad (۷)$$

که اگر در عامل بولتزمن قرار داده شود به توزیع زیر منجر می‌گردد [۳]:

$$f(v_0) \propto e^{-\frac{U(v_0)}{kT}} \qquad (۸)$$

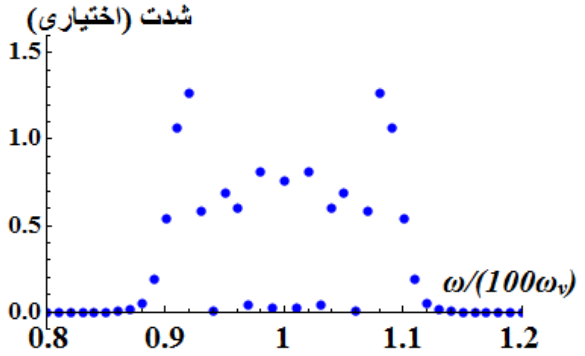
که در آن T دمای مطلق می‌باشد. با استفاده از این توزیع می‌توان جمعیّت ارتعاش کننده‌های دارای دامنه سرعتی v_0 را شناسایی کرد و دامنه میدان الکتریکی در رابطه (۶) را به صورت زیر به دست آورد:

$$E(t) = E_0 f(v_0) Cos\left(\omega t + \omega \frac{v_0}{c\omega_v} Sin(\omega_v t)\right) \qquad (۹)$$

اگر در این رابطه $\omega_v=0$ قرار داده شود (یعنی هیچ ارتعاشی نباشد) و از توزیع (۸) و رابطه (۴) استفاده گردد آنگاه پهن‌شدگی معمولی دوپلری که ناشی از فقط حرکت انتقالی است و از لحاظ شکل تابعی نیز به صورت گاوسی می‌باشد حاصل می‌گردد که نشان از درستی فرمول‌بندی می‌باشد. اگر هم ارتعاش مخالف صفر باشد آنگاه با گرفتن تبدیل فوریه رابطه (۹) و سپس گرفتن انتگرال آن بر روی تمام v_0ها پهن‌شدگی دوپلری ناشی از حرکتِ ارتعاشی پیدا خواهد شد. در بخش بعد به این موضوع پرداخته می‌شود.

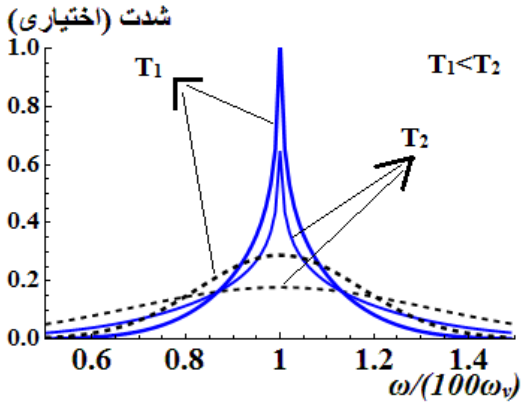
شبیه‌سازی

فرکانس‌های تابشی اتم‌ها معمولاً در حوزه مرئی و از مرتبه 10^{14} Hz است و فرکانس ارتعاشی اتمی نیز در حوزه فروسرخ با مرتبه 10^{12} Hz می‌باشد. به عبارت دیگر نسبت ω/ω_v حدود 10^2 است. سرعت‌های گرمایی نیز چندین مرتبه از سرعت نور کمتر هستند و می‌توان مقدار c/v_0 را بیشتر از ۱۰ برابر انتخاب کرد. با این مرتبه‌ها می‌شود تأثیر اثر دوپلر ارتعاشی بر فرکانس تابشی یک دوقطبی را حساب نمود. در شکل ۱ برای مثال نوعی $\omega=100\omega_v$ و نیز $c=10v_0$ فرکانس‌های جدید ظاهر شده نشان داده شده است.



شکل ۱: فرکانس‌های ظاهر شده ناشی از حرکت ارتعاشی یک نوسانگر تابنده با فرکانس $\omega=100\omega_v$ و دامنه سرعت ارتعاشی $v_0=c/10$.

حال اگر روی تعداد زیادی سرعت ارتعاشی اتمی (از ۰ تا c) میانگین آماری (با رابطه (۸)) گرفته شود تابع شکل‌خط تابش به دست خواهد آمد. در شکل ۲ نتیجه این شبیه‌سازی برای مثال عددی فوق‌الذکر نشان داده شده است. از شکل ۲ به وضوح معلوم است که تابع شکل‌خط مربوط به تابش یک دوقطبی نوسانیِ مرتعش به صورت یک تابع نوک‌تیز لاپلاسی است که در فرکانس مرکزی $\omega=100\omega_v$ قله دارد.



شکل ۲: (نمودار توپر) تابع شکل‌خط مربوط به تابش یک دوقطبی نوسانیِ مرتعش. نمودار خط‌چین مربوط به تابع شکل‌خط گاوسی برای پهن‌شدگی دوپلریِ معمولی است. اثر دما (T) بر افزایش پهنا نیز کاملاً مشخص است.

این پهن‌شدگی که ناشی از اثر دوپلر ارتعاشی است با پهن‌شدگی دوپلری متداول که ناشی از حرکت انتقالی است و تابعیت آن به صورت گاوسی است متفاوت می‌باشد. شکل‌خط گاوسی نیز در شکل ۲ به صورت خط‌چین جهت مقایسه آورده شده است.

برای مطالعه اثر دما بر میزان پهن‌شدگی دو دمای مختلف و دلخواه T_1 و T_2 ($T_1<T_2$) انتخاب شد و شکل‌خط‌های مربوطه ترسیم گردید. در شکل ۲ این مورد نشان داده شده است. از این مقایسه مشخص است که با افزایش دما، تابع شکل‌خط لاپلاسی نیز پهن می‌گردد و از ارتفاع و تیزی آن کاسته می‌شود. این رفتار مشابه با تابع شکل‌خط گاوسی در پهن‌شدگی دوپلری متداول می‌باشد.

قابل ذکر است که برای انجام شبیه‌سازی‌های فوق از محیط *Mathematical* و کدنویسی در آن استفاده شده است. این کُد مشخصات نوسانگر و تعداد و توزیع سرعت آنها را دریافت می‌کند و میدان‌های تابشی مربوطه را از فرمول (۹) محاسبه کرده و از آنها تبدیل فوریه می‌گیرد و در نهایت نیز توزیع فرکانسی و تابع شکل خط را با میانگین‌گیری پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به پهن‌شدگی خط تابشی یک دوقطبی نوسانی که در حال ارتعاش نیز می‌باشد، پرداخته شد. با شبیه‌سازی معلوم گردید که تابع شکل‌خط تابش بر خلاف پهن‌شدگی دوپلری مرسوم که به صورت گاوسی است دارای یک شکل نوک‌تیز لاپلاسی می‌باشد. این تابع شکل‌خط با افزایش دما پهن‌تر می‌شود که از این حیث شبیه به پهن‌شدگی دوپلری معمولی (ناشی از سرعت انتقالی ثابت) می‌باشد. این پدیده یک دست‌آورد جدید است و تاکنون در هیچ منبعی مورد اشاره و مطالعه قرار نگرفته است. این یافته جدید می‌تواند تاثیر مهمی در طیف‌سنجی اتمیِ جامدات داشته باشد. به عبارت دیگر، با ثبت طیف اتمی و برازش آن با یک تابع لاپلاسی می‌توان دامنه و سرعت ارتعاش محلی هر اتم مرتعشِ در حال تابش را پیدا کرد. ساخت دستگاه طیف‌سنج مبتنی بر این یافته جزء کار آتی نویسندگان مقاله می‌باشد.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه ملایر جهت حمایت از این کار پژوهشی قدردانی می‌شود.

مرجع‌ها

[۱] ریتس، میلفورد، کریستی؛ مبانی نظریه الکترومغناطیس، ترجمه: جلال صمیمی و همکاران، ۱۳۸۴.

[2] Arnt Inge Vistnes; Physics of Oscillations and Waves, Springer, 2016.

[3] Khelifa Djerroud et al, “Measurement of the Boltzmann constant by the Doppler broadening”, C. R. Physique 10 (2009) 883–893.

[۴] رضوانی‌جلال، مسعود؛ الهبخشی، زهرا؛ الهبخشی، فاطمه؛ "اثر دوپلر در تابش یک دوقطبی الکتریکی نوسانی مرتعش"، سی و نهمین کنفرانس فیزیک ایران ۱۴۰۲، اصفهان، صفحه ۳۶۴-۳۶۷.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی عملکرد یک حسگر زیستی تراهرتز مبتنی بر فراماده

سیده رقیه حمیدی، محمد رزاقی

دانشگاه کردستان

s.roghaye.hamidi@gmail.com, mrazaghi@gmail.com

چکیده - یکی از ویژگی‌های فرامواد کنترل و هدایت نور است. استفاده از این ساختار در حسگرهای زیستی می‌تواند به بهبود عملکرد آن‌ها کمک کند. در این مقاله به ارائه ساختاری از فراماده شامل دو سیم-شکل و دو U-شکل پرداخته شده است. در اثر اندرکنش مدهای دوقطبی و چهارقطبی ایجاد شده در فراماده، تشدید EIT و Fano ایجاد می‌شود. در این تشدیدها نور بدون جذب از ساختار عبور می‌کند. طبق نتایج شبیه‌سازی انجام شده به روش المان محدود، مقدار حسگری برای این ساختار ۱۰۴GHz/RIU به دست آمد که در مقایسه با حسگرهای زیستی مشابه از عملکرد بهتری برخوردار است.

کلید واژه- حسگر زیستی، فراماده، تراهرتز، تشدید EIT و Fano

Investigation of the performance of a terahertz biosensor based on metamaterial

S.Roghayeh Hamidi, Mohammad Razaghi

s.roghaye.hamidi@gmail.com, mrazaghi@gmail.com

Abstract- One of the characteristics of metamaterials is light control and guidance. This structure can help to improve their performance in biosensors. In this article, a structure of metamaterial including two wire-shaped and two U-shaped is presented. EIT and Fano resonances are caused by the interaction of dipole and quadrupole modes in metamaterials. In these resonances, light passes through the structure without absorption. According to the results of the finite element simulation, the sensor value for this structure was 104 GHz/RIU. which has better performance compared to similar biosensors.

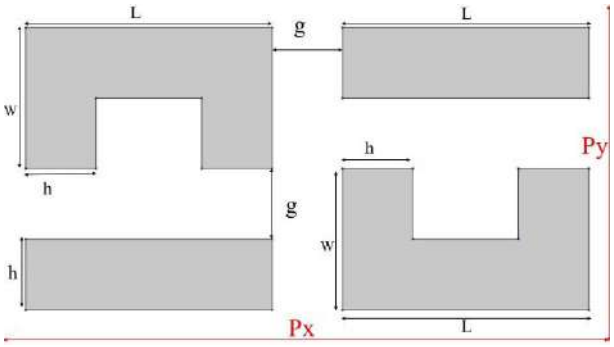
Keywords: Biosensor, Metamaterials, THz, EIT and Fano resonance

مقدمه

فراموادساختارهای مصنوعی با ابعادی کوچکتر از طول موج نور فرودی هستند که در طبیعت یافت نمی‌شوند. فراموادتوانایی هدایت و کنترل نور را دارند از این رو در دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [1,2]. در فراموادمی‌توان ساختار را به صورت دو جزء تعریف کرد به طوریکه در نتیجه اندرکنش نور فرودی با هر جزء مدهای روشن و تاریخ ایجاد شود. جفت‌شدگی مدهای روشن و تاریک پدیده شبیه-EIT را ایجاد می‌کند [3]. تشدید شبه-EIT در فراموادبه محیط روی سطح ساختار حساس است و تغییر جزئی در محیط می‌تواند فرکانس تشدید را تغییر دهد بنابراین با تغییر ضریب شکست یا ضخامت ماده روی سطح در فرکانس تشدید شبه-EIT تغییر ایجاد می‌شود [4]. در چند سال گذشته از فراموادبا پدیده شبه-EIT در ساختار حسگرهای زیستی استفاده شده است. برای بررسی سلول‌های زیستی در حسگرها از امواج تراهرتز استفاده می‌شود زیرا بسیاری از سلول‌های زیستی دارای ارتعاشی در محدوده طیف تراهرتز هستند. به علاوه خطر یونیزاسیون عنصر زیستی در طیف تراهرتز وجود ندارد [5,6]. در این مقاله یک سلول واحد فراماده در ابعاد میکرومتری در بازه فرکانسی تراهرتز طراحی و شبیه‌سازی شده است. میزان حساسیت این ساختار نسبت به تغییرات ضریب شکست و نیز تغییرات ضخامت آنالیت محاسبه و با نمونه قبلی مقایسه شده است. مشخص شد که ساختار پیشنهادی در این مقاله از عملکرد بهتری برخوردار است [7].

طراحی ساختار

حسگرهای فراماده شامل یک زیر لایه به عنوان بستر از جنس دی‌الکتریک و سلول واحد فراماده فلزی هستند. تشدید الکترومغناطیسی در لایه فلزی ایجاد می‌شود. از این رو تغییر در هندسه فراماده سبب تغییر در فرکانس تشدید می‌شود. در این مقاله ساختار فراماده از جنس آلومینیوم و به ضخامت μm ۱۰ در نظر گرفته شده است و شامل دو سیم و دو حلقه U-شکل است. لایه فلزی با مدل درود مدل-سازی شده است. هر کدام از حلقه‌ها روبروی یک سیم طراحی شده است. اندازه سلول واحد طراحی شده در راستای x با Px و راستای y با Py مشخص شده است و به ترتیب μm ۱۰۰۰ و μm ۵۰۰ است. ساختار هندسی مورد نظر در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است.

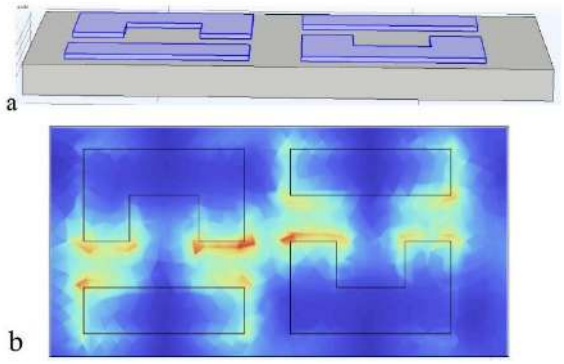


شکل ۱: سلول واحد متشکل از سیم و حلقه U-شکل

L طول ضلع پایین U-شکل و سیم برابر μm ۳۵۰ است. ضخامت سیم و U-شکل h=۱۰۰ μm است. سایر پارامترهای ساختار به صورت w=۲۰۰ μm، g=۱۰۰ μm است. ساختار فراماده بر روی لایه‌ای از جنس پلیمر PI [8] با ضخامت μm ۶۰ و ضریب شکست ۱/۷۶ به عنوان بستر قرار می‌گیرد.

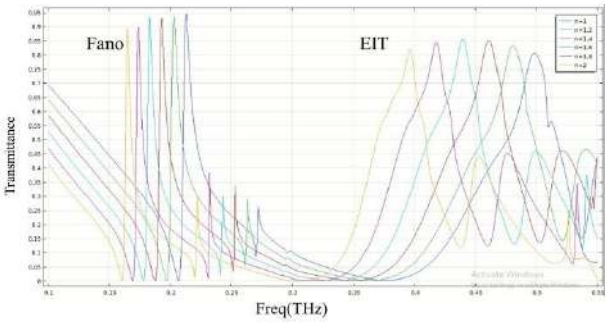
شبیه‌سازی ساختار

سلول واحد فراماده در یک آرایه تناوبی در جهت x و y با شرایط مرزی Floquet شبیه‌سازی شده است. در مرزهای بالا و پایین شرط مرزی PML اعمال شده است. شبیه‌سازی با روش المان محدود (Finite element method–FEM) انجام شده است. موج تراهرتز به طور عمودی بر سطح ساختار برخورد می‌کند. در شکل۲ طرحواره‌ای از ساختار طراحی شده و نیز تشدید در ساختار فراماده نشان داده شده است.



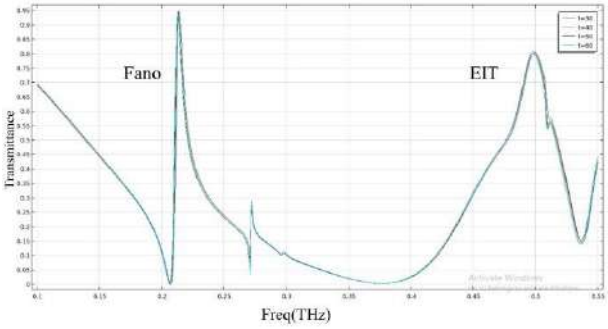
شکل۲: a) طرحواره‌ای از ساختار طراحی شده b) توزیع میدان الکتریکی برای تشدید EIT

در اثر برخورد موج تراهرتز با ساختار U-شکل چهار قطبی الکتریکی و با سیم، دو قطبی الکتریکی ایجاد می‌شود. اندرکنش چهارقطبی-دوقطبی سبب ایجاد پیک تشدید EIT و Fano می‌شود . بر روی ساختار یک لایه آنالیت به ضخامت μm ۳۰ قرار گرفت. میزان تغییر فرکانس تشدید EIT برای تغییر ضریب شکست و نیز تغییر ضخامت آنالیت محاسبه شد. ابتدا لایه آنالیت با ضخامت μm ۵۰ در نظر گرفته شد. با تغییر ضریب شکست آنالیت، فرکانس تشدید EIT و Fano جابه‌جا می‌شود. در شکل ۳ تغییرات فرکانس برحسب ضریب شکست نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار طیف نور عبوری از ساختار برای ضرایب شکست متفاوت

در شکل ۴ تغییرات فرکانس بر حسب تغییر در ضخامت آنالیت نشان داده شده است. در اینجا ضریب شکست آنالیت ۱.۲ در نظر گرفته شده است. هنگامی که ضخامت نمونه



شکل ۴: نمودار طیف نور عبوری از ساختار برای ضخامت‌های متفاوت آنالیت (ضخامت بر حسب μm)

کوچک است، پیک تشدید به تغییر ضخامت حساس‌تر است. با افزایش بیشتر ضخامت آنالیت، تغییر فرکانس تشدید ناشی از تغییر ضخامت کاهش می‌یابد و شیفت پیک رزونانس مربوطه متوقف می‌شود. میزان حساسیت حسگر زیستی برای هر تغییر در ضخامت و ضریب شکست آنالیت، طبق رابطه زیر محاسبه شد [9]:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n}(GHz/RIU)$$

بیشترین میزان حسگری در این ساختار در پیک تشدید EIT برابر $۱۰۴GHz/RIU$ و برای Fano میزان حسگری ۶۶GHz/RIU به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر استفاده از ساختار فراماد در حسگرهای زیستی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله یک حسگر تراهرتز مبتنی بر فراماده در ناحیه طیف تراهرتز طراحی و شبیه‌سازی شده است. حسگر مورد نظر دارای میزان حسگری ۱۰۴GHz/RIU برای تشدید EIT و ۶۶GHz/RIU برای تشدید Fano به دست آمد که در مقایسه با نمونه‌های مشابه از مقدار حساسیت بهتری برخوردار است.

مرجع‌ها

Cai, Wenshan, and Vladimir M. Shalaev. *Optical metamaterials*. Vol. 10, no. 6011. New York: Springer, 2010.

Gangwar, Kaushal, and R. P. S. Gangwar. "Metamaterials: Characteristics, process and applications." Advance in Electronic and Electric Engineering 4, no. 1 (2014): 97-106.

Yan, Xin, Maosheng Yang, Zhang Zhang, Lanju Liang, Dequan Wei, Meng Wang, Mengjin Zhang et al. "The terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterials for sensitive biosensors in the detection of cancer cells." *Biosensors and Bioelectronics* 126 (2019): 485-492.

Zhang, Jin, Ning Mu, Longhai Liu, Tunan Chen, and Weiren Zhu. "EIT Metamaterial Biosensor for Sensitive Detection of Glioma Cells." In *2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*, pp. 210-212. IEEE, 2021.

Zhang, Jin, Ning Mu, Longhai Liu, Jianhua Xie, Hua Feng, Jianquan Yao, Tunan Chen, and Weiren Zhu. "Highly sensitive detection of malignant glioma cells using metamaterial-inspired THz biosensor based on electromagnetically induced transparency." *Biosensors and Bioelectronics* 185 (2021): 113241.

Wang, Lulu. "Terahertz imaging for breast cancer detection." *Sensors* 21, no. 19 (2021): 6465.

Yao, Haizi, Hongying Mei, Weiwei Zhang, Shuncong Zhong, and Xiangfeng Wang. "Theoretical and experimental research on terahertz metamaterial sensor with flexible substrate." *IEEE Photonics Journal* 14, no. 1 (2021): 1-9.

Yang, Maosheng, Tengteng Li, Ju Gao, Xin Yan, Lanju Liang, Haiyun Yao, Jie Li et al. "Graphene–polyimide-integrated metasurface for ultrasensitive modulation of higher-order terahertz Fano resonances at the Dirac point." Applied Surface Science 562 (2021): 150182.

Zhu, Lei, Miaoxin Rong, Haodong Li, and Liang Dong. "High-sensitivity metamaterial sensor based on electromagnetically induced transparency (EIT) effect." *Laser Physics* 32, no. 11 (2022): 116203.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

طراحی و مدل‌سازی سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی با اعمال نور آلبدو

کوثر ستارناصری[۱]، محمد رزاقی[۱]، سید کیهان حسینی[۱] و مهسا مرادبیگی[۲]
[۱]دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، سنندج، ایران
[۲]دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه، سنندج، ایران
kosar.sattarnasery@uok.ac.ir, m.razaghi@uok.ac.ir
k.hosseini@uok.ac.ir , m.moradbeigi@uok.ac.ir

چکیده-در این مقاله، یک سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی، با جایگزینی اتصال پشتی فلزی یک سلول خورشیدی متداول پروسکایتی با یک ماده رسانای شفاف، طراحی و مدل‌سازی شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد با حذف لایه بافر در ساختار نیمه‌شفاف، بازدهی از ٪۱۳/۸۷ به ٪۱۳/۹۶ افزایش می‌یابد. در ادامه از سه ماده مختلف ITO، IZO و IOH به‌عنوان ماده اتصال پشتی به‌منظور دستیابی به بالاترین بازدهی استفاده شد و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شدند. در این میان، ماده IOH با بازدهی ٪۱۴/۳۱ به‌عنوان بهترین ماده اتصال پشتی انتخاب‌شده است. در پایان مشاهده شد با اعمال نور آلبدو به اتصال پشتی این سلول خورشیدی نیمه‌شفاف، بازدهی از ٪۱۴/۳۱ به ٪۱۸/۲۱ افزایش می‌یابد.

کلید واژه-مدل‌سازی، سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی، اتصال پشتی، بازدهی.

Design and Simulation of Semi-transparent Perovskite Solar Cell with Albedo Light

Kosar Sattarnasery[1], Mohammad Razaghi[1], Seyyed Keyhan Hosseini[1] and Mahsa Moradbeigi[2]
[1]University of Kurdistan, Faculty of Engineering, Sanandaj, Iran
[2]University of Kurdistan, Faculty of Science, Sanandaj, Iran
kosar.sattarnasery@uok.ac.ir, m.razaghi@uok.ac.ir, k.hosseini@uok.ac.ir, m.moradbeigi@uok.ac.ir

Abstract- In this paper the design and simulation of a semi-transparent perovskite solar cell is presented. The suggested structure is created by replacing a transparent conductive material with the metal back contact of a conventional perovskite solar cell. Based on results, it was observed that removing the buffer layer in the semi-transparent structure raised efficiency from 13.86% to 13.96. Following that, in order to attain the maximum efficiency, three different materials—ITO, IZO, and IOH—were used as the back contact material, and the results were compared with each other. The best back contact material has been chosen to be IOH material with 14.31% efficiency. Finally, it was observed that the efficiency of this semi-transparent solar cell increases from 14.31% to 18.21% by applying albedo light to the back contact.

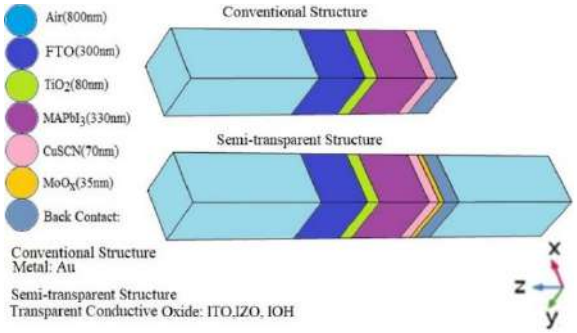
Keywords: Modeling, Semi-transparent Perovskite Solar Cell, Back Contact, Efficiency.

مقدمه

سلول‌های خورشیدی پروسکایتی یکی از انواع مختلف ابزارهای بهره‌برداری از منابع انرژی تجدید پذیر با استفاده از تبدیل نور خورشید به الکتریسیته (اثر فوتوولتاییک) هستند. در ساختار رایج این سلول خورشیدی از اتصال پشتی فلزی، استفاده می‌شود. نسل جدیدتر این ساختارها، به‌عنوان سلول‌های خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی شناخته می‌شوند. در این طراحی، اتصال‌های پشتی شفافی همچون دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک و اکسید رسانای شفاف را با اتصال پشتی فلزی جایگزین می‌کنند [۱]. در این مقاله، یک سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی طراحی و معرفی‌شده است. پس از بهینه‌سازی جنس اتصال پشتی ساختار، با اعمال نور آلبدو و افزایش شار نور دریافتی در لایه جاذب، بازدهی افزایش داده شده است.

تئوری و شبیه‌سازی

در این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی سلول خورشیدی نیمه شفاف پروسکایتی با روش المان محدود انجام و عملکرد آن با نوع متداول (غیر شفاف) آن مقایسه شده است. ساختار سلول خورشیدی در شکل ۱، متشکل از لایه‌های زیر است: اتصال پشتی، لایه انتقال‌دهنده حفره ($CuSCN$) لایه جاذب ($MAPbI_3$)، لایه انتقال‌دهنده الکترون (TiO_2)، اتصال جلوئی(FTO). در ساختار متداول، اتصال پشتی از جنس فلز و در ساختار نیمه‌شفاف از جنس اکسید رسانای شفاف لایه نشانی شده بر روی لایه بافر از جنس MoO_x است.



شکل۱۱: ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی.

برای تحلیل قسمت نوری این ساختار از معادله هلمهولتز $(\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \boldsymbol{E} = 0)$ استفاده‌شده است. پارامترهای k_0 بردار موج، ε_r گذردهی نسبی، $\boldsymbol{E}$ میدان الکتریکی نور تابیده‌شده است. سلول خورشیدی تحت تابش طیف AM1.5 G نور خورشید در راستای z قرارگرفته است. شرایط مرزی پریودیک در هر دو راستای x و y در نظر گرفته‌شده است. جذب نور $(A = 1 - (S_{11}^2 + S_{21}^2))$ و بازتاب آن $(R = S_{11}^2)$ از پارامترهای پراکندگی $(S_{ij,\ i,j=1,2})$ به دست می‌آیند.

جذب هر فوتون در لایه جاذب منجر به تولید یک جفت الکترون-حفره می‌شود. نرخ تولید حامل‌ها (G_{tot}) از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$G_{tot} = \int_{300}^{900} \frac{\Pi}{h} \epsilon'' \boldsymbol{E}^2(x,y,z,\lambda)\, d\,\lambda \qquad (۱)$$

که ϵ'' بخش موهومی ضریب گذردهی دی‌الکتریک و h ثابت پلانک است. برای تحلیل قسمت الکتریکی، با حل معادلات پواسون (فرمول ۲)، پیوستگی (فرمول ۳) و نفوذ-رانش (فرمول ۴)، نمودار چگالی جریان-ولتاژ(J-V) به دست می‌آید.

$$\nabla.(\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \Phi) = -\rho \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_i + G_i - U_i, i = n, p \qquad (۳)$$

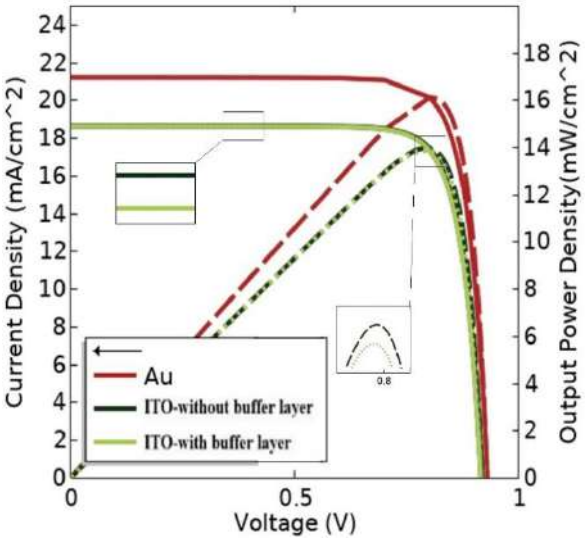
$$J_i = -q\mu_i i \nabla \Phi \pm q D_i \nabla i, i = n, p \qquad (۴)$$

برای حل این معادلات، برای پارامتر G_i که مبین نرخ تولید حامل‌ها است از تابع G_{tot} و پارامتر U_i که نشان دهنده مقدار بازترکیب آن‌ها است، از مدل بازترکیب شاکلی-رید-هال استفاده شده است. پارامترهای نوری و الکتریکی موردنیاز، از مراجع [۲] و [۳] استخراج‌شده‌اند. بازده تبدیل توان برای سلول خورشیدی به‌صورت $PCE =$

$(FFJ_{SC}V_{OC}), (FF = (V_{mp}J_{mp})/(V_{OC}J_{SC}))$ تعریف می‌شود. که در آن J_{SC}، V_{OC}، FF، J_{mp} و V_{mp} چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدارباز، فاکتور پرشدگی، چگالی جریان و ولتاژ در نقطه حداکثر توان هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

شکل ۲، منحنی مشخصه $J\text{-}V$ را برای ساختار سلول خورشیدی متداول (اتصال پشتی از جنس فلز Au)، سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف (اتصال پشتی از جنس ITO) به همراه لایه بافر و با حذف لایه بافر نشان می‌دهد. با اعمال نور خورشید از سمت لایه اتصال جلویی، پارامترهای‌فوتوولتاییک $(J_{sc}\left(\frac{mA}{cm^2}\right), V_{oc}(V), FF, PCE(\%))$ برای ساختار متداول و ساختار نیمه‌شفاف به ترتیب (۱۶/۱۰، ۰/۸۲، ۰/۹۲، ۲۱/۱۹) و (۱۳/۸۷، ۰/۸۲، ۰/۹۱، ۱۸/۶۱) به‌دست‌آمده‌اند نتایج نشان می‌دهند که با تبدیل ساختار متداول به یک ساختار نیمه‌شفاف با لایه بافر، افت بازدهی ۲/۲۳٪ به وجود می‌آید. با این‌حال، کاربردهای استفاده از این فناوری همچون استفاده در ساختمان‌ها با نصب بر روی شیشه پنجره‌ها و ادغام این ساختارها با یک سلول خورشیدی دیگر به‌عنوان سلول خورشیدی فرعی بالایی در یک پیکربندی پشت سرهم، مواردی هستند که در یک سلول خورشیدی متداول وجود ندارند. همچنین با حذف لایه بافر در ساختار نیمه شفاف، پارامترهای فوتوولتاییک به (۱۳/۹۶، ۰/۸۲، ۰/۹۲، ۱۸/۶۴) رسیده‌اند. در این ساختار نیمه‌شفاف با حذف لایه بافر، نه‌تنها یک مرحله اضافی برای ساخت حذف‌شده است که از هزینه‌ها و صرف زمان ساخت می‌کاهد، بلکه میزان بازدهی ۰/۱ درصد افزایش‌یافته است. تأثیر جنس ماده اتصال پشتی شفاف (سه ماده مختلف اکسید ایندیم با ناخالصی قلع (ITO)، اکسید ایندیم با ناخالصی هیدروژن (IOH)، اکسید ایندیم با خالصی روی (IZO))، بر طیف جذبی لایه جاذب پروسکایتی در شکل ۳ آورده شده است. در بازه اول طول‌موجی (۳۰۰-۵۸۰ نانومتر)، جذب لایه جاذب به‌طور تقریبی برای هر سه ماده اتصال پشتی شفاف، یکسان است. در بازه دوم طول‌موجی (۵۸۰-۸۰۰ نانومتر)، لایه جاذب سلول خورشیدی نیمه شفاف پروسکایتی با انتخاب اتصال پشتی از جنس ماده IOH دارای جذب بالاتری است. این مورد به دلیل بازتاب بیشتر نور از مرز مشترک لایه اتصال پشتی انتخاب‌شده از این ماده نسبت به سایر مواد است. بنابراین، شار نور بیشتری به داخل ساختار منعکس‌شده و درنتیجه آن میزان جذب لایه پروسکایت افزایش‌یافته است.



شکل ۲: نمودار J-V برای سلول خورشیدی متداول و نیمه‌شفاف پروسکایتی (با و بدون لایه بافر).

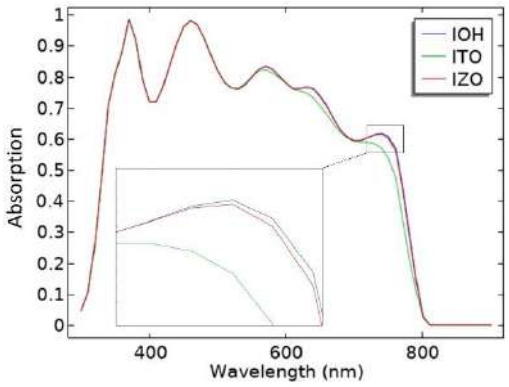
خروجی‌های مربوط به شبیه‌سازی بخش الکتریکی سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی با مواد مختلف اتصال پشتی ساختار، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پارامترهای فوتوولتاییک ساختار نیمه‌شفاف بدون لایه بافر برای سه ماده مختلف به‌عنوان ماده اتصال پشتی.

Materials	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$PCE(\%)$	FF
ITO	0.92	18.64	13.96	0.82
IZO		19.04	14.27	
IOH		19.08	14.31	

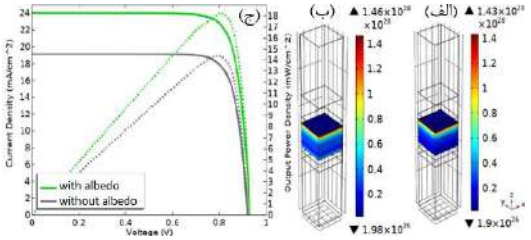
با تغییر جنس لایه اتصال پشتی، با توجه به اتصال اهمی این لایه در ساختار، پارامترهای FF و V_{OC} بدون تغییر

باقی‌مانده‌اند. بهترین PCE مربوط به اتصال پشتی از جنس ماده IOH است. دلیل این امر بالاتر بودن میزان جذب لایه پروسکایت در نیمه دوم طیف است که میزان نرخ تولید حامل‌ها و به‌تبع آن J_{SC} را افزایش داده است.



شکل ۳: نمودار طیف جذبی لایه پروسکایت در ساختار نیمه‌شفاف بدون لایه بافر برای سه ماده مختلف به‌عنوان ماده اتصال پشتی.

با توجه به اینکه سلول خورشیدی نیمه‌شفاف می‌تواند نور خورشید را از هر دو طرف ساختار (از سمت اتصال جلویی یا از سمت اتصال پشتی) جذب کند، علاوه بر اعمال طیف نور خورشید AM1.5 G به قسمت اتصال جلویی ساختار، طیف نور آلبدو [۱] نیز به قسمت اتصال پشتی ساختار اعمال‌شده است. طیف نور آلبدو به‌صورت بخشی از طیف پراکنده نور خورشیدی که توسط سطوح به اتصال پشتی سلول خورشیدی بازتابیده می‌شود، تعریف‌شده است. درشکل۴ (الف) و (ب)، شماتیک سه‌بعدی پارامتر PCE و (ج) منحنی مشخصه J-V برای ساختار پیشنهادی با اتصال پشتی از جنس IOH با و بدون اعمال نور آلبدو را نشان می‌دهد. با توجه به اعمال نور آلبدو، ازآنجایی‌که شار نور فرودی بیشتری به لایه جاذب می‌رسد، پارامترG_{tot} از 1.43×10^{28} به 1.46×10^{28} افزایش‌یافته است. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال نورآلبدو و با افزایش میزان نرخ تولید حامل‌ها، پارامتر J_{SC} به مقدار($\frac{mA}{cm^2}$) ۲۳/۹۸ ، به‌تبع آن پارامتر PCE به ٪۱۸/۲۱رسیده‌اند. به عبارتی دیگر، پارامتر J_{SC} و PCE به میزان ٪۲۰/۴۳ و ٪۲۱/۴۱ نسبت به پیش از اعمال نور آلبدو افزایش‌یافته‌اند.



شکل ۴: شماتیک سه بعدی نرخ تولید حامل برای ساختار سلول خورشیدی نیمه‌شفاف با اتصال جلویی از جنس FTO و اتصال پشتی از جنس IOH بدون اعمال نور آلبدو (الف) و با اعمال آن (ب) و (ج) منحنی مشخصه J-V برای ساختار پیشنهادی با و بدون اعمال نور آلبدو.

جمع‌بندی

در این مقاله، یک سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی با بازدهی ٪۱۳/۸۶ طراحی و مدل‌سازی شد. در ادامه، با حذف لایه بافر یک سلول خورشیدی شفاف‌تر و با بازدهی ٪۱۳/۹۶ معرفی شد. با انتخاب بهترین جنس ماده اتصال پشتی، بازدهی به ٪۱۴/۳۱ رسید. در پایان، با اعمال نور آلبدو به ساختار، بازدهی ٪۲۱/۴۱ افزایش یافت.

مرجع‌ها

H. Wang, et al., “color-tunable semitransparent perovskite solar cells for building-integrated photovoltaics”. ACS Appl. Mater & Interfaces., Vol. 12, No. 1, pp. 484-493, 2019.

S. Zandi , and M. Razaghi. “Finite element simulation of perovskite solar cell: A study on efficiency improvement based on structural and material modification”, Sol. Energy., Vol.179, No. 1, pp. 298-306, 2019.

M. Moradbeigi, M. Razaghi. “Investigation of optical and electrical properties of novel 4T all perovskite tandem solar cell”, Sci. Rep., Vol. 12, No. 1, pp. 6733, 2022.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی نظری و تجربی پراش از توری فازی منطقه‌ای فرنلِ اصلاح شده

فاطمه افشاری‌پور[۱]، علی محمد خزایی[۲]، حمیدرضا مشایخی[۳] و محمد یگانه[۴]

[۱] دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده‌ی فیزیک، کرمان، ایران، fatemeh98afshari@phy.uk.ac.ir
[۲] دانشگاه لرستان، دانشکده‌ی علوم پایه، خرم‌آباد، ایران، khazaei.am@lu.ac.ir
[۳] دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده‌ی فیزیک، کرمان، ایران، mashhr@uk.ac.ir
[۴] گروه آموزشی فیزیک، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران moyepe@gmail.com

چکیده – توری شعاعی نوعی از توری‌های پراش دوره‌ای است که به مختصه‌ی شعاعی وابستگی ندارد و دارای یک تناوب سمتی در دستگاه مختصات قطبی است. با ترکیب توری شعاعی با تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل، دسته‌ی جدیدی از توری‌ها تولید می‌شود. این توری‌ها، علاوه بر اینکه تناوب سمتی دارد، باریکه‌ی فرودی برخورد کننده به خود را در یک فاصله‌ی مشخصی متمرکز می‌کند. در این مقاله به‌صورت تجربی و نظری به بررسی پراش از نوع فازی این توری‌ها پرداخته می‌شود. بررسی نظری با کمک انتگرال فرنل-کیرشهف صورت گرفته است. نتایج تجربی با استفاده از پراش نور لیزر از آرایه‌ی دو بعدی یک تحریرگر فضایی نور برای ایجاد الگوی فازی توری به‌دست آمد که نتایج تحلیلی را به‌خوبی تأیید می‌کرد.

کلید واژه- انتگرال فرنل-کیرشهف، پراش، تحریرگر فضایی نور، توری شعاعی فازی، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل.

Theoretical and Experimental investigation of Diffraction from a Modified Fresnel Zone Plate Phase Grating

Fatemeh Afsharipour[1], Hamidreza Mashayekhi[2], Ali Mohammad Khazaei [3] and Mohammad Yeganeh[4]

1- Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, fatemeh98afshari@phy.uk.ac.ir
2-Department Physics, Faculty of Basic Science, University of Lorestan, Khorramabad, Iran Akhazaei.am@lu.ac.ir
3- Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, mashhr@uk.ac.ir
4- Department of Physics Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran. moyepe@gmail.com

Abstract- A radial grating is a type of periodic diffraction grating that does not depend on the radial coordinate and has an azimuthal direction periodicity in the polar coordinate system. A new class of gratings is produced by combining the radial grating with the Fresnel zone plates. These gratings, in addition to having an azimuthal periodicity, focus the incident beam at a specific distance. In this paper, the diffraction of the phase-type of this grating is investigated experimentally and theoretically. Theoretical investigations have been done with the aid of the Fresnel-Kirchhoff integral. The experimental results were obtained using laser diffraction from the two-dimensional array of an SLM to create a phase pattern, which confirmed the analytical results well.

Keywords: Diffraction, Fresnel-Kirchhoff integral, Fresnel zone plates, radial phase grating, spatial light modulator.

مقدمه

توری‌های فازی یکی از انواع توری‌های پراش است که در گسیل نور به داخل فیبر نوری، انحراف نور، پالایش نور و هدایت نور به داخل موجبر دارای اهمیت فراوانی است [۱]. این قطعات در مخابرات نوری، تمام‌نگاری، طیف‌سنجی، آکوستواپتیک، لیزرها و غیره کاربرد دارند [۲]. توری‌های فازی همچنین در سیستم‌های تصویری مانند میکروسکوپ و تلسکوپ برای بهبود در وضوح تصاویر به کاربرد گرفته می‌شوند[۳]. توری‌های فازی، فاز نور عبوری و یا بازتابی را از طریق یک ساختار تناوبی در ضریب شکست تغییر می‌دهند. با توجه به اینکه این نوع توری‌ها فقط بر روی فاز موج تابشی تأثیر می‌گذارند، لذا شفاف بوده و انرژی موج تضعیف نمی‌شود. روش‌های زیادی برای ساخت توری‌های پراش وجود دارد؛ از جمله‌ی این روش‌ها، فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی با استفاده از باریکه‌ی الکترونی یا یونی و استفاده از طرح‌های تداخلی، رسوب گذاری لایه‌ی نازکی از ماده‌ی دی الکتریک بر روی یک زیرلایه و شیوه‌های دیگر است[۴].

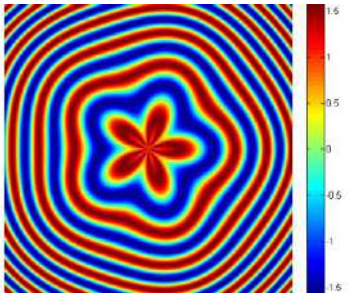
در این مقاله، ابتدا، نوع جدیدی از توری با عنوان «توری فازیِ منطقه‌ای فرنلِ اصلاح شده» معرفی می‌شود. سپس میدان نور عبوری از آن به‌صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش تجربی کار نیز با ایجاد یک باریکه‌ی گاوسی توسط پالایش فضایی نور لیزر و ایجاد ساختار توری فازی با استفاده از یک LCD که به‌عنوان SLM استفاده شد انجام گرفته است. SLM به کامپیوتر وصل شده و با برخورد نور موازی شده‌ی لیزر به آن، نتایج تجربی با استفاده از دوربین دیجیتال ثبت شده‌اند.

مبانی نظری

تابع عبور یک توری فازی منطقه‌ای فرنل اصلاح شده شعاعی به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

$$T(r,\varphi)=e^{i\gamma\cos(-cr^2+\cos(p\varphi))} \qquad (۱)$$

که r، φ، p و γ به ترتیب مختصه شعاعی، مختصه سمتی، تعداد پره‌های توری شعاعی و تاخیر فاز ایجاد شده توسط تلفیق‌گر فضایی نور می‌باشند و همچنین پارامتر c به‌صورت $c=\frac{\pi}{\lambda f}$ تعریف می‌شود، که λ طول موج نور در خلأ و f فاصله کانونی توری است. جمله‌ی $\cos(p\varphi)$ که مربوط به توری شعاعی است که به توری منطقه‌ای فرنل اضافه گردیده است. شکل۱ یک نمونه از این توری فازی منطقه‌ای فرنل رسم شده را نشان می‌دهد.



شکل۱: نمایش یک نوع توری دامنه‌ای منطقه‌ای فرنل اصلاح شده به ابعاد $2\text{cm}\times 2\text{cm}$ و پارامترهای $f=200\text{cm}$ و $\text{p}=5$ برای طول موج نور $\lambda=532\text{nm}$.

دامنه مختلط میدان نور فرودی یک پرتو گوسی که شعاع کمر باریکه آن w_0 است را می‌توان در $z=\text{z}$ نشان داد:

$$\text{U}_G(\text{r},\text{z})=\left(\frac{W_0}{W(\text{z})}\right)\exp\left(\frac{-r^2}{W^2(\text{z})}\right)\exp\left[\text{i}\left(k\,\text{z}+\frac{kr^2}{2R(\text{z})}-\zeta(\text{z})\right)\right] \qquad (۲)$$

که

$$\text{W}(\text{z})=W_0\sqrt{1+\left(\frac{\text{z}}{\text{z}_0}\right)^2}\ ,\ z_0=\frac{\pi W_0^2}{\lambda}$$
$$\zeta(z)=\tan^{-1}\left(\frac{\text{z}}{\text{z}_0}\right),\ R(\text{z})=z\left[1+\left(\frac{\text{z}_0}{\text{z}}\right)^2\right] \qquad (۳)$$

که $\text{W}(\text{z})$ شعاع باریکه، $R(\text{z})$ شعاع انحنای جبهه موج، $\zeta(z)$ جابجایی گوی فاز و z_0 حد رایلی نامیده می‌شوند. در فواصل $z\gg z_0$ دامنه مختلط میدان نور فرودی یک باریکه گاوسی به فرم زیر در می‌آید:

$$U_G(r,z=0)=\exp\left(-\frac{r^2}{{\omega_0}^2}\right). \qquad (۴)$$

فرض می‌شود $T(r,\varphi)$، $U_G(r,z=0)$ و $U(\rho,\theta,z)$ به ترتیب تابع عبور توری فازی منطقه‌ای فرنل با اصلاح شعاعی در $z=0$، دامنه مختلط میدان نور فرودی یک باریکه گاوسی در $z=0$ و دامنه‌ی مختلط میدان نوری در $z=z$، باشند، با استفاده از انتگرال فرنل – کیرشف دامنه مختلط میدان نور پراشیده شده در دستگاه مختصات قطبی در فاصله z برابر است با :

$$U(\rho,\theta,Z)= h_0 e^{i\alpha\rho^2}\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi} U_G(r,z=0)T(r,\varphi)e^{i\alpha r^2}e^{-2i\alpha\rho r\cos(\varphi-\theta)}\,r\,dr\,d\varphi \quad (۵)$$

که ρ مختصه شعاعی، θ زاویه سمتی، $\alpha=\frac{\pi}{\lambda z}$ عدد موج، $h_0=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}$ ، λ طول موج نور در خلأ و $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج هستند. با جایگذاری معادله (۱) و (۴) در معادله (۵)، دامنه‌ی مختلط میدان نوری در $z=z$ داریم:

$$U(\rho,\theta,z)= h_0 e^{i\alpha\rho^2}\{\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi} e^{\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)}e^{i\gamma(-cr^2)}e^{i\alpha r^2}e^{i\gamma\cos(p\varphi)}e^{-2i\alpha\rho r\cos(\varphi-\theta)}\,r\,dr\,d\varphi \quad (۶)$$

با کمک اتحاد ژاکوبی-آنژه:

$$e^{i\gamma\cos x}=\sum_{s=-\infty}^{+\infty}(i)^s J_s(\gamma)e^{ix}, \quad (۷)$$

و تبدیلات هنکل[۵]:

$$H_0\left\{e^{-\alpha r^2}\right\}=2\pi\int_0^{\infty}e^{-\alpha r^2}J_0(br)r.dr=\frac{\pi}{\alpha}e^{\frac{-b^2}{4\alpha}},$$
$$H_n\left\{e^{-\alpha r^2}\right\}=2\pi\int_0^{\infty}e^{-\alpha r^2}J_n(br)r.dr= \quad (۸)$$
$$\frac{b\sqrt{\pi}}{8\alpha^{\frac{3}{2}}}e^{\frac{-b^2}{8\alpha}}[I_{\frac{n-1}{2}}(\frac{b^2}{8\alpha})+I_{\frac{n+1}{2}}(\frac{b^2}{8\alpha})],$$

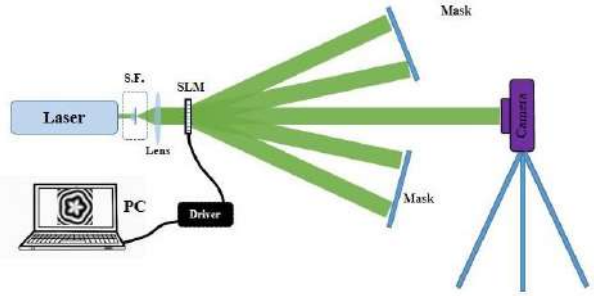
دامنه‌ی مختلط میدان نوری را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$U=2\pi h_0 e^{i\alpha\rho^2}\{\sum_{q=-\infty}^{\infty}\sum_{m=-\infty}^{\infty}(-i)^{mp}(-i)^m(i)^q J_m(q) \quad (۹)$$
$$J_q(\gamma)\cos(mp\theta)\frac{\sqrt{\pi}b}{8\beta^{\frac{3}{2}}}e^{\frac{-b^2}{8\beta+}}[I_{\frac{mp-1}{2}}(\frac{b^2}{8\beta})-I_{\frac{mp+1}{2}}(\frac{b^2}{8\beta})]\}$$

در رابطه‌ی فوق، $\beta=(\frac{1}{\omega_0^2}-i(qc+\alpha))$ و $b=\frac{2\alpha r}{\lambda z}$ است.

چیدمان آزمایش و نتایج تجربی

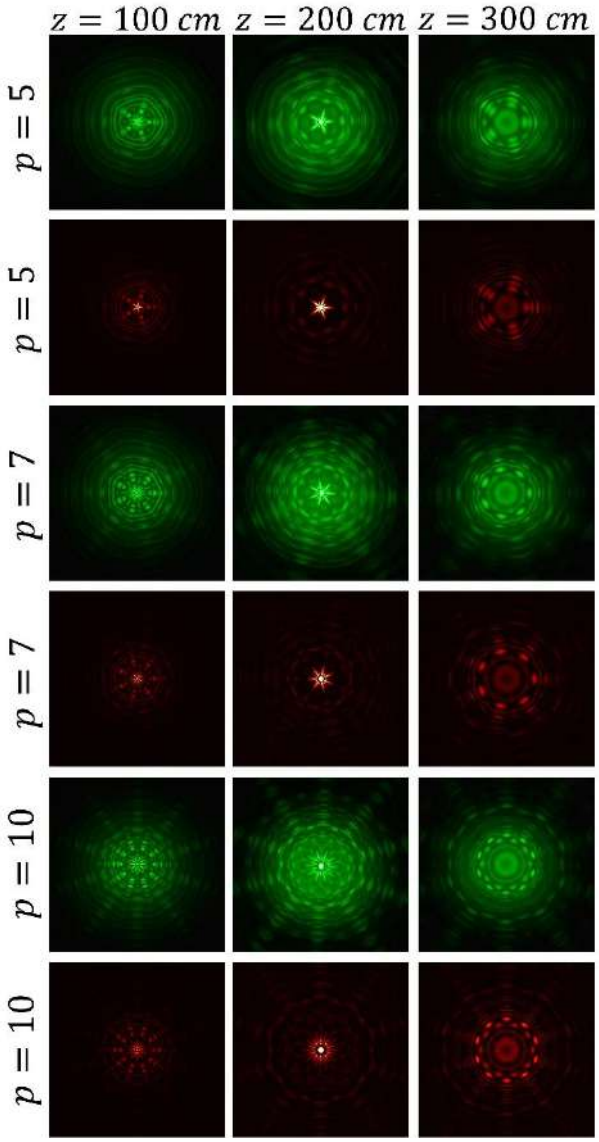
برای برپایی چیدمان آزمایش مطابق شکل ۲ از دومین هارمونیک باریکه لیزری Nd:YAG دیودی پمپ شده که دارای نمایه گاوسی با $\lambda=532\,nm$ است را از یک پالایه فضایی که متشکل از یک عدسی با فاصله کانونی میکرومتری و یک روزنه با ابعاد میکرونی می‌باشد عبور می‌کند. با وجود روزنه دایروی باریکه خروجی یک باریکه گاوسی است. سپس با یک عدسی دیگر که فاصله کانونی و قطر بزرگی دارد آن را در فاصله کانونی خودش قرار می‌دهیم تا باریکه گوسی که قطر آن در حین انتشار تقریباً ثابت بماند منتشر می‌شود. انتخاب فاصله کانونی عدسی دوم بستگی با قطر باریکه گوسی مورد نیاز است. الگوی توری‌ها را با تعداد پره‌های مختلف با استفاده از نرم افزار MATLAB رسم می‌کنیم. با مدوله کردن این الگوها به یک مدولاتور فضایی نور (SLM) توری‌های فازی تهیه می‌شوند. ما از یک SLM معمولی استخراج شده از ویدئو پروژکتور (ال سی دی پروژکتور KM3، مدل شماره X50) استفاده کردیم که دامنه فاز کل توری‌های آماده شده برای آن محدود به $\gamma=\frac{\pi}{2}$ است. باریکه لیزری Nd:YAG دیودی پمپ شده که دارای نمایه گاوسی به SLM که در آن نمایه فاز مورد نظر بر روی آن اعمال می‌شود برخورد می‌کند. در فواصل مختلف از SLM، الگوی پراش را توسط دوربین (Nikon D7200) ثبت کردیم.



شکل ۲: چیدمان آزمایش بررسی تجربی پراش باریکه‌ی گوسی از توری فازی منطقه‌ای فرنل

با توجه به اینکه آرگومان توری دامنه‌ای منطقه‌ای فرنل اصلاح‌شده ترکیبی از جمله‌ی $-cr^2$ که مربوط به فاز الگوی فرنل و جمله‌ی $\cos(p\varphi)$ مربوط به مؤلفه‌ی شعاعی است. جمله‌ی مربوط به فاز الگوی فرنل باعث کانونی شدن جبهه‌ی موج در فاصله معینی می‌شود و پراش باریکه گوسی از جمله مربوط به مؤلفه‌ی شعاعی دارای الگوی همانند توری شعاعی می‌باشد. با بررسی نتایج تجربی و تحلیلی مشاهده می‌کنیم الگوی پراش در فاصله معینی کانونی می‌شود. همچنین با بررسی نتایج تجربی و تحلیلی مشاهده می‌کنیم الگوی پراش غالب بر مسئله مربوط به فاز الگوی فرنل می‌باشد. بعد و قبل از فاصله کانونی معین الگوی پراش رفتار مشابه الگوی پراش از توری فرنل را دارد.

با مقایسه‌ی الگوهای تجربی ثبت‌شده و شکل‌های حاصل از بررسی نظری که با نرم افزار MATLAB رسم شده‌اند، نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های نظری با نتایج تجربی سازگاری خوبی دارند.



شکل۳: نتایج ثبت شده‌ی آزمایش برای طرح پراش از توری فازی منطقه‌ای فرنل اصلاح‌شده با تعداد پره‌های p=5، p=7 و p=10 در فاصله‌های $z = 100\text{cm}$ ، $z = 200\text{cm}$ و $z = 300\text{cm}$ از توری. الگوهای سبز مربوط به نتایج تجربی و الگوهای قرمز مربوط به نتایج تحلیلی است.

نتیجه‌گیری

مرجع‌ها

[1] YO Barmenkov, AV Kir'yanov, MV Andrés, "Theoretical and experimental study of dynamic fiber Bragg gratings induced in erbium-doped fiber at phase-modulated beams' coupling", *Fifth Symposium Optics in Industry*, 2006.

[2] Ching-Fen Kao, Hung-Lin Huang, Sheng-Hua Lu, "Optical encoder based on Fractional-Talbot effect using two-dimensional phase grating", *Optics Communications*, 2010.

[3] Yang, Xiufeng, Chen, Zhihao, Teo, Ju Teng, Ng, Soon Huat, "Bragg grating–based fiber laser vibration sensing system with novel phase detection", *Optical Engineering*, 2014.

[4] Ono, Hiroshi, Kitamura, Keiko, Kawatsuki, Nobuhiro, " Phase grating generation and optical phase conjugation in photorefractive polymer/dissolved liquid crystal composites", Liquid Crystals, 2004.

[5] Zwillinger, Daniel, ed. *Table of integrals, series, and products*. Elsevier, 2014.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

افزایش کیفیت تصاویر میکروسکوپی با استفاده از شبکه تخاصمی مولد

نرگس رضائی، فائقه حاجی‌زاده، احسان احدی اخلاقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷۶۶۷۳۱.

nargesrezaei@iasbs.ac.ir

چکیده – در این مقاله از یک معماری خاص از شبکه عصبی عمیق با نام تخاصمی مولد برای بهبود کیفیت تصاویر میکروسکوپی میدان روشن بدون تغییر در طراحی و سخت‌افزار آن استفاده شده‌است. پس از اتمام فرآیند آموزش، شبکه قادر است با افزایش ۴ برابری اندازه تصاویر ورودی به آن، کیفیت تصاویر را نیز افزایش دهد. این آموزش با استفاده از تصاویر میکروسکوپی بال مگس با کیفیت پایین و تصاویر با کیفیت بالای متناظر آن انجام می‌شود. همچنین در این کار از تابع هزینه ادراکی برای آموزش شبکه عصبی عمیق استفاده شده است تا تصاویر خروجی شبکه به از نظر ادراکی به داده‌های واقعی نزدیک‌تر باشد. تصاویر خروجی شبکه به طور میانگین نسبت پیک سیگنال به نوفه ۲۴/۲۸ و ثابت تشابه ساختاری ۰/۸۷ را نشان می‌دهند.

کلید واژه- افزایش کیفیت تصاویر، میکروسکوپی، یادگیری عمیق، شبکه عصبی تخاصمی مولد.

Improving the quality of microscopic images using generative adversarial network

Narges Rezaei, Faeghe Hajizade and Ehsan A. Akhlaghi

Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan,
nargesrezaei@iasbs.ac.ir

Abstract- In this paper, a special architecture of deep neural network named generative adversarial is used to improve the quality of bright field microscopic images without changing its design and hardware. After completing the training process, the network is able to increase the quality of the images by increasing the size of the incoming images by 4 times. This training is done using microscopic images of fly wings with low quality and corresponding high quality images. Also, in this work, the perceptual cost function has been used to train the deep neural network so that the output images of the network are closer to the real data in terms of perception. The output images of the network show an average peak signal-to-noise ratio of 24.28 and structural similarity constant of 0.87.

Keywords: Super-Resolution Imaging, Microscopy, Deep learning, Generative-adversarial neural network.

مقدمه

یادگیری عمیق یکی از تکنیک‌های یادگیری ماشین بر پایه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است [۱]. شبکه‌های عصبی مصنوعی مجموعه الگوریتم‌هایی هستند که تلاش می‌کنند ویژگی و ارتباط میان مجموعه‌ای از داده‌ها را از طریق تقلید نحوه عملکرد مغز انسان استخراج کنند. فرآیند تحلیل و استخراج ویژگی در مغز انسان توسط نورون‌های عصبی انجام می‌گیرد. شبکه عصبی عمیق نیز از چندین لایه مصنوعی از نورون‌های چیده شده در کنار یکدیگر تشکیل شده است [۲]. یکی از انواع شبکه‌های عصبی عمیق، شبکه عصبی هم‌گشت است. این شبکه از مجموعه‌ای از لایه‌های هم‌گشت با فیلترهای مختلف برای جاروب تصاویر تشکیل شده است. درایه‌های این فیلترها در ابتدا به صورت تصادفی مقداردهی می‌شوند. اما در انتهای فرآیند آموزش و با کمینه‌سازی مقدار تابع خطای شبکه، مقادیر دقیق آن‌ها برای خروجی مناسب تعیین می‌شود. این شبکه کاربرد وسیعی در زمینه طبقه‌بندی تصاویر، انتقال سبک و واپیچش تصاویر دارد [۳].

در سال‌های اخیر شبکه‌های عصبی هم‌گشت برای حل بسیاری از مسائل در زمینه تصویربرداری استفاده شده‌اند [۴]. در تصویربرداری واضح از یک نمونه، بزرگنمایی و وضوح بالا هر دو مهم هستند تا بتوان فرکانس‌های بالا در نمونه، مانند لبه‌ها و بافت‌ها و خطوط ظریف‌تر، را به خوبی تشخیص داد. در این کار ما از یک معماری خاص از شبکه عصبی هم‌گشت با نام شبکه عصبی تخاصمی مولد معرفی شده در [۵] برای افزایش کیفیت تصاویر حاصل از یک میکروسکوپ نوری، بدون ایجاد تغییر در طراحی یا سخت‌افزار آن، استفاده کردیم. شبکه عصبی تخاصمی مولد استفاده شده شامل یک شبکه عصبی باقی‌مانده با اتصالات پرشی و همچنین تابع هزینه ادراکی (شبکه عصبی از پیش آموزش دیده) VGG19 است. این شبکه از یک تک تصویر خروجی میکروسکوپ نوری به عنوان ورودی استفاده می‌کند و به سرعت یک تصویر بهبود یافته از همان نمونه را به عنوان خروجی به ما می‌دهد. در واقع شبکه عصبی عمیق استفاده شده در این کار لایه‌های مختلفی دارد که در فرآیند یادگیری به نحوی آموزش می‌بینند تا تناظری بین ورودی (تصاویر با وضوح پایین) و خروجی (تصاویر با وضوح بالا) برقرار کنند. اگرچه تمرکز اصلی ما در این کار بر تصویربرداری میکروسکوپی میدان روشن بود، اما روش بیان شده در هولوگرافی، میدان تاریک، فلورسانسی و مقطع‌نگار همدوس نوری نیز قابل استفاده است.

روش‌ها

هدف اصلی در افزایش کیفیت تک تصاویر، تخمین تصویر با کیفیت و وضوح بالا (I_{SR}) متناظر با تصویر ورودی با وضوح پایین (I_{LR}) است. این کار از طریق آموزش یک شبکه عصبی هم‌گشت با استفاده از زوج تصاویر I_{LR} و I_{HR} صورت می‌گیرد. I_{HR} تصاویر با وضوح بالای متناظر با I_{LR} هستند که تنها در فرآیند آموزش در اختیار شبکه قرار می‌گیرند. پس از آموزش، کیفیت تصاویر ورودی به آن (بدون در دسترس بودن تصاویر با کیفیت متناظر) افزایش می‌یابد. تصاویر I_{LR} در فرآیند آموزشی از طریق کاهش چهار برابری اندازه تصاویر I_{HR} به دست می‌آیند.

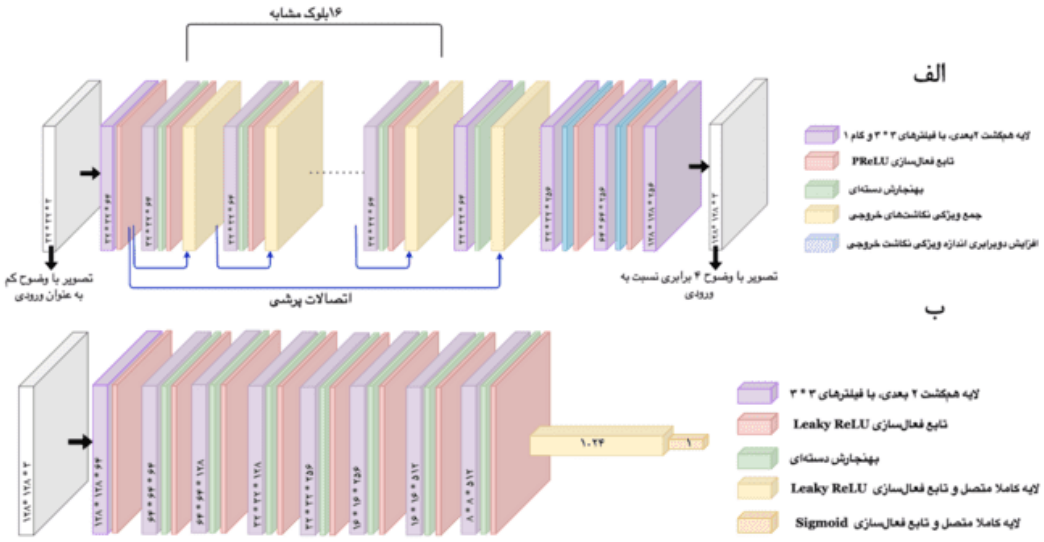
ساختار شبکه

شبکه تخاصمی مولد استفاده شده شامل دو مدل مولد G و متمایزگر D است. در فرآیند آموزش ابتدا تصاویر با کیفیت پایین I_{LR} وارد شبکه مولد شده و این شبکه مجموعه‌ای از داده‌های غیرواقعی از این ورودی‌ها را تولید می‌کند. سپس فرآیند آموزش مولد متوقف شده و داده‌های تولید شده توسط آن (غیرواقعی) و تصاویر با کیفیت بالا (داده‌های واقعی) به متمایزگر داده می‌شوند. طی فرآیند آموزشِ متمایزگر، تابع هزینه آن به گونه‌ای بهینه می‌شود تا متمایزگر بتواند به خوبی تصاویر واقعی و غیرواقعی را طبقه‌بندی کند. پس از اتمام فرآیند آموزش برای متمایزگر، این بار فرایند یادگیری برای مولد تکرار می‌شود. در این

مرحله مولد یاد می‌گیرد که پارامترهای خود (مانند وزن فیلترها) را به گونه‌ای تنظیم کند تا بتواند تصاویر با کیفیتی تولید کند که متمایزگر نتواند آن‌ها را از تصاویر با کیفیت واقعی تشخیص دهد. در واقع هدف مولد تخمین تصاویر I_{HR} بر اساس تصاویر ورودی I_{LR} به آن است. شبکه G یک شبکه پیش‌خور با پارامترهای $\theta_G = \{W_{1:L}; b_{1:L}\}$ است. $W_{1:L}$ و $b_{1:L}$ وزن‌ها و بایاس‌ها در یک شبکه L لایه هستند که مقادیر صحیح آن‌ها برای تولید یک تصویر خروجی با کیفیت از یک تصویر ورودی با وضوح پایین، از طریق بهینه‌سازی تابع هزینه مورد استفاده در شبکه (l_{SR}) به دست می‌آید.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، هسته شبکه مولد استفاده شده شامل ۱۶ بلوک باقی‌مانده مشابه است. هر یک از این بلوک‌ها شامل دو لایه هم‌گشت حاوی ۶۴ فیلتر در اندازه‌های ۳×۳ همراه با بهنجارش دسته‌ای و تابع فعال‌سازی واحد خطی تحصیح شده پارامتری پس از هر لایه هم‌گشت هستند. در انتها نیز دو لایه هم‌گشت برای افزایش ۴ برابری اندازه تصاویر تعبیه شده است. اتصالات پرشی استفاده شده میان لایه‌های هم‌گشت برای غلبه بر مسئله گرادیان کاهشی بوده است.

شبکه عصبی متمایزگر نیز از ۸ بلوک باقی‌مانده تشکیل شده است که هر یک حاوی یک لایه هم‌گشت و به دنبال آن یک بهنجارش دسته‌ای و تابع فعال‌سازی Leaky ReLU هستند. تعداد فیلترها با اندازه ۳×۳ در این لایه هم‌گشت، با ضریب ۲ از ۶۴ تا ۵۱۲ در حال افزایش است. گام حرکتی



شکل ۱: ساختار شبکه عصبی عمیق تخاصمی مولد الف) شبکه مولد و ب) شبکه متمایزگر.

۲ در لایه هم‌گشت، اثر این ضریب ۲ را حذف می‌کند. در ادامه ۵۱۲ ویژگی نگاشت وارد دو لایه متراکم شده و در انتها یک تابع فعال‌سازی Sigmoid برای طبقه‌بندی تصاویر به آن اعمال می‌شود. خروجی این شبکه به صورت صفر و یک مشخص می‌کند تصویر ورودی واقعی است یا خیر.

تابع هزینه

یکی از توابع هزینه متداول در زمینه افزایش کیفیت تصاویر، تابع هزینه براساس پیکسل‌سنجی است. در این روش به صورت پیکسل به پیکسل تفاوت میان تصویر بازسازی شده و تصویر با کیفیت واقعی سنجیده می‌شود و هدف نهایی

الگوریتم بهنیه‌سازی به حداقل رساندن این تفاوت‌ها است. این شیوه توسط [۶] برای افزایش کیفیت تصاویر استفاده شده است. اما تابع هزینه بر اساس تفاوت میان پیکسل‌ها، تفاوت ادراکی میان تصویر خروجی شبکه و تصویر واقعی را نشان نمی‌دهد. برای نمونه دو تصویر را در نظر بگیرید که نسبت به یکدیگر تنها یک پیکسل جابه‌جا شده‌اند. با وجود شباهت ادراکی، با توجه به تابع هزینه پیکسل‌سنجی، تفاوت دو تصویر بسیار بالا خواهد بود. با توجه به [۵] یکی از راه‌های حل این مشکل، استفاده از تابع هزینه ادراکی است. این تابع هزینه بر خلاف تابع هزینه پیکسل‌سنجی، که براساس تفاوت میان پیکسل‌ها است، بر اساس تفاوت میان ویژگی‌های سطح بالای به دست آمده از یک شبکه عصبی هم‌گشت از پیش آموزش دیده عمل می‌کند. بنابراین تصاویر با کیفیت با به حداقل رساندن این تابع هزینه تولید خواهد شد. در این کار ما از تابع هزینه ادراکی برای آموزش شبکه استفاده کردیم. این تابع هزینه جمع وزن‌دار تابع هزینه محتوایی l_X^{SR} و تابع هزینه متمایزگر l_{Gen}^{SR} است:

$$l^{SR} = l_X^{SR} + 10^{-3}\, l_{Gen}^{SR} \qquad (۲)$$

تابع هزینه محتوایی استفاده شده ۱۹ لایه لایه از شبکه از پیش آموزش دیده VGG همراه با تابع فعال‌سازی ReLU است. تابع تابع هزینه VGG19 به صورت:

$$l_{VGG/i.j}^{SR} = \frac{1}{W_{i,j}H_{i,j}} \sum_{x=1}^{W_{i,j}} \sum_{y=1}^{H_{i,j}} (\varphi_{i,j}(I^{HR})_{x,y} - \varphi_{i,j}\left(\mathrm{G}_{\theta_G}(I^{LR})\right)_{x,y})^2 \qquad (۳)$$

تعریف می‌شود که $\varphi_{i,j}$ ویژگی نگاشت به دست آمده از iامین لایه هم‌گشت (پس از تابع فعال‌سازی) و پیش از iامین لایه ادغام از شبکه VGG و $W_{i,j}$ و $H_{i,j}$ اندازه ویژگی نگاشت خارج شده از آن است.

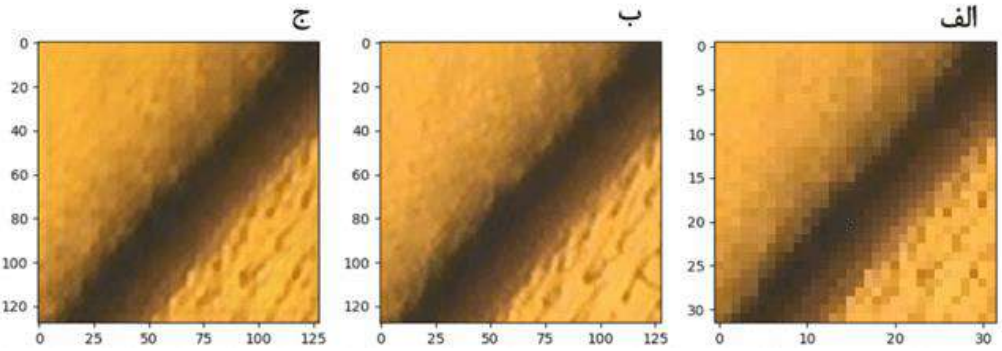
تابع هزینه متخاصم به گونه‌ای تعریف شده است تا شبکه مولد تصاویری را تولید کند که به تصاویر با کیفیت بالای واقعی بسیار نزدیک باشد:

$$l_{Gen}^{SR} = \sum_{n=1}^{N} -\log \mathrm{D}_{\theta_D}(\mathrm{G}_{\theta_G}(I^{LR})) \qquad (۴)$$

که در آن θ_D پارامترهای شبکه متمایزگر است.

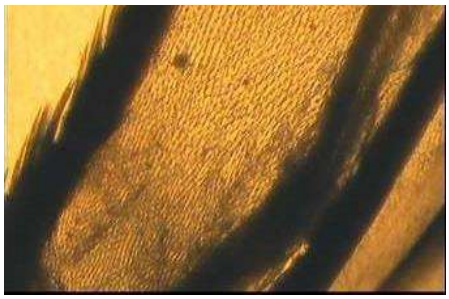
داده‌های آموزشی

تصاویر اولیه برای آموزش شبکه از بال یک مگس تهیه شدند. بال مگس توزیع تصادفی از ساختارهای رزی و درشت را داراست. این موجب می‌شود شبکه به صورت جامع آموزش دیده و بتواند انواع ساختارهای مختلف را بازسازی کند. این تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ Olympus IX71 انجام شد. طی این فرآیند ۳۵ عدد تصویر میدان روشن



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی میدان روشن از بال مگس الف- تصویر تخریب شده (ورودی شبکه)، ب- تصویر با کیفیت واقعی، ج- تصویر با کیفیت تولیدشده توسط شبکه عصبی.

قطعه‌بندی و چرخش تصاویر تعداد داده‌های آموزشی را ۱۳۴۷۵ تصویر در اندازه‌های ۱۲۸×۱۲۸رسانده شد. سپس برای کاهش کیفیت تصاویر، اندازه تصاویر را بدون درون‌یابی به ۳۲×۳۲ (۴برابر) کاهش یافت. ۸۰ درصد این تصاویر به عنوان داده‌های آموزشی و ۲۰ درصد به عنوان داده‌های آزمایشی در نظر گرفته شدند. پس از آماده‌سازی داده‌های آموزشی، فرآیند یادگیری شبکه تخاصمی مولد با زبان برنامه‌نویسی پایتون و چارچوب تنسورفلو توسط رایانه‌ای با مشخصات Intel(R) Core(TM) i7-11700 و 32GB RAM و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی Adam انجام شد.



شکل ۲: نمونه‌ای از تصاویر بال مگس ثبت شده با میکروسکوپ نوری میدان روشن برای آموزش شبکه مولد-تخاصمی.

نتایج

پس از آموزش شبکه و ساخت مدل، کارایی آن با استفاده از داده‌های تست مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۳-ج نمونه‌ای از تصویر بازسازی‌شده توسط شبکه را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل پیداست، شبکه به خوبی توانسته است کرک‌های موجود در بال مگس را با دقت خوبی بازسازی کند. برای بررسی کمی میزان افزایش کیفیت تصاویر از دو پارامتر پیک سیگنال به نوفه (PSNR)، در جهت مقایسه پیک سیگنال به نوفه تصویر اصلی و بازسازی‌شده، و ثابت شباهت ساختاری (SSIM)، در جهت مقایسه دو تصویر از لحاظ ساختاری، استفاده شد. مقدار میانگین این دو پارامتر برای داده‌های آزمایشی به ترتیب ۲۴/۲۸ و ۰/۸۷ به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک شبکه تخاصمی مولد با تابع هزینه ادراکی برای افزایش کیفیت تصاویر میکروسکوپی استفاده شد. فرآیند آموزش این شبکه با استفاده از تصاویر میکروسکوپی میدان روشن از بال مگس، به دلیل وجود توزیع تصادفی از ساختارهای ریز و درشت در آن، صورت گرفت. شبکه آموزش دیده قادر است با افزایش ۴ برابری اندازه تصاویر ورودی به آن، جزئیات تصاویر را نیز بازسازی کند.

مرجع‌ها

Ünal, Hamit Taner and Başçiftçi, Fatih, “Evolutionary design of neural network architectures: a review of three decades of research”, Artificial Intelligence Review, Vol. 55, No. 3, pp. 1723–1802, 2022.

Jürgen Schmidhuber, “Deep learning in neural networks: an overview,” Neural Netw, Vol. 61, pp. 85–117, 2015.

Cong, Shuang and Zhou, Yang, “A review of convolutional neural network architectures and their optimizations”, Artificial Intelligence Review, Vol. 56, No. 3, pp. 1905–1969, 2023.

Jin, Kyong Hwan and McCann, “Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging,” IEEE Trans. Image Process, Vol. 26, No. 9, pp: 4509-4522, 2017.

Ledig, Christian, Theis, Lucas, Huszár, Ferenc, Cab, “Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network”, in Pro- ceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 105–114, 2017.

Chao Dong, Chen Change Loy, “Image super-resolution using deep convolutional networks”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 38, No. 2, pp: 295–307, 2016

.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی CIGS با استفاده از نانومکعب‌های پلاسمونیک نقره، طلا و آلومینیوم در لایه جاذب

مرضیه اکبری، فاطمه دباغ کاشانی*، سید محمد میرکاظمی
دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت، marzieh_akbari@physics.iust.ac.ir
دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت، f_dk@iust.ac.ir
دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالوژی، دانشگاه علم و صنعت، mirkazemi@iust.ac.ir

استفاده از اثرات پلاسمونیک برای افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی لایه نازک از فناوری‌های نوظهور است. هدف این پژوهش، افزایش جذب و بازدهی سلول کالکوپریتی نازک با استفاده از نانوساختارهای پلاسمونیک در ناحیه بالای لایه جاذب است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های اپتیکی و الکتریکی، در حضور نانومکعب‌های طلا با ابعاد ۱۰۰ نانومتر و O.F=۰/۱۶. حداکثر بازده سلول خورشیدی ٪ ۲۵/۶۱ به‌دست آمد. بهبود بازده به‌دلیل افزایش جذب ناشی از افزایش طول مسیر نوری و افزایش تولید حامل، کاهش بازترکیب و بهبود جداسازی حامل به‌دلیل تشدید پلاسمونی و اثر توزیع میدان نزدیک است.

کلید واژه- سلول خورشیدی کالکوپریتی، سلول خورشیدی CIGS، لومریکال، نانوساختار پلاسمونیک، شبیه‌سازی اپتیکی و الکتریکی

Efficiency improvement of CIGS solar cell using Ag, Au and Al plasmonic nanocubic in absorber layer

Marzieh Akbari, Fatemeh Dabbagh Kashani, Seyyed Mohammad Mirkazemi
Phd student, School of Physics, Iran University of Science and Technology, Marzieh_akbari@physics.iust.ac.ir
Associate professor, School of Physics, Iran University of Science and Technology, f_dk@iust.ac.ir
Associate professor, School of Metallourgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, mirkazemi@iust.ac.ir

One of the emerging technologies for enhancing the efficiency of thin film solar cells is the utilization of plasmonic effects. The objective of this research is to augment the absorption and efficiency of thin chalcopyrite cells by incorporating plasmonic nanostructures on the top of the absorber. Optical and electrical simulations have revealed a maximum efficiency of 25.61% when employing 100 nm gold nanocubes with O.F.=0.16. This enhancement is attributed to increased absorption resulting from an elongated optical path, amplified carrier production, reduced recombination, and improved carrier separation due to the influence of plasmonic resonance and localized near-field distribution.

Keywords: Chalcopyrite solar cell, CIGS solar cell, Lumerical, plasmonic nanostructure, optical and electrical simulation.

مقدمه

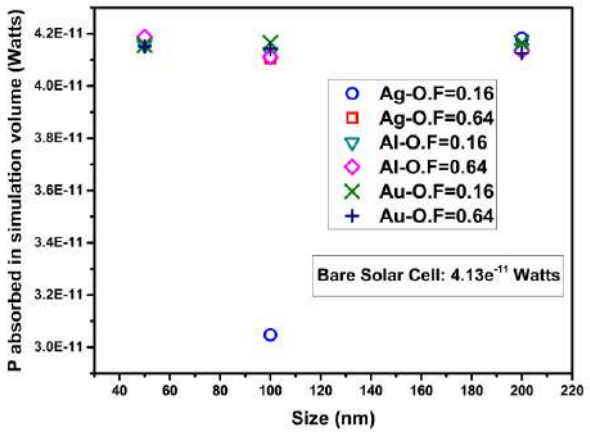
سلول‌های خورشیدی پلاسمونیک به عنوان یک حوزه تحقیقاتی جذاب با هدف افزایش کارایی سلولهای خورشیدی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته با استفاده از تأثیرات پلاسمونیک مورد توجه قرار گرفته‌اند. پلاسمونیک حوزه‌ای است که به تعامل بین امواج الکترومغناطیسی و نانوساختارهای فلزی می‌پردازد. این نانوساختارها خواص نوری منحصر به فردی مانند تشدید پلاسمون سطحی موضعی و تشدید پلاسمون پلاریتون‌های سطحی از خود نشان می‌دهند که می‌تواند برهمکنش‌های نور-ماده را در مقیاس نانو دستکاری و تقویت کنند [۲-۱]. سلول‌های خورشیدی CIGS نوعی از سلول‌های خورشیدی لایه نازک هستند که به‌دلیل پتانسیل دستیابی به بازده و پایداری بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵-۳]. برای افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی، روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برخی از روش‌ها شامل به دام انداختن نور[۶]، بافت سطحی[۷]، پوشش‌های ضد انعکاس[۸] و ترکیب نانوساختارهای پلاسمونیک هستند. هدف تکنیک‌های به دام انداختن نور، افزایش طول مسیر نور در لایه جاذب و در نتیجه افزایش جذب نور است[۶]. در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، بالاترین بازده ۲۳٫۳۵ درصدی را برای سلول خورشیدی CIGS به‌دست آمده است[۱۲-۹]. افزایش جذب به‌دلیل دو پدیده اصلی پراکندگی و تشدید پلاسمونی رخ می‌دهد [۱۴-۱۳]. در پراکندگی، نانوساختارهای فلزی به‌عنوان مراکز پراکندگی، نور فرودی را در جهت‌های مختلف پراکنده می‌کنند. این پراکندگی ممکن است جذب کلی نور را کاهش دهد در واقع نور را به سمت بیرون ساختار سلول خورشیدی پراکنده کند و موجب افت منحنی جذب در طول موج‌های خاص شود. از طرفی پراکندگی نور توسط نانوساختارهای فلزی می‌تواند نور را در ساختار سلول خورشیدی به دام بیندازد و این فرصت را در اختیار فوتون‌هایی که قبلا جذب نشدند، قرار دهند که با ماده فعال برهمکنش داشته و به‌وسیله آن جذب شوند. در تشدید پلاسمونی، ساختارهای پلاسمونی وابسته به اندازه و نوع ماده می‌توانند تشدیدهای پلاسمونی موضعی (LSPR) یا انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPP) را پشتیبانی کنند. این تشدیدها در طول‌موج‌های خاصی رخ می‌دهند که در آن نور فرودی با نوسانات جمعی الکترون‌ها در نانوساختارهای پلاسمونیک جفت می‌شود. در این طول‌موج‌های تشدید، جذب فوتون افزایش می‌یابد. هنگامی که یک فوتون به‌وسیله ماده نیم‌رسانا جذب می‌شود، یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته شده و یک حفره در نوار ظرفیت به‌جا می‌گذارد و یک زوج الکترون-حفره (اکسایتون) را ایجاد می‌کند. نانوساختارهای پلاسمونیک می‌توانند جذب نور را با جفت کردن نور فرودی با SPPs و LSPRs و تقویت میدان الکترومغناطیسی موضعی در مجاورت پلاسمون‌ها، افزایش دهند. این افزایش جذب می‌تواند اکسایتون‌های بیشتری را در ماده فعال سلول ایجاد کند که منجر به افزایش جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز می‌شود.

هدف این پژوهش بهبود بازدهی تبدیل کلی و افزایش جذب نور با استفاده از نانوساختارهای نقره، طلا و آلومینیوم در اندازه ها و O.F. (فاکتورهای اشغال‌شدگی سطحی) مختلف در ناحیه بالای لایه جاذب CIGS است. در بخش‌های بعدی تغییر خواص نوری و الکتریکی سلول خورشیدی شبیه‌سازی‌شده با استفاده از نرم‌افزار لومریکال ارائه شده‌است و نتایج با سلول ساده مرجع مقایسه شده است.

روش تحقیق

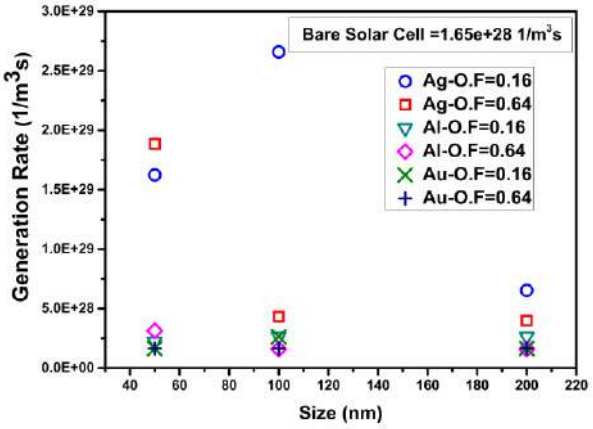
تحلیل تئوری مشخصه‌های نوری و الکتریکی سلول CIGS با آرایه‌های نانومکعبی نقره، طلا و آلومینیوم و بدون آرایه‌های مکعبی با حل معادلات ماکسول به روش FDTD و حل معادلات فیزیک الکترونیک توزیع فضایی الکترون‌ها و حفره‌ها و ناخالصی‌ها، میدان الکتریکی، ساختار نواری، چگالی جریان و... در مدل‌سازی انتقال بار صورت می‌پذیرد. سلول خورشیدی CIGS متشکل از چندین لایه، ZnO (۸۰ نانومتر)، CdS (۶۰ نانومتر)، CIGS (۱۰۰۰ نانومتر)، Mo (۵۰۰ نانومتر) در نظر گرفته شده‌است. در ماژول FDTD نرم افزار لومریکال به شبیه‌سازی اپتیکی و از نتایج آن در ماژول Charge نرم‌افزار به شبیه‌سازی و مشخصه‌یابی الکتریکی

ساختار سلول خورشیدی پرداخته شده‌است. با تغییر ویژگی‌های نانومکعب‌های پلاسمونیک در بالای لایه جاذب از جمله اندازه (۵۰،۱۰۰ و ۲۰۰ نانومتر) و (O.F. ۰٫۱۶ و ۰٫۶۴)، تاثیر اثرات پلاسمونی بر ویژگی‌های سلول خورشیدی بررسی می‌شود. هدف از این شبیه‌سازی دستیابی به بازدهی بهینه در سلول خورشیدی کالکوپریتی CIGS است. تاثیر سه پارامتر اندازه، فاکتور اشغال‌شدگی سطح و نوع ماده نانومکعب‌های پلاسمونی بر جذب نور، میزان تولید حامل‌های بار و در نتیجه بازده سلول بررسی شده‌است. در شکل ۱ مقدار انرژی جذب شده به‌وسیله سلول خورشیدی در حجم شبیه‌سازی به توان نوری ارسالی نشان داده شده‌است. برای برخی نمونه‌ها، استفاده از المان‌های پلاسمونی باعث افزایش جذب در محدوده طیفی نور فرودی شده‌است.



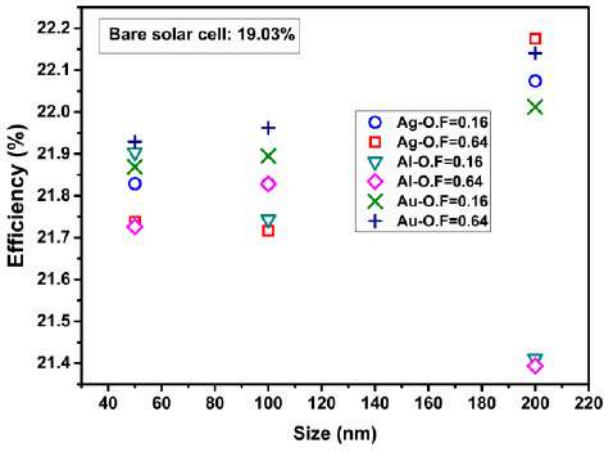
شکل ۱: نمودار توان جذب شده در حجم شبیه‌سازی برحسب اندازه، این نمودار برای سه ماده نقره، آلومینیم و طلا با دو فاکتور اشغال‌شدگی مختلف المان‌های پلاسمونی ارائه شده‌است.

از نتایج جذب بیشتر نور به‌واسطه حضور المان‌های پلاسمونی، افزایش میزان تولید حامل‌های بار است (شکل۲). هدف اصلی در سلول خورشیدی، تبدیل هر چه بیشتر نور به انرژی الکتریکی از طریق تولید حامل‌های بار در ماده فعال است. با وجود اینکه افزایش تولید حامل‌های بار مطلوب است، اما تنها عامل تعیین‌کننده بازده کلی یک سلول خورشیدی نیست. چندین فرایند از جمله استخراج، انتقال و نرخ بازترکیب حامل‌های بار بر کارایی سلول خورشیدی تاثیر می‌گذارند. برای مثال اگر حامل‌های بار قبل از رسیدن به الکترودها، بازترکیب شوند، انرژی آن‌ها از بین می‌رود و بازده کلی سلول کاهش می‌یابد. بنابراین ساختارهای پلاسمونی در سلول خورشیدی باید به دقت طراحی شوند تا نرخ بازترکیب را به حداقل و طول عمر حامل‌های بار را به حداکثر برسانند. در نمونه نقره با اندازه ۱۰۰ نانومتر و چگالی سطحی ۰٫۱۶ بیشترین مقدار افزایش تولید حامل تقریبا از مرتبه 10^4 مشاهده می‌شود.



شکل ۲: نرخ تولید حامل‌های بار بر حسب اندازه، این نمودار برای سه ماده نقره، آلومینیم و طلا با دو فاکتور اشغال شدگی مختلف المان‌های پلاسمونی ارائه شده‌است.

در شکل ۳ بازدهی نمونه‌ها به‌تفکیک اندازه، ماده و چگالی سطحی آورده شده است.



شکل ۳: مقایسه بازده تبدیل توان سلول‌های خورشیدی در حضور المان‌های پلاسمونی

در مقایسه با بالاترین رکورد آزمایشگاهی [۱۵] ثبت شده با بازده ٪۲۳/۳۵ با ضخامت بیش از ۱۰۰۰ نانومتر لایه جاذب، بیشترین بازدهی سلول، مربوط به نمونه حاوی نانومکعب‌های طلا با اندازه ۱۰۰ نانومتر و چگالی سطحی

۰٫۱۶ با بازدهی ٪۲۵٫۶۱ است. این نمونه علاوه بر کاهش هزینه های ناشی از کاهش ضخامت لایه جاذب که بیشترین سهم در فرایند ساخت سلول‌های خورشیدی CIGS را شامل می‌شود، تنها با استفاده از اثرات پلاسمونیک منجر به افزایش بازده سلول شده‌است. در این پژوهش در برخی نمونه‌ها با وجود حضور المان‌های پلاسمونی، بازده سلول کاهش یافته‌است که نشان‌دهنده لزوم طراحی دقیق و بهینه المان‌های پلاسمونی درون سلول خورشیدی است به‌گونه‌ای که ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی سلول همزمان بهبود پیدا کنند. جذب بیشتر به‌تنهایی نمی‌تواند بازدهی بیشتر سلول را تضمین کند و استخراج و جمع‌آوری بهینه حامل‌های بار نیز از عوامل موثر در بازدهی سلول خورشیدی هستند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سلول خورشیدی کالکوپریتی در حضور نانوساختارهای پلاسمونی از منظر اپتیکی و الکتریکی مشخصه‌یابی شده‌است. بر اساس شبیه‌سازی، حداکثر بازده ٪ ۲۵٫۶۱ در حضور نانومکعب‌های طلا با ابعاد ۱۰۰ نانومتر، O.F=۰٫۱۶. به‌دست آمد. بهبود بازده به‌دلیل افزایش جذب ناشی از افزایش طول مسیر نوری و افزایش تولید حامل، کاهش بازترکیب و بهبود جداسازی حامل ناشی از تشدید پلاسمونی و اثر توزیع میدان نزدیک است.

سپاسگزاری

از صندوق ملی علم ایران (صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور) که از پروژه حاضر حمایت مالی به عمل آورده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

مرجع‌ها

[1] Bencherif, H., et al. "Improved InxGa1_xP/GaAs/Ge tandem solar cell using light trapping engineering and multi-objective optimization approach." Optik, 2020.

[2] Mandal, Prasanta. "Application of plasmonics in solar cell efficiency improvement: a brief review on recent progress." Plasmonics, 2022.

[3] AlZoubi, Tariq, and Mohamed Moustafa. "Numerical optimization of absorber and CdS buffer layer in CIGS solar cells using SCAPS." Int. J. Smart Grid Clean Energy, 2019.

[4] Wang, Yi-Chung, Tsung-Ta Wu, and Yu-Lun Chueh. "A critical review on flexible Cu (In, Ga) Se2 (CIGS) solar cells." Materials Chemistry and Physics, 2019.

[5] Kumar, Anjan, et al. "Computational modelling of two terminal CIGS/perovskite tandem solar cells with power conversion efficiency of 23.1%." European journal of inorganic chemistry 2021.

[6] Peter Amalathas, Amalraj, and Maan M. Alkaisi. "Nanostructures for light trapping in thin film solar cells." Micromachines, 2019.

[7] siner, S., et al., "Quantification and validation of the efficiency enhancement reached by application of a retroreflective light trapping texture on a polymer solar cell". Advanced energy materials, 2013.

[8] Tang, Zheng, Wolfgang Tress, and Olle Inganäs. "Light trapping in thin film organic solar cells." Materials today, 2014.

[9] Zouache, Rafik, et al. "Numerical study of high-efficiency CIGS solar cells by inserting a BSF µc-Si: H layer." Journal of Computational Electronics, 2022.

[10] Ramanujam, Jeyakumar, and Udai P. Singh. "Copper indium gallium selenide based solar cells–a review." Energy & Environmental Science, 2017**.**

[11] Ong, Kam Hoe, et al. "Review on substrate and molybdenum back contact in CIGS thin film solar cell." International Journal of Photoenergy, 2018.

[12] Massiot, Inès, Andrea Cattoni, and Stéphane Collin. "Progress and prospects for ultrathin solar cells." Nature Energy, 2020.

[13] Doiron, B., et al., "Quantifying Figures of Merit for Localized Surface Plasmon Resonance Applications: A Materials Survey". ACS Photonics, 2019.

[14] Naik, G.V., V.M. Shalaev, and A. Boltasseva, "Alternative Plasmonic Materials: Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver", Advanced materials (Weinheim), 2013.

[15] M. Nakamura, Yamaguchi, K., Kimoto, Y., Yasaki, Y., Kato, T., and Sugimoto, H., "Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)2 Thin-Film Solar Cell With Record Efficiency of 23.35%", IEEE Journal of Photovoltaics, 2019.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی پاسخ دمایی نانوذرات تبدیل افزایشی هسته-پوسته $Ba_2LuF_7:Yb^{3+}, Nd^{3+}, Er^{3+}@Ba_2LaF_7$

پریسا شیرزادی، اسماعیل حیدری، سمیه سلمانی شیک

دانشگاه خوارزمی، دانشکده فیزیک، آزمایشگاه سنسورهای نانوفوتونیکی و اپتوفلویدیک

Parisa.shirzadi@khu.ac.ir, E.heydari@khu.ac.ir, salmani@khu.ac.ir

چکیده - اندازه‌گیری دقیق و آنی دمای محلی در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت و پزشکی کاربرد دارد. این نیاز باعث گسترش قابل توجه تحقیقات برای توسعه حسگرهای نانوفوتونیکی دما شده است. در این پژوهش با استفاده از شدت تابش نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس که تابش فروسرخ‌نزدیک را به تابش مرئی و فرابنفش تبدیل می‌کند، دما به صورت محلی اندازه‌گیری می‌شود. اگرچه این ویژگی‌های نوری، نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس را نامزدهای امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای زیست‌تحلیلی و زیست‌پزشکی مانند واکنش زنجیره‌ای پلیمراز و دماسنجی می‌سازد، اما عملکرد نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس به دلیل روشنایی نوری کم آنها به خطر می‌افتد. بنابراین تحقیقاتی در زمینه‌ی نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس فرکانس برای افزایش روشنایی و کارایی لومینسانس تبدیل افزایشی صورت گرفته است. به این ترتیب در این پژوهش به بررسی پایداری تابشی و دماسنجی با استفاده از نانومواد فاز مکعبی هسته-پوسته آلاییده شده با یون‌های لانتانید، با ساختار Ba_2LuF_7 و یون‌های آلاییده شده $Er^{3+}/Yb^{3+}/Nd^{3+}$ به عنوان هسته و Ba_2LaF_7 به عنوان پوسته آماده شده است، می‌پردازیم.

کلید واژه- نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس ، فروسرخ‌نزدیک، دماسنج، فوتولومینسانس

Investigation of Temperature reaction $Ba_2LuF_7:Yb^{3+}, Nd^{3+}, Er^{3+}@Ba_2LaF_7$ Core-shell Upconversion Nanoparticles

Parisa Shirzadi, Dr. Esmaeil Heydari, Dr. Somayeh Salmani Shik
Khwarazmi University, Faculty Physics, Nanophotonic Sensors and Optofluidics Lab
Parisa.shirzadi@khu.ac.ir, E.heydari@khu.ac.ir, salmani@khu.ac.ir

Abstract- Accurate and instantaneous measurement of local temperature is used in various fields, including industry and medicine. This need has caused a significant expansion of research for the development of nanophotonic temperature sensors. In this research, we measure the temperature locally by using the radiation intensity of upconversion nanoparticles that converts near-infrared radiation into visible and ultraviolet radiation. Although these optical properties make upconversion nanoparticles promising candidates for bioanalytical and biomedical applications such as polymerase chain reaction and thermometry, the performance of upconversion nanoparticles is compromised by their low optical brightness. Research is focused on upconversion nanoparticles to increase the brightness and efficiency of upconversion luminescence. In this regard, we investigate the radiation and thermometric stability using core-shell cubic phase nanomaterials doped with lanthanide ions, with Ba_2LuF_7 structure and $Er^{3+}/Yb^{3+}/Nd^{3+}$ doped ions as core and Ba_2LaF_7 as shell.

Keywords: Upconversion Nanoparticles, Near-infrared, Thermometry, Photoluminescence (PL)

مقدمه

نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس دارای خاصیت فوتولومینسانس هستند. این نانوذرات توانایی تابش نور با طول موج کوتاه‌تر و انرژی بیشتر نسبت به تابش برانگیزش را دارند، یا به عبارت دیگر نانوذراتی با خاصیت ضداستوکس هستند [۱-۳]. پدیده ضداستوکس که یک فرآیند غیر خطی می‌باشد با ۵ مکانیزم مختلف به صورت جذب حالت برانگیخته[۳۵] (ESA)، انتقال انرژی تبدیل‌افزایشی[۳۶] (ETU)، انتقال انرژی مشارکتی[۳۷] (CET)، بهمن فوتون[۳۸] (PA) و مهاجرت انرژی تبدیل‌افزایشی[۳۹] (EMU) دیده می‌شود. در این میان، انتقال انرژی تبدیل‌افزایشی یک فرآیند کارآمدتر و رایج است [۴-۹]. این ویژگی نوری نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس کاربردهای گسترده‌ای، از جمله سنجش دما، تصویربرداری، تشخیص و درمان را شامل می‌شود. تاریخچه این تحقیقات به سال ۱۹۵۹ باز می گردد، زمانی که ایده‌ی شمارنده های کوانتومی فروسرخ توسط بلومبرگن معرفی شد [۱۰]. با توسعه نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس ، امکان اندازه‌گیری دمای محلی به صورت غیر تماسی در نواحی خارج از دسترس و خطرناک، به صورت آنی فراهم می‌شود. عملکرد این نانوذرات به این شکل است که پس از برانگیزش در ناحیه جذب خود، تابشی وابسته به دما، معمولاً در نواحی فرابنفش، مرئی یا فروسرخ نزدیک از خود نشان می دهند. استفاده از پارامترهای وابسته به دمای این نانوذرات مانند شدت تابش، نسبت شدت تابش و طول‌عمر تابش می‌توانند امکان استفاده از آن‌ها را به عنوان دماسنج غیرتماسی فراهم کند.

مزایای نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس عبارتند از: تابش برانگیزش در محدوده‌ی انتخابی از ناحیه فروسرخ، در نقطه‌ای که حلال های رایج مانند آب، جذب ضعیفی دارند و انتقال حرارت به نمونه از تابش برانگیخته کننده، به حداقل می رسد. با توجه به اینکه که سطح انرژی برانگیزش و نور تابشی با هم متفاوت است، تابش نمونه را می توان به راحتی از تابش برانگیخته کننده آن جدا کرد، این امر از هرگونه تداخل در سیستم تشخیص جلوگیری می کند و نسبت سیگنال به نویز عالی را ارائه می دهد. علی‌رغم همه‌ی پتانسیل‌های فوق العاده‌ای که نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس دارند محققان همواره به دنبال رفع محدودیت‌های این نانوذرات بوده‌اند. از جمله محدودیت‌های آن استفاده چند منظوره (مانند استفاده همزمان برای تصویربرداری و سنجش دما) و افزایش لومینسانس تبدیل‌افزایشی[۴۰] (UCL) می‌باشد. استراتژی‌های افزایش بازده لومینسانس تبدیل افزایشی توسط لیو و همکارانش بررسی شده است، به این صورت که با سنتز نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس هسته-پوسته باعث افزایش بازده لومینسانس نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس می‌شوند [۱و۳و۶و۱۰].

در این پژوهش از نانوذرات هسته-پوسته تبدیل‌افزایشی $Ba_2LuF_7:Yb^{3+}$, Nd^{3+}, $Er^{3+}@Ba_2LaF_7$ با خاصیت تصویربرداری دوگانه UCL/CT و سنجش غیرتماسی دما استفاده می‌شود. قابل ذکر است که یون‌های لانتانید

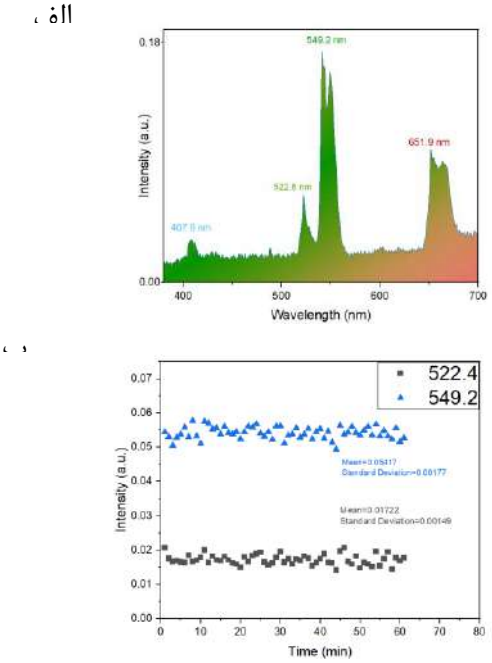
[35] **excited-state absorption (ESA)**
[36] **energy transfer UC (ETU)**
[37] **cooperative energy transfer (CET)**
[38] **photon avalanche (PA)**
[39] **migration-mediated UC (EMU)**
[40] **Upconversion Luminescence (UCL)**

$Yb^{3+}/Er^{3+}/Nd^{3+}$ می توانند لومینسانس تبدیل افزایشی کارآمد را تحت برانگیزش فروسرخ‌نزدیک تولید کنند [۹و۱۱] و عملکرد یون‌های $Ba^{3+}/Lu^{3+}/ Yb^{3+}$ با ضریب جذب پرتو ایکس بالا توانایی تصویربرداری CT را به وجود می‌آورد [۱۱]. این نانوذرات مبتنی بر لانتانیدها برای تصویربرداری UCL ، لومینسانس تبدیل افزایشی شدیدی را نشان داده است [۹].

این پژوهش یک روش طیف سنجی برای ارزیابی دما پیشنهاد می‌کند، که در آن با استفاده از شدت تابش وابسته به دما یون لانتانید Er^{3+} در هر درجه از دما، نسبت به شدت اولیه، اندازه‌گیری دما صورت می‌گیرد. این نسبت شدت لومینسانس همچنین با حذف هرگونه عدم دقت ناشی از نوسانات کنترل نشده نور برانگیزش، نقطه اطمینان بیشتری را ارائه می دهد. نسبت شدت لومینسانس اغلب برای نانو دماسنج‌های مبتنی بر لانتانید مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوارهای تابش یون‌های لانتانید معمولاً باریک و به خوبی تعریف شده‌اند، و این ویژگی به ما اجازه‌ی محدود کردن طیف‌های تابش، برای تخمین مقادیر دمای اندازه‌گیری شده را می‌دهد.

تجربی

در این پژوهش از نانوذرات هسته-پوسته غیرآلی با ماتریس میزبان کریستالی Ba_2LuF_7 که حاوی ترکیبی از حساس‌کننده Yb^{3+}، Nd^{3+} و فعال‌کننده Er^{3+} یون‌های لانتانید به عنوان هسته و پوسته Ba_2LaF_7 است، استفاده می‌شود. این نانوذرات پس از برانگیزش با استفاده از فوتون‌های لیزر ۹۸۰ نانومتر(۲ وات)، یون‌های Yb^{3+} به حالت برانگیخته $2F_{5/2}$ می‌رود و انرژی خود را به یون‌های Er^{3+} منتقل می‌کنند و در نهایت به صورت تابشی با طول موج کمتر و انرژی بیشتر دیده می‌شود، تابش نمونه پس عبور از لنز و فیلتر ۹۸۰ نانومتر توسط طیف سنج جمع‌آوری می‌شود، شکل۱(الف) پیک های تابش در ۴۰۷.۶ نانومتر، ۵۲۲.۸ نانومتر، ۵۴۹.۲ نانومتر و ۶۵۱.۹ نانومتر وجود دارد که به صورت کلی یک رنگ سبز دیده می شود. شکل ۱(ب) پایداری شدت PL را در طول ۶۰ دقیقه برانگیزش مداوم با لیزر ۹۸۰ نانومتر(۴۴۳.۲ میلی وات) ، با استفاده از طیف‌سنج CCD100 Thorlabs اندازه‌گیری می‌کند. انحراف شدت برای طول موج ۵۲۲.۴(۸/۶۵٪)، ۵۴۹.۲(۳/۲۷٪) است که یک نتیجه خوب برای چنین بازه زمانی طولانی است.

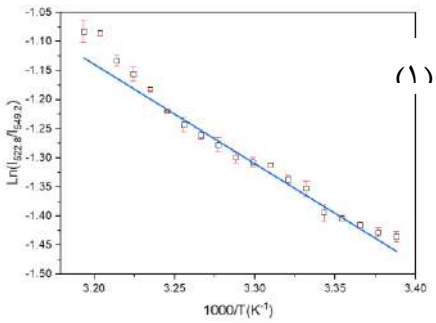


شکل ۱(الف) نمودار PL نانوذرات با استفاده از لیزر ۹۸۰ نانومتر (ب) نمودار پایداری تابشی برای دو طول تابشی ۵۲۲.۸ و ۵۴۹.۲ نانومتر

پاسخ دمایی نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس به عنوان حسگرهای نانوفوتونیکی با افزایش دما در یک محیط آبی مورد بررسی قرار گرفت. با نظارت بر تغییرات طیفی با افزایش دما از ۲۲ درجه سانتی‌گراد تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد شدت تابش کاهش پیدا می‌کند. این موضوع باعث می‌شود که این نانوذرات کاندیدای مناسبی برای سنجش دما با کمک نسبت سنجی باشند. شکل ۲ اندازه گیری نسبتی PL را برای پیک‌های ۵۴۱.۲ نانومتر و ۵۲۲.۸ نانومتر برحسب دما نشان می دهد. نشانگرهای مربعی نشان دهنده نسبت تغیرات شدت تابش (I) دو پیک است، زمانی که دما از ۲۲ درجه‌سانتی‌گراد تا ۴۰ درجه‌سانتی‌گراد تغییر می کند. و خط آبی نشان دهنده یک تناسب خطی با شیب (R)

۱.۷۰۶۷۳– است که روندخطی خوبی را در محدوده دمایی ۲۲ تا ۴۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. اگر تابع کار این سنسور را داشته باشیم با به‌دست آوردن طیف و نسبت آن‌ها (۱) می‌توان دما را به دست آورد.

$$R = \ln(^{I522.8}/_{I549.2}) \quad (1)$$



شکل۲ نسبت سنجی شدت پیک‌های ۵۴۹.۲/ ۵۲۲.۸ به تغییرات دما

نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات انجام شده نانوذرات تبدیل‌افزایشی $Ba_2LuF_7:Yb^{3+}, Nd^{3+}, Er^{3+}@Ba_2LaF_7$ پایداری تابشی بسیار خوبی را در طول موج ۵۲۲.۴ و ۵۴۹.۲ با انحراف شدت، ۸٪/۶۵ و ۳/۲۷٪ از خود نشان داده است. طبق تحقیقات با توجه به شیب به دست آمده در این پژوهش و استفاده از رابطه‌ی زیر، ΔE اختلاف انرژی، K ثابت بولتسمان و T دما بر حسب کلوین:

$$S = \frac{dR}{dT} = R(\frac{\Delta E}{KT^2})$$

حساسیت دمایی $۰/۰۰۴۵۶K^{-1}$ است. بنابراین می‌توان گفت، نانوذرات تبدیل‌افزایشی فرکانس آلاییده شده با لانتانید، که از فعال‌کننده Er^{3+} به عنوان یون حساس به دما استفاده کرده است دارای حساسیت بیشتری در محدوده دمایی وسیع، به‌ویژه محدوده دمایی بیولوژیکی برای اندازه‌گیری آنی دما استفاده می‌شوند.

سپاسگزاری

با تشکر از شرکت پالایش گاز سرخون قشم که در انجام پژوهش یاری کرده‌اند.

مرجع‌ها

Wilhelm, Stefan “Perspectives for upconverting nanoparticles.” *ACS nano*. Vol. 11, N0. 11, pp. 10644-10653, 2017.

H. Markus, H. Schäfer “Upconverting nanoparticles.” *Angew. Vol.* 50, No. 26, pp. 5808-5829, 2011.

M. Habibi, et al “3D printed optofluidic biosensor: NaYF4: Yb3+, Er3+ upconversion nano-emitters for temperature sensing.” Sens. Actuator A Phys, Vol. 326, pp.112734. 2021.

Liu, X., Yan, C. H., & Capobianco “Photon upconversion nanomaterials.” Chem. Soc. Rev, Vol. 44(6), pp. 1299-1301, 2015.

Dramićanin, Miroslav “ Luminescence thermometry: methods, materials, and applications.” Woodhead Publ, 2018.

Mazetyte-Stasinskiene, Raminta, and Johann Michael Köhler. “Sensor micro and nanoparticles for microfluidic application.” *Appl. Sci* Vol. 10.23, pp. 8353, 2020.

Lei, Pengpeng, Jing Feng, and Hongjie Zhang. “Emerging biomaterials: taking full advantage of the intrinsic properties of rare earth elements.” Nano Today, Vol. 35, pp. 100952, 2020.

Zhang, Fan “Photon upconversion nanomaterials.” Mikroelektronik, Vol. 416, 2015.

Li, Hao, et al. “Multi-Mode Lanthanide-Doped Ratiometric Luminescent Nanothermometer for Near-Infrared Imaging within Biological Windows.” *Nanomaterials* 13.1, 219, 2023.

Auzel, François. “Upconversion and anti-stokes processes with f and d ions in solids.” *Chem. Rev* Vol. 104.1, pp. 139-174, 2004.

Wang, Yong, et al. “Construction of multifunctional lanthanide-based nanoparticles Ba2LuF7: Yb/Er/Ho for in vivo dual-modal tumor imaging.” Opt. Mater Vol. 128, pp. 112369, 2022.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

اندازه گیری فوتونیکی گلوکز با استفاده از ژل تترا اتیل اورتوسیلیکات

امیرحسین مرادی، اسماعیل حیدری، محمدحسین مجلس‌آرا، محمد معینی

e.heydari@khu.ac.ir

چکیده- در اینجا اندازه‌گیری غلظت گلوکز در ماتریسی اورموسیلی با استفاده از فناوری طیف سنجی تفکیک زمانی و پالس های لیزر آبی ۴۱۰ نانومتر معرفی می‌شود. با وجود یک کمپلکس پلاتینی حساس به اکسیژن به عنوان لایه حسگری و با تعبیه گلوکزاکسیداز برای اکسیداسیون گلوکز، این زیست حسگر سطح گلوکز را به‌صورت غیرمستقیم از طریق اندازه‌گیری طول‌عمر تابش فسفرسانس کمپلکس با توجه به اکسیژن مصرفی در واکنش بدست می‌آورد که توانایی اندازه گیری میزان گلوکز از ۳۰ تا ۳۵۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر را دارد. این روش امکان پایش دقیق، پیوسته و قابل اعتماد گلوکز را فراهم می‌آورد و به خدمات و تحقیقات در حوزه زیستی، سلولی و درمانی کمک می‌کند.

کلید واژه- سنجش گلوکز، هیدروژل، اورموسیل، طول‌عمر فسفرسانس، طیف سنجی تفکیک زمانی

Photonic-based Glucose Measurement using Tetraethyl orthosilicate

Amirhossein Moradi, Esmaeil Heydari, Mohammadhossein Majlesara, Mohammad Moeini

e.heydari@khu.ac.ir

Abstract- Here measurement of glucose concentration in an ormosil matrix is introduced using time-resolved spectroscopy technology and 410-nanometer blue laser pulses. Utilizing an oxygen-sensitive platinum complex as a sensing layer and incorporating glucose oxidase for glucose oxidation, this biosensor indirectly obtains the glucose level by measuring the phosphorescence lifetime of the complex based on the consumed oxygen in the reaction. This method has the capability to measure glucose levels in the range of 30 to 350 mg/dl. The approach provides an accurate, continuous, and reliable monitoring of glucose, contributing to services and research in the biological, cellular, and therapeutic fields.

Keywords: Glucose measurement, hydrogel, ormosil, phosphorescence lifetime, time-resolved spectroscopy

مقدمه

گلوکز، نوع مهمی از قندها در سیستم‌های زیستی محسوب می‌شود و نقش اساسی در تأمین انرژی مورد نیاز برای سلول‌ها و در اجرای عملکردهای متعدد فیزیولوژیکی در انسان ایفا می‌کند. سنجش سطح گلوکز در حوزه‌های متنوع علوم زیستی و سلولی از اهمیت گسترده‌ای برخوردار است و در تحقیقات مختلفی از جمله داروسازی در بررسی اثر داروها بر سطح گلوکز، زیست‌شناسی مولکولی در اطلاع از وضعیت متابولیک سلولی، بیوشیمی در مصرف و تعادل قند در سیستم بدنی و پزشکی برای مدیریت دیابت به کار می‌رود. حسگرهای فوتونیکی گلوکز ابزارهای مهمی در زمینه پایش سطح گلوکز می‌باشند. زمینه‌های مختلفی از فناوری‌های اپتیکی از جمله اندازه‌گیری طیف جذب اپتیکی، قطبش سنجی، طیف سنجی رامان و طیف سنجی تفکیک زمانی برای این هدف به کار گرفته می‌شود که در این مقاله از روش طیف سنجی تفکیک زمانی حسگرهای فوتونیکی با تابش فسفرسانس بهره گرفته می‌شود. از مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌توان به حساسیت بالا، عدم نیاز به کالیبراسیون مکرر و پی‌درپی، اندازه‌گیری پیوسته و هزینه پایین آن اشاره کرد[۱].

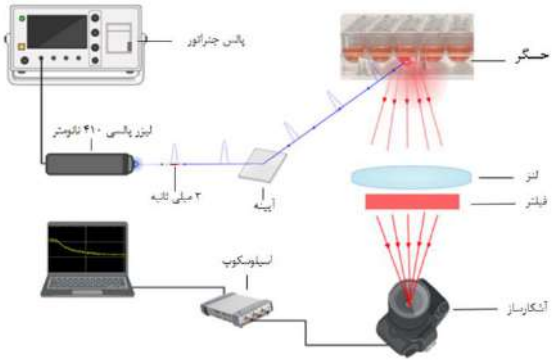
بخش تجربی

در این پژوهش، از سیلیس های اصلاح شده آلی یا همان اورموسیل‌ها برای ساخت یک حسگر فوتونیکی گلوکز استفاده می‌شود که از ترکیب دو نوع اورموسیل با ساختار متخلخل و نفوذپذیر اکسیژن به عنوان ماتریس و کمپلکس پلاتینی حساس به اکسیژن به منظور اندازه‌گیری میزان اکسیژن مصرفی بوده که به روش سل-ژل ساخته می‌شود. همچنین یکی از این اورموسیل‌ها به منظور تشکیل هیدروژل و تثبیت آنزیم گلوکزاکسیداز در جهت کاتالیز واکنش اکسیداسیون گلوکز و تشکیل هیدروژن‌پراکسید و گلوکونیک‌اسید طبق معادله ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲, ۳].

$$\mathrm{Glucose} + \mathrm{O_2} \xrightarrow{\mathrm{GOx}} \mathrm{Gluconic\ Acid} + \mathrm{H_2O_2}$$

طبیعت آب‌دوست و محتوای آب بسیار بالای هیدروژل‌ها به شکلی شبیه به بافت طبیعی و ماتریس برون‌سلولی است. (۱) محتوای آب بالا منجر به زیست‌سازگاری هیدروژل‌ها می‌شود. علاوه بر نفوذپذیری و حساسیت بالا، اورموسیل‌ها همچنین ارزان قیمت بوده و به صرفه‌جویی در هزینه‌ها کمک به سزایی می‌کنند.

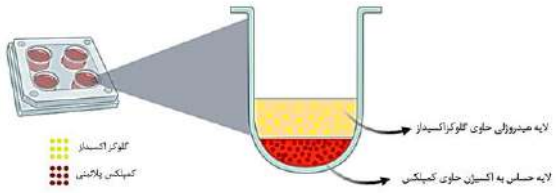
هدف اصلی این پژوهش، تجزیه و تحلیل رفتار حسگر فوتونیکی گلوکز در غلظت‌های مختلف گلوکز می‌باشد که در واقع کمپلکس حساس به اکسیژن پلاتینی نقش به سزایی در این امر ایفا می‌کند[۴]. این سنسور به منظور دستیابی به میزان غلظت گلوکز، نیازمند اندازه‌گیری دقیق طول‌عمر فسفرسانس می‌باشد که این امر توسط طیف سنجی تفکیک زمانی میسر می‌شود. در فناوری طیف سنجی تفکیک زمانی با استفاده از پالس های کوتاه لیزر دیودی آبی، سنسورهای در معرض غلظت های مختلف گلوکز برانگیخته می‌شوند و سپس با استفاده از یک آشکارساز سریع، آهنگ فروافت تابش فسفرسانس جمع آوری می‌شود[۵]. در مرحله بعد با برازش نمودار فروافت تابش‌ها با تابع نمایی درجه اول، طول عمر سنسورها و در نتیجه ارتباط میان طول‌عمر و میزان غلظت گلوکز بدست خواهد آمد. شکل ۱ شماتیکی از طیف‌سنجی تفکیک زمانی جهت بررسی طول‌عمر حسگر فوتونیکی گلوکز را نشان می‌دهد که در آن حسگر با استفاده از پالس‌های لیزر آبی به طول ۳ میلی ثانیه که توسط پالس جنراتور تنظیم می‌شوند، برانگیخته می‌شود. مسیر تابش لیزر توسط آیینه به سمت حسگر منحرف شده و تابش لومینسانس آن توسط یک لنز همگرا به سمت آشکارساز هدایت می‌شود.



شکل ۴۵- اندازه گیری طول‌عمر فسفرسانس حسگر فوتونیکی گلوکز با استفاده از طیف سنجی تفکیک زمانی

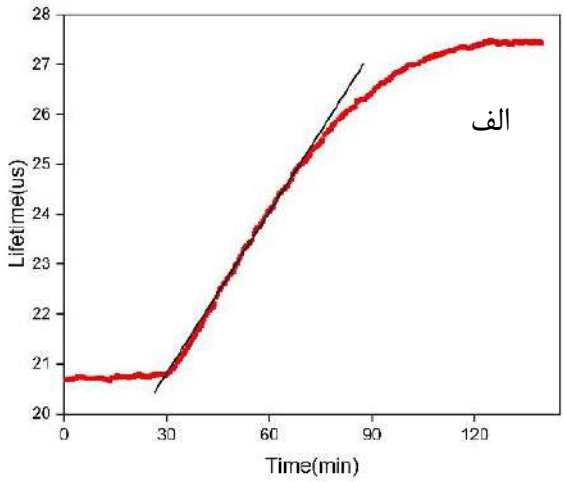
مواد و روش

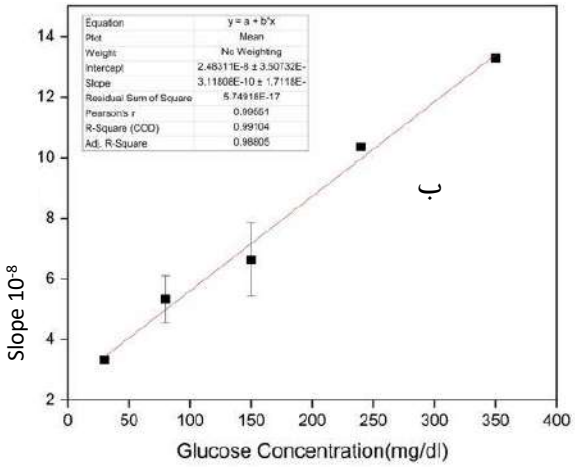
ساخت حسگر: لایه حسگری یا لایه ای که در کف میکروپلیت یو-شکل قرار می‌گیرد، از تعبیه کردن کمپلکس پلاتینی حساس به اکسیژن در ترکیب تترا اتیل اورتوسیلیکات و اکتیل تری اتوکسی سیلان به روش سل-ژل ساخته می‌شود. به منظور تثبیت گلوکز اکسیداز روی لایه زیرین، تترا اتیل اورتوسیلیکات به تنهایی در آب مورد استفاده قرار می‌گیرد که منجر به تشکیل ژل می‌شود[۶-۸]. شکل ۲ شماتیک ساختار حسگر را نمایش می‌دهد.



شکل 46- ساختار حسگر دولایه برای اندازه گیری گلوکز

با استفاده از روش طیف سنجی تفکیک زمانی، سنجش گلوکز در غلظت‌های ۳۰، ۸۰، ۱۵۰، ۲۴۰ و ۳۵۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر توسط حسگر انجام می‌شود. آزمایش به این صورت اجرا می‌شود که در ابتدا داده‌ها در مدت زمان ۳۰ دقیقه از بافر فسفات سالین یا پی بی اس با غلظت صفر گلوکز گرفته می‌شود که طبق انتظار تغییری در طول‌عمر حسگر نمایان نمی‌شود. در ادامه با افزایش غلظت محلول گلوکز بر روی حسگر، هر ۳۰ ثانیه یک داده جدید گرفته می‌شود تا طول‌عمر حسگر افزایش پیدا کرده و به نقطه اشباع خود برسد که مدت زمان به اشباع رسیدن طول‌عمر برای غلظت‌های مختلف بین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه به طول می‌انجامد. تمامی داده‌های گرفته شده با استفاده از تابع نمایی درجه یک مناسب برازش می‌شوند و طول‌عمر هر یک از این داده‌ها از این طریق بدست آورده می‌شود. طبق این پژوهش، رابطه بین شیب قسمت خطی نمودار تغییرات طول‌عمر و غلظت گلوکز مستقیم می‌باشد؛ بنابراین شیب تغییرات طول‌عمر برای همه غلظت‌های ۳۰، ۸۰، ۱۵۰، ۲۴۰ و ۳۵۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر محاسبه می‌شود که به ترتیب برابر با ۳/۳۱، ۵/۳۳، ۶/۶۳، ۱۰/۳۵و ۱۳/۲۸ می‌باشد. شکل ۳-الف تغییرات میزان طول‌عمر حسگر در غلظت صفرگلوکز و در ادامه غلظت ۲۴۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر گلوکز با گذشت زمان را نمایش می‌دهد. از طریق برازش خطی تغییرات طول‌عمر شیب محاسبه می‌شود. غلظت‌های دیگر مورد بررسی در این مقاله نیز دارای نمودارهای مشابه می‌باشند. نتایج هر کدام از نمودارها درنهایت در شکل ۳-ب جمع‌آوری می‌شوند که این نمودار نشان دهنده رابطه خطی بین شیب تغییرات طول‌عمر و غلظت گلوکز بوده که با تابع خطی با R-Square>0.99 برازش می‌شود.





شکل ۳-الف- اندازه‌گیری طول‌عمر حسگر با افزایش میزان گلوکز از ۰ به ۲۴۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر. ب- تغیرات طول‌عمر حسگر با تغییر غلظت‌های ۳۰، ۸۰، ۱۵۰، ۲۴۰ و ۳۵۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر.

نتیجه‌گیری

زیست‌حسگر گلوکز با استفاده از ترکیب یک لایه حسگر اکسیژن و گلوکزاکسیداز که در ژل محصور شده، توسعه یافته است. این حسگر با بهره‌گیری از تکنیک طیف سنجی تفکیک زمانی با استفاده از پالس‌های کوتاه لیزر، قادر به اندازه‌گیری غلظت گلوکز در بازه دینامیکی ۳۰ تا ۳۵۰ میلی‌گرم‌بردسی‌لیتر با حساسیت 3.11×10^{-8} دسی‌لیتر برمیلی‌گرم می‌باشد. این پایش گلوکز بر اساس اندازه‌گیری طول‌عمر تابش حاصل از کمپلکس پلاتینی انجام می‌شود که با اکسیژن رابطه معکوسی دارد. با افزایش غلظت گلوکز میزان مصرف اکسیژن محیط نیز افزایش می‌یابد که موجب افزایش طول‌عمر تابش حسگر می‌شود. در نهایت با تحلیل نمودار تغییرات طول‌عمر تابش حسگر و بدست آوردن شیب آن، همبستگی خطی بین غلظت گلوکز و شیب تغییرات طول‌عمر تابش حسگر حاصل می‌شود. این روش علاوه بر دقت و حساسیت مناسب با هزینه پایینی قابل ساخت و اجرا است. به عبارت دیگر این حسگر به دلیل کارآیی، دقت در اندازه‌گیری و همچنین هزینه اجرای پروسه‌ها یک راهکار کارآمد برای سنجش غلظت گلوکز به حساب می‌آید که به عنوان یک پیشرفت مهم در زمینه حسگرهای گلوکز توانایی سنجش دقیق و کارآمد غلظت گلوکز را داراست.

سپاسگزاری

با تشکر از ستاد ویژه توسعه فناوری‌های نانو و میکرو بابت حمایت های تشویقی از این پژوهش.

مرجع‌ها

[1] R.J. McNichols, G.L. Cote, Optical glucose sensing in biological fluids: an overview, Journal of biomedical optics 5(1) (2000) 5-16.

[2] P. Dong, B.S. Ko, K.A. Lomeli, E.C. Clark, M.J. McShane, M.A. Grunlan, A glucose biosensor based on phosphorescence lifetime sensing and a thermoresponsive membrane, Macromolecular Rapid Communications 43(9) (2022) 2100902.

[3] C.-S. Chu, C.-Y. Chuang, Highly sensitive fiber-optic oxygen sensor based on palladium tetrakis (4-carboxyphenyl) porphyrin doped in ormosil, Journal of luminescence 154 (2014).

[4] G. Pandey, R. Chaudhari, B. Joshi, S. Choudhary, J. Kaur, A. Joshi, Fluorescent biocompatible platinum-porphyrin–doped polymeric hybrid particles for oxygen and glucose biosensing, Scientific reports 9(1) (2019).

[5] E. Heydari, J. AmirAhmadi, N. Ghazyani, G. Bai, H. Zare-Behtash, M. MajlesAra, Dual-mode nanophotonic upconversion oxygen sensors, Nanoscale 14(36) (2022).

[6] N.DEMİRKIRAN, E. Ekinci, Effect of GLYMO/TEOS/MTEOS Sol-Gel Film Thickness on the Responses of Glucose Biosensor, Journal of the Turkish Chemical Society Section B: Chemical Engineering.

[7] Y. Tang, E.C. Tehan, Z. Tao, F.V. Bright, Sol–gel-derived sensor materials that yield linear calibration plots, high sensitivity, and long-term stability, Analytical chemistry 75(10) (2003).

[8] Y. Mao, Q. Zhao, T. Pan, J. Shi, S. Jiang, M. Chen, B. Zhou, Y. Tian, Platinum porphyrin/3-(trimethoxysily)propylmethacrylate functionalized flexible PDMS micropillar arrays as optical oxygen sensors, New Journal of Chemistry 41(13) (2017) 5429-5435.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی اثر فیلتر داخلی در روغن زیتون به روش طیف سنجی جذبی و فلورسانس القایی

سجاد دوره[۱]، عزالدین مهاجرانی[۱]، فائزه طالبی فر[۱]

[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
Email: e-mohajerani@sbu.ac.ir , doreh37@gmail.com

چکیده– اثر فیلتر داخلی (IFE) قبلا به عنوان یک خطا در اندازه‌گیری فلورسانس در نظر گرفته می‌شد. در سال‌های اخیر، ارزیابی مبتنی بر فلورسانس به عنوان یک مدل مهم برای ارزیابی تکنیک طیف سنجی توسعه داده شده است و کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های سنجش فیزیکی، شیمیایی و زیستی پیدا کرده است. تصحیح اثر فیلتر داخلی باعث افزایش دقت اندازه‌گیری، انعطاف‌پذیری، سادگی نتایج و تحلیل داده‌های فلورسانس می‌شود. بررسی‌های حاضر برای اولین بار وضعیت پیشرفت سیستم‌های حسگر فلورسنت مبتنی بر اثر فیلتر داخلی را شامل استراتژی سنجش، شرایط ضروری، گزینه مواد و کاربردهای آنها معرفی می‌کند. برای تشخیص آنالیت‌های هدف مختلف از جمله روغن‌های خوراکی به روش طیف سنجی فلورسانس نیازمند بررسی و تصحیح این اثر می‌باشد. علاوه بر این، برای داشتن نتایج خوب و قابل قبول در نمونه‌های فلورسنت که دارای جذب بالایی در طول موج های تحریک و انتشار فلورسانس هستند باید این اثر مورد بررسی قرار گرفته و تصحیح شود.

کلید واژه– اثر فیلتر داخلی، بازجذبی طول موج تحریک و گسیل، فلورسانس، قانون بیرلامبرت

Investigating of Inner Filter Effect in olive oil by absorption and induced fluorescence Spectroscopy

Sajad Doreh[1], Ezeddin Mohajerani[1], Faezeh Talebi Far[1]

[1]Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Email: e-mohajerani@sbu.ac.ir , doreh37@gmail.com

Abstract- the Inner Filter Effect (IFE) was previously considered as an error in fluorescence measurements. In recent years, fluorescence-based evaluation has been developed as an important model for spectroscopic technique evaluation and has found wide applications in the fields of physical, chemical, and biological assays. Correction of the inner filter effect increases measurement accuracy, flexibility, simplicity of results, and fluorescence data analysis. The present review introduces for the first time the state of progress of fluorescent sensor systems based on the internal filter effect, including the sensing strategy, necessary conditions, material selection and their applications. To detect different target analytes including edible oils by fluorescence spectrometry method, it is necessary to check and correct this effect. In addition, in order to have good and acceptable results in fluorescent samples that have high absorption in excitation and emission wavelengths, this effect should be investigated and corrected.

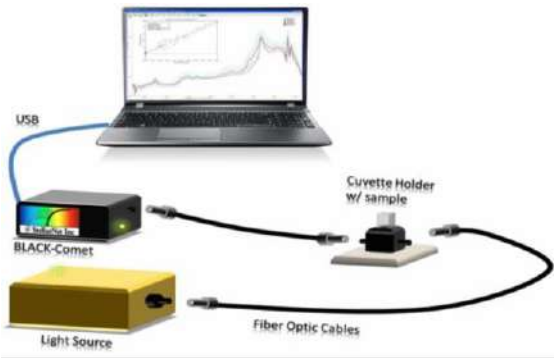
Keywords: Inner Filter Effect, fluorescence, excitation and emission wavelength reabsorption, Beer lambert law

مقدمه:

فلورسانس یک پدیده فیزیکی است که برای اولین بار توسط سر جان هرشل بر روی کینین در سال ۱۸۴۵ توصیف گردید و افزایش طول موج پس از بازتابش از یک ماده فلوروفور اولین بار توسط جرج گابریل استوکس، دانشمند ایرلندی دانشگاه کمبریج کشف شد[۱و۲]. امروزه ، طیف‌سنجی فلورسانس یک ابزار تحقیقاتی و تحلیلی شناخته شده و پرکاربرد در بسیاری از رشته‌ها است. در سال‌های اخیر، رشد قابل توجهی در استفاده از فلورسانس در تجزیه و تحلیل مواد غذایی مشاهده شده است[۳]. این روش طیف‌سنجی قابلیت بدست آوردن اطلاعات تحلیلی ارزشمند برای کاربردهای مختلف در مورد روغن زیتون دارد: تفاوت بین درجه‌های کیفی؛ (ب) تشخیص تقلب؛ (ج) احراز هویت منشأ جغرافیایی؛ (د) تعیین کمیت اجزای فلورسنت؛ (ه) نظارت بر حرارت و اکسیداسیون نور؛ و (ی) ارزیابی تغییرات کیفیت روغن زیتون در طول ذخیره سازی و همچنین یکی دیگر از پارامترهای کیفی مهم، اسیدیته روغن (اسیدهای آزاد موجود در روغن زیتون از نظر اسید اولئیک) است[۴]. کاربرد فلورسانس بر این اساس استوار است که روغن زیتون مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات فلورسنت شامل پلی فنول‌ها، ویتامین‌ها و مشتقات کلروفیل است[۵]. طیف سنجی فلورسانس که می‌تواند به عنوان یک ابزار اصلی برای تجزیه و تحلیل امنیت غذایی شناخته شود و همانطور که ذکر گردید دارای مزایایی است از جمله آن‌ها می‌توان حساسیت بالا ، پاسخ سریع و نیاز به کمترین مقدار نمونه را عنوان کرد. علاوه بر این، یک روش غیرتهاجمی است[۵]. از طرفی برای داشتن داده‌های مناسب در نمونه های جاذب طول موج تحریک و گسیل فلورسانس نیازمند بررسی و تصحیح اثر فیلتر داخلی می‌باشد. در این پژوهش اثر فیلتر داخلی در روغن زیتون را بررسی شد و روش‌های تصحیح این پدیده معرفی میگردد.

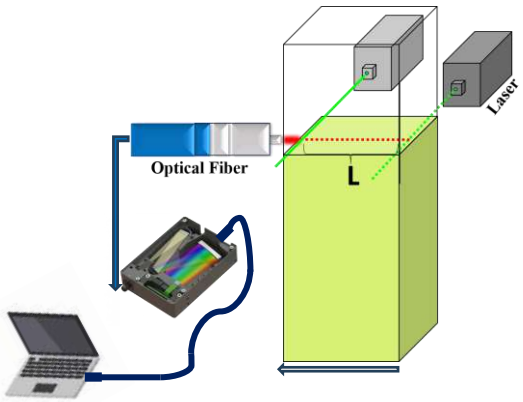
مواد و روش‌ها:

در این پژوهش، یک نمونه روغن زیتون فرابکر از سطح بازار تهیه گردید. از دو روش طیف سنجی جذبی و فلورسانس برای آزمایش‌ها استفاده شد. طیف سنجی جذبی شامل دستگاه اسپکترومتر آوانتس مدل Cl2048ULS با رزولوشن ۵ نانومتر و بازه طیفی ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، منبع نور هالوژن -دوتریوم با بازه طیفی ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، فیبر نوری با گستره عبور نور از طول موج ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ نانومتر، کووت شیشه‌ای استاندارد مطابق شکل ۱ استفاده گردید. روغن زیتون بدون رقیق سازی داخل کووت شیشه‌ای ریخته شد و طیف جذب آن ثبت گردید.



شکل ۱: چیدمان طیف سنجی جذبی

در روش طیف سنجی فلورسانس چیدمان اپتیکی لیزر Nd:YAG، جابجاگر سه محوره، دستگاه اسپکترومتر آوانتس مدل ULS2048Cl ، فیبر نوری برای جمع کردن نور و کووت شیشه‌ای مطابق شکل ۲ استفاده گردید.



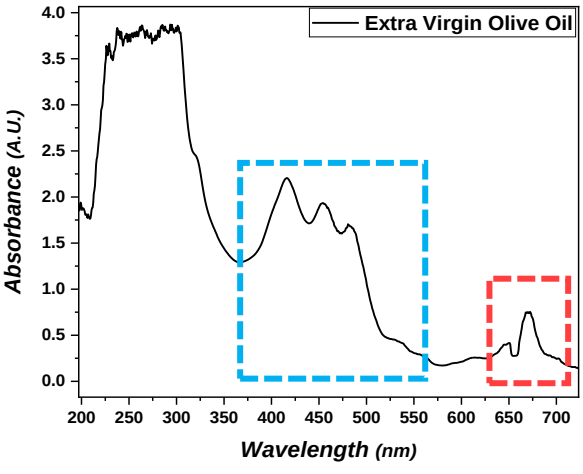
شکل ۲: چیدمان طیف سنجی فلورسانس

آزمایش ۱: شش نمونه با غلظت های مختلف در حلال ایزواکتان با غلظت‌های مشخص آماده شد و طیف فلورسانس این نمونه‌ها ثبت گردید.

آزمایش ۲: برای بررسی اثر فیلتر داخلی روغن زیتون آزمایشی طراحی گردید بدین‌گونه که ۳ سی سی روغن زیتون داخل کووت شیشه‌ای ریخته شد سپس نمونه را در روی جابجاگر سه حالته قرار داده سپس با لیزر Nd:YAG سبز رنگ با طول موج ۵۳۲ نانومتر به نمونه روغن زیتون تابانده شد. اکنون در راستای محور ایکس بصورت ۱ میلی متر لیزر به نمونه تابیده شده و داده آن ثبت گردید. سپس مجددا ۱ میلی متر دورتر و مجددا داده ذخیره شد. این فرایند ۱۰ بار تکرار گردید تا به اندازه ۱۰ میلی متر که سر دیگر کووت شیشه‌ای باشد برسد.

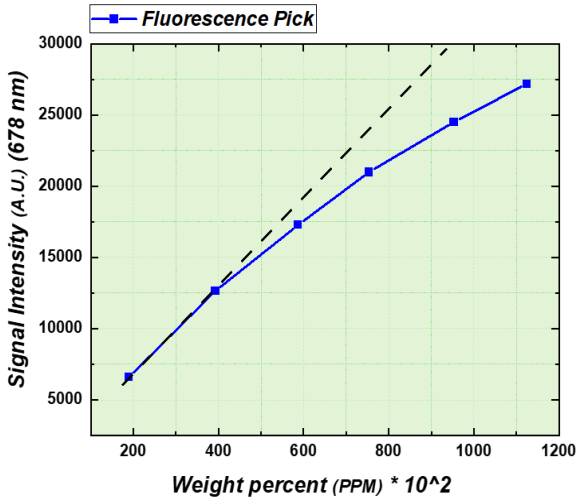
بحث و نتایج:

طیف جذب روغن زیتون بدون رقیق سازی مطابق شکل ۳ می‌باشد. همانطور که مشاهده میگردد، روغن زیتون در محدوده طول موج‌های تحریک بازه ۴۰۰ تا ۵۵۰ نانومتر(کادر آبی) و گسیل ۶۵۰ تا ۸۰۰ نانومتر(کادر قرمز) دارای جذب بالایی بوده که این باعث رخ داد پدیده اثر فیلتر داخلی روغن زیتون می شود.



شکل ۳: طیف جذب روغن زیتون بدون رقیق سازی

شکل ۴ نشان دهنده اثر فیلتر داخلی در فلورسانس رنگینه‌های روغن زیتون می‌باشد. مشخص است که با افزایش غلظت روغن زیتون نمودار از حالت خطی بیرون آمده بدین صورت که شدت فلورسانس با غلظت رابطه خطی ندارند که ناشی از اثر فیلتر داخلی در مورد روغن زیتون می‌باشد. در بازه ۲۰۰ تا ۴۰۰ (ضربدر ۱۰۰) پی پی ام کاملا رابطه خطی مشاهده می‌شود در حالیکه در غلظت بیشتر از ۴۰۰ (ضربدر ۱۰۰) رابطه به غیرخطی تغییر می‌کند.



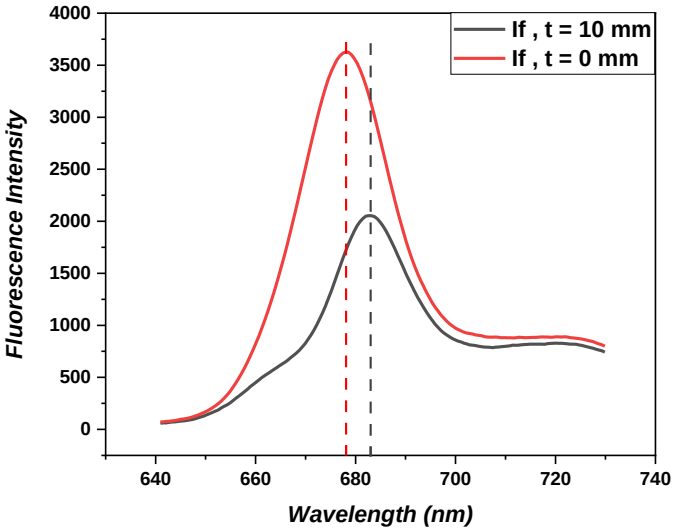
شکل ۴: اثر فیلتر داخلی در شدت فلورسانس رنگینه‌های روغن زیتون

اکنون برای بررسی این پدیده از قانون بیرلامبرت طبق فرمول (۱) استفاده شد که در آن مقادیر طیف فلورسانس را در پارامتر I_0 قرار داده و بجای پارامتر نمایی مقادیر طیف جذب قرار داده شد.

$$I = I_0 e^{-\varepsilon c l} \qquad (۱)$$

سپس با اعمال طیف جذب و فلورسانس در فرمول ذکر شده طیف حالت راه نوری صفر (قرمز رنگ) و پس از ۱۰ میلی متر (مشکی رنگ) راه نوری در روغن زیتون در بازه گسیل ۶۵۰ تا ۸۰۰ نانومتر رسم شد. نتایج نشان دهنده این است که به دلیل اثر بازجذبی در روغن زیتون پس از وجود راه نوری برای ثبت طیف فلورسانس دو پدیده تاثیر گذار یعنی

شیفت طول موج‌های گسیل و افت شدت طول موج‌های گسیل مطابق شکل ۶ کاملا نمایان می‌باشد.



شکل ۶: طیف فلورسانس روغن زیتون با صفر (رنگ قرمز) و ۱۰ میلی متر (رنگ مشکی) راه نوری رقیق سازی

نتیجه گیری:

در این پژوهش اثر فیلتر داخلی روغن زیتون به روش های طیف سنجی جذبی و فلورسانس بررسی گردید. ابتدا طیف جذب روغن زیتون بدون رقیق سازی گرفته شد و مشاهده شد که در بازه طول موج ۴۰۰ تا ۵۵۰ نانومتر و ۶۵۰ تا ۸۰۰ نانومتر جذب داشته که همان نواحی تحریک و انتشار روغن زیتون هستند. سپس ۶ نمونه روغن زیتون با حلال ایزواکتان باغلظت‌های مشخص بازه‌های ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ (ضربدر ۱۰۰) پی پی ام آماده سازی شد و طیف فلورسانس آنها ثبت گردید. که در محدود ۲۰۰ تا ۴۰۰ (ضربدر ۱۰۰) پی پی ام غلطت با شدت فلورسانس رابطه خطی داشت و پس از آن رابطه غیر خطی از خود نشان میدهد. پس از آن ۳ سی سی از نمونه روغن زیتون بدون رقیق سازی داخل کووت شیشه ای ریخته شد و طیف فلورسانس آن از صفر تا ۱۰ میلی متر راه نوری داخل کووت ثبت گردید. داده های طیف فلورسانس در پارامتر شدت و طیف جذب در پارامتر نمایی فرمول بیرلامبرت قرار داده شد. طیف تصحیح شده در صفر و ۱۰ میلی متر راه نوری داخل کووت رسم گردید. همانطور که مشاهده شد تصحیح اثر فیلتر داخلی بسیار مهم بوده زیرا بر پارامترهای اصلی طیف تاثیر گذاشته و باعث شیفت طول موج‌های گسیل و افت شدت گسیل طول موج‌های گسیل نمونه می شود.

مرجع‌ها:

Chen, Shuai, Yong-Liang Yu, and Jian-Hua Wang. "Inner filter effect-based fluorescent sensing systems: A review." *Analytica chimica acta* 999 (2018): 13-26.

Lakowicz, J.R., *Principles of fluorescence spectroscopy*. 2006: Springer.

Sikorska, E., I. Khmelinskii ,and M. Sikorski, *Analysis of olive oils by fluorescence spectroscopy: methods and applications.* Olive oil-constituents, quality, health properties and bioconversions, 2012: p. 63-88.

Zandomeneghi, M., L. Carbonaro, and C. Caffarata, *Fluorescence of vegetable oils: olive oils.* Journal of agricultural and food chemistry, 2005. **53**(3): p. 759-766.

Khosroshahi, M.E., Effect of temperature on optical properties of vegetable oils using UV-Vis and laser fluorescence spectroscopy. Optics and photonics journal, 2018. **8**(7): p. 247-263.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

مطالعه خواص اپتیکی نانوذرات آلومینیوم تهیه شده به روش کندوسوز لیزر پالسی

رویا، علیزاده قلقاچی [1*]، اکبر، جعفری[1]، مریم، مطلبی آقگنبد[1]

[1] دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه فیزیک

royaalizadeh.ph95@gmail.com, a.jafari@urmia.ac.ir, m.motallebi89@gmail.com

چکیده- در این تحقیق برای تهیه نانوذرات آلومینیوم از روش کندوسوز لیزری با بکارگیری لیزر پالسی نئودمیوم با طول موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شده است. تهیه نانوذرات در توان‌های لیزر متفاوت انجام گرفته و تاثیر توان لیزر بر روی خواص اپتیکی نانوذرات آلومینیوم تهیه شده مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های تهیه شده با استفاده از روش پوشش دهی دورانی بر روی زیر لایه شیشه لایه نشانی شدند. از روش بیضی سنجی برای بدست آوردن خواص اپتیکی نانوذرات از جمله ضریب شکست، ضریب خاموشی، بخش حقیقی و موهومی تابع دی الکتریک و ضریب جذب استفاده شده است. همچنین گاف نواری انرژی نمونه‌ها با استفاده از رابطه تاک محاسبه شده است.

کلیدواژه- اسپکتروسکوپی الیپسومتری، خواص اپتیکی، کندوسوز لیزری، نانوذرات آلومینیوم

Studying the optical properties of aluminum nanoparticles prepared by pulsed laser ablation method

Roya Alizadeh Ghalghachi[1], Akbar Jafari[1] , and Maryam Motallebi Aghgonbad[1]

[1] Urmia University- Faculty of Science- Departmant of Physics

royaalizadeh.ph95@gmail.com, a.jafari@urmia.ac.ir, m.motallebi89@gmail.com

Abstract-In this research, laser ablation method was used to prepare aluminum nanoparticles by applaying Nd:YAG pulsed laser with 532 nm wavelength. Nanoparticles preparation was done in different laser powers and the effect of laser power on the optical properties of aluminum nanoparticles was studied. The prepared samples were deposited on glass substrates using spin coating method. The spectroscopic ellipsometry method was used to calculate the optical properties of nanoparticles such as refractive index, extinction coefficient, the real and imaginary part of dielectric function and absorption coefficient. Also, the energy band gap of the samples was calculated using Tauk relation.

Keywords: Aluminum nanoparticles, Ellipsometric Spectroscopy, Laser ablation, Optical properties

۱-مقدمه

آلومینیوم خالص نرم، سبک و به رنگ نقره‌ای مات و فلزی غیرمغناطیسی می‌باشد. خواص فیزیکی و شیمیایی آلومینیوم به ویژه پودر آن به اندازه ای مطلوب است که در کاربردهای مختلفی مانند قطعات متالوژی، خودروها و هواپیماها و... استفاده می‌شود[۱] . طبق تعریف موسسه ملی نانوفناوری آمریکا یک نانوذره، ذره‌ای است که ابعاد آن در حدود ۱۰۰-۱ نانومتر می‌باشد. نانوذرات میتوانند به اشکال مختلف مانند فلزات، اکسیدهای فلزی، نیمه هادی‌ها و.. .وجود داشته باشند[۲]. خواص اپتیکی نانوذرات فلزی به عوامل متعددی که مهم‌ترین آن‌ها شکل و اندازه نانوذرات هستند، وابسته است[۳]. روش سنتز تاثیر زیادی بر اندازه و شکل نانوذرات دارد، روش کندوسوز لیزری یکی از روش های سنتز نانوذرات می‌باشد. این روش کاربردهای بسیاری از جمله تولید نانوذرات، لایه نشانی، آنالیز مواد و... دارد. آلتویرقی و همکاران در سال ۲۰۲۰خصوصیات اپتیکی نانو ذرات آلومینیوم را با استفاده از روش کندوسوز لیزری مورد بررسی قرار دادند. امروزه کندوسوز لیزری به عنوان روشی برای برداشتن ماده از بخشی از هدف جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که ماده در معرض تابش شدید لیزر قرار می‌گیرد تجزیه می‌شود. چگالی توان و آستانه این برهمکنش $10^7 - 10^8\ {}^{W}/_{cm^2}$ است که با تپ های پرقدرت لیزر های نانو ثانیه رخ می‌دهد. پدیده کندوسوز لیزری در شرایط محیطی متفاوت مانند خلاء، هوا، آب، الکل و یا محیط‌های سیال دیگر می‌تواند رخ دهد[۱] . در صورت استفاده از محیط مایع نیازی به استفاده از سیستم خلاء نیست از این رو نسبت به کندوسوز در خلاء سریع‌تر و ارزان‌تر است. فرایند تشکیل نانوذرات علاوه بر نوع ماده هدف، چگالی توان و طول موج لیزر به نوع مایع محیط کندوسوز بستگی دارد. تئوری آنالیز الیپسومتری بر پایه تغییر در حالت قطبش نور در زمانی است که نور از نمونه بازتاب و یا از آن عبور می‌کند. در این حالت بعد از بازتاب یا عبور از نمونه، نور بسته به ضخامت و شاخص شکست لایه قطبیده می‌شود. از طیف الیپسومتری نمونه‌ها میتوان ثابت‌های اپتیکی و خصوصیات اپتیکی لایه‌ها را به دست آورد[۴].

۲-مواد و روش‌ها

در این کار نانو ذرات آلومینیوم در محیط آب دیونیزه شده و با استفاده از لیزر پالسی نئودمیوم با توان‌های لیزر متفاوت۰/۴۰۸ و ۰/۴۲۲ وات تهیه شدند. برای این منظور از لیزر پالسی Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ nm، انرژی پالس ۸۵ mj که پهنای زمانی هر پالس ۴ ns بود استفاده شد. در این کار باریکه ی لیزر به وسیله یک عدسی با فاصله کانونی ۵ cm روی سطح فلز آلومینیوم که به عنوان هدف به کار رفته تابانده شد. فرایند کندوسوز پالسی در ۳ میلی لیتر محلول آب دیونیزه شده انجام شده و از سدیم سیترات به‌عنوان تثبیت کننده استفاده شد. از روش تفرق نور پویا برای اندازه گیری سایز نانوذرات تهیه شده استفاده کردیم. برای اندازه‌گیری خصوصیات اپتیکی نانوذرات، نمونه‌های تهیه شده با روش پوشش دهی دورانی با زیر لایه شیشه انباشت شدند و خصوصیات اپتیکی نانو لایه‌های آلومینیوم از جمله ضریب شکست، ضریب خاموشی، بخش حقیقی و بخش موهومی تابع دی‌الکتریک، ضریب جذب به روش اسپکتروسکوپی الیپسومتری بررسی شد، همچنین گاف‌نواری انرژی نمونه‌ها با استفاده از رابطه تاک محاسبه شد.

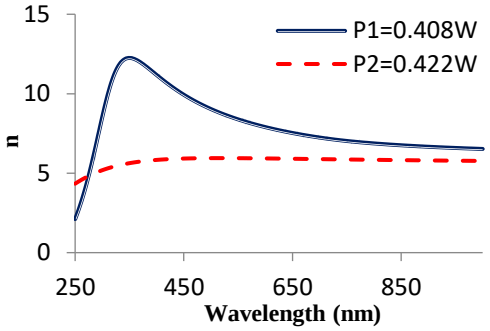
۳-نتایج و بحث

در این مقاله نانوذرات آلومینیوم با توان های لیزر متفاوت ۰/۴۰۸ و ۰/۴۲۲ وات به روش کندوسوز لیزری تهیه شدند. نمونه‌های تهیه شده بر روی زیرلایه شیشه با پوشش‌دهی دورانی انباشت شدند. در روش اسپکتروسکوپی الیپسومتری دو پارامتر (ψ, Δ) که به ترتیب نشانگر نسبت دامنه و اختلاف فاز قطبش های P و S نور هستند اندازه گیری می‌شود. رابطه بین (ψ, Δ) به شکل زیر است :

$$\rho \equiv tan\psi \exp(i\Delta) \equiv \frac{r_p}{r_s} \qquad (1)$$

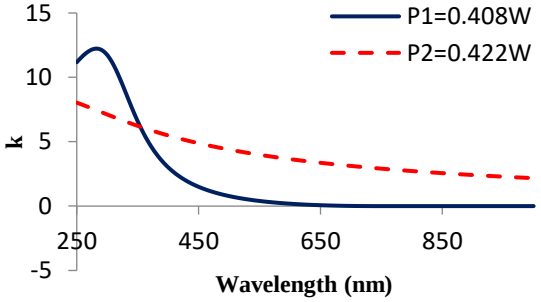
در رابطه (1) r_p و r_s به ترتیب دامنه ضرایب بازتاب قطبی P و S می‌باشند. پس از به دست آوردن (ψ, Δ) تجربی، برای اندازه‌گیری خواص اپتیکی نیاز به طراحی یک مدل اپتیکی می‌باشد که در این پژوهش مدل اپتیکی شامل زیرلایه، لایه

سطح مشترک، لایه نازک، لایه زمختی سطح و هوا در نظر گرفته شده است. نتایج به شرح زیر می‌باشد: در این مقاله نمونه‌ها با توان‌های لیزر ۰/۴۰۸ و ۰/۴۲۲ وات به ترتیب نمونه ۱ و نمونه ۲ نامیده ایم.



شکل ۱ : ضریب شکست نانوذرات آلومینیوم با توان‌های لیزر مختلف

در شکل ۱ ضریب شکست (n) نانوذرات آلومینیوم با توان‌های لیزر متفاوت مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است، ضریب شکست نمونه ۱ در تمام بازه های طول موج مرئی بیشتر از ضریب شکست نمونه ۲ می‌باشد. از طرفی مقدار ضریب شکست نمونه ۲ در محدوده طول موج مرئی تقریبا ثابت است اما در نمونه ۱ در طول موج ۳۵۰ nm یک پیک پهن قابل مشاهده است. در نمونه‌ی تهیه شده با توان لیزر۰/۴۲۲ وات ثابت بودن مقدار ضریب شکست در بازه‌ی وسیعی از طول موج نشان از ثبات اپتیکی نمونه تهیه شده دارد.

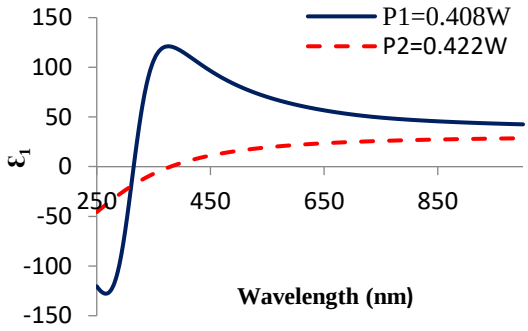


شکل ۲ : ضریب خاموشی نانوذرات آلومینیوم با توان‌های لیزر مختلف

بخش موهومی ضریب شکست یا ضریب خاموشی (k) در شکل ۲ به نمایش در آمده است. در هردو نمونه تهیه شده در این مقاله با افزایش طول موج شاهد کاهش ضریب خاموشی هستیم. در نمونه۱ این کاهش به صورت تیز و ناگهانی بوده اما در نمونه ۲ روند کاهشی نمودار تدریجی است. به محدوده‌ای که ضریب خاموشی کاهش می‌یابد محدوده جذب گفته می‌شود. همچنین در نمونه ۱ پس از حدود طول موج ۶۰۰ nm تقریبا مقدار ضریب خاموشی صفر شده است که نشان‌دهنده شفافیت بالای این نمونه در محدوده بیان شده است. در بازه طول موج مرئی نمونه ۲ ضریب خاموشی و در نتیجه جذب بیشتری نسبت به نمونه ۱ از خود نشان داده است. برای محاسبه بخش حقیقی و موهومی تابع دی الکتریک $(\varepsilon_1$ و $\varepsilon_2)$ از روابط زیر استفاده شده است:

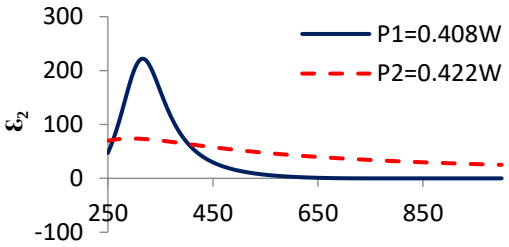
$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \qquad (2)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \qquad (3)$$



شکل ۳: بخش حقیقی دی‌الکتریک نانوذراتAl با توان‌های مختلف

در شکل ۳ بخش حقیقی تابع دی الکتریک (ε_1) نمونه‌ها به نمایش درآمده است.در هر دو نمونه در طول‌موج‌های پایین شاهد مقادیر منفی بخش حقیقی دی الکتریک هستیم. در محدوده‌ای که $\varepsilon_1 < 0$ باشد ماده خاصیت رسانایی از خود نشان داده و در محدوده‌ای که $\varepsilon_1 > 0$ است ماده دارای خاصیت دی‌الکتریک می‌باشد. فرکانس مربوط به طول‌موج خاص که $\varepsilon_1 = 0$ است فرکانس پلاسما نامیده می‌شود. نمونه ۱ و ۲ به ترتیب در طول موج های ۳۱۵ nm و ۳۷۵nm مقادیر $\varepsilon_1 = 0$ دارند. در تمام محدوده طول موج مرئی مقدار ε_1 نمونه ۱ از نمونه ۲ بیشتر می‌باشد. نمونه ۱ در محدوده طول موج کمتر از ۳۱۵ نانومتر و نمونه ۲ در محدوده طول موج ۳۷۵ نانومتر از خود خاصیت رسانندگی نشان داده اند و در بازه های طول موج بالاتر از آنچه اشاره شد خاصیت دی الکتریک داشته اند. بخش موهومی تابع دی‌الکتریک (ε_2) در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

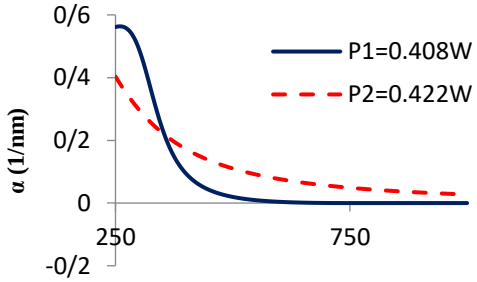


شکل ۴: بخش موهومی دی‌الکتریک نانوذرات Al با توان‌های لیزر مختلف

در نمونه ۱ یک پیک تیز و بلند در طول‌موج حدود nm ۳۲۰ مشاهده می‌شود که پیک جذب نامیده می‌شود. این پیک در نمونه ۲ بسیار پهن و کوتاه است. با مقایسه بخش حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک مشاهده می‌شود که در نمونه ۱ در تمام محدوده طول موج مرئی ε_1 مقدار بیشتری نسبت به ε_2 دارد که نشانگر پایین بودن اتلاف انرژی این نمونه در محدوده مورد نظر می‌باشد. برای بدست آوردن گاف نواری انرژی نمونه‌ها ابتدا ضریب جذب نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر به‌دست آمد:

$$\alpha = \frac{\varepsilon\pi k}{\lambda} \qquad (4)$$

که k ضریب خاموشی و λ طول موج نور فرودی است.

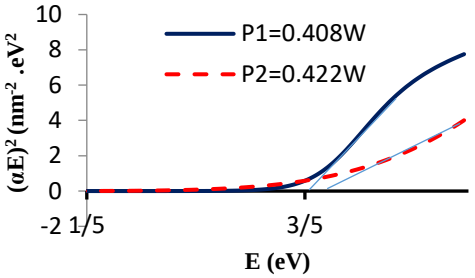


شکل ۵ : ضریب جذب نانوذرات آلومینیوم با توان‌های لیزر مختلف

همانطور که از شکل ۵ پیداست در محدوده طول موج مرئی نمونه ۲ ضریب جذب بیشتری نسبت به نمونه ۱ دارد. در شکل ۶ نمودار $(\alpha E)^2$ بر حسب انرژی رسم شده است با استفاده از رابطه‌تاک میتوان گاف نواری انرژی نمونه‌ها را به‌دست آورد:

$$\alpha E = A(E - E_g)^n \qquad (5)$$

در رابطه بالا α ضریب جذب، E انرژی فوتون و A یک ثابت است. برای نمونه‌های با گاف انرژی‌مستقیم $n = \frac{1}{2}$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار گاف‌نواری انرژی برای نمونه ۱ ونمونه ۲ به ترتیب مقادیر ۳/۵ و ۳/۷۵ الکترون ولت به دست آمده است. همانطور که از نتایج پیداست با افزایش توان لیزر گاف نواری انرژی نمونه نیز افزایش یافته است.



شکل ۶ : $(\alpha E)^2$ بر حسب E نانوذرات Al با توان‌های لیزر مختلف

نتیجه گیری

در این مقاله فرایند کندوسوز لیزری از سطح فلز آلومینیوم مورد مطالعه قرار گرفت. طی این فرایند نانوذرات با ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر تهیه شد. خواص اپتیکی نانو ذرات تولید شده به روش اسپکتروسکوپی الیپسو متری بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش طول موج ضریب خاموشی در هر دو نمونه کاهش پیدا می‌کند .همچنین با مقایسه ε_1 و ε_2 در نمونه ۱ مشاهده می‌شود که ε_1 مقدار بیشتری نسبت به ε_2 دارد که نشان دهنده پایین بودن اتلاف انرژی در آن محدوده است. گاف نواری انرژی برای هر دو نمونه محاسبه شد که به ترتیب مقادیر ۳/۵ و ۳/۷۵ الکترون ولت می‌باشد.

مرجع‌ها

[1]. *Tan, M. I. S. M. H., Omar, A. F., Rashid, M., & Hashim, U. (2019). VIS-NIR spectral and particles distribution of Au, Ag, Cu, Al and Ni nanoparticles synthesized in distilled water using laser ablation. Results in Physics, 14, 102497.*

[2]. *Baladi, A., & Mamoory, R. S. (2010). Investigation of different liquid media and ablation times on pulsed laser ablation synthesis of aluminum nanoparticles. Applied Surface Science, 256(24), 7559-7564.*

[۳]. رضا متفرقه تیلکی، اعظم ایرجی زاد، سیدمحمد مهدوی. ۱۳۸۶. ساخت نانوذرات طلا، نقره و مس به روش کندوسوز لیزر پالسی. دومین همایش دانشجویی فناوری نانو

[۴]. مریم مطلبی اقگنبد، حسن صدقی. ۱۳۹۵. محاسبه خواص اپتیکی لایه های نازک اکسید روی به دو روش مختلف اسپکتروسکوپی الیپسومتری وکرامرز- کرونیگ . چهارمین همایش ملی شیمی،پتروشیمی و نانو ایران

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

طراحی گیت منطقی NOT با استفاده از تشدیدکننده میکروحلقه Si3N4

یحیی نگین تاجی، محسن حاتمی

دانشگاه صنعتی شیراز،دانشکده فیزیک،گروه فوتونیک،شیراز،ایران

y.negintaji@sutech.ac.ir, hatami@sutech.ac.ir

چکیده – تشـدیدکننده میکروحلقه یک میکرودسـتگاه اسـت که به کمک آن می توان انواع گیت های منطقی نوری، پردازنده های منطقی، واحدهای حسابی و غیره را طراحی و به راحتی در شبکه ارتباطی پرسرعت مدرن ادغام کرد. این مقاله یک رویکرد نوین را به طراحی و پیاده‌سازی گیت منطقی NOT با استفاده از خاصیت غیرخطی تشدید کننده‌های میکروحلقه و همچنین مزایای بی نظیر ماده Si3N4 برای کاربردهای محاسباتی تمام نوری ارائه می‌کند. گیت طراحی شده نوری با نتایج شبیه سازی شده حاصل از بررسی معادلات توان های ورودی به تشـدید کننده میکروحلقه در نرم افزار متلب و طراحی یک میکروتشـدید کننده سـیلیکون نیترید بر پایه پلتفرم سیلیکون دی اکسید در نرم افزار لومریکال تایید شده است.

کلید واژه- گیت های منطقی نوری، تشدیدکننده میکروحلقه، پردازنده نوری، گیت NOT، سیلیکون نیترید

Design of NOT logic gate using Si3N4 microring resonator

Yahya Negintahi, Mohsen Hatami

Shiraz University of Technology, Faculty of Physics,Photonics Group, Shiraz, Iran

y.negintaji@sutech.ac.ir, hatami@sutech.ac.ir

Abstract- The micro-ring resonator is a micro-device that can be used to design all kinds of optical logic gates, logic processors, arithmetic units, etc. and easily integrate them into the modern high-speed communication network. This paper presents a novel approach to NOT logic gate design and implementation using the nonlinear property of microloop resonators as well as the unique advantages of Si3N4 material for all-optical computing applications. The optically designed gate has been confirmed with the simulated results obtained from checking the input power equations to the micro-ring resonator in MATLAB software and the design of a silicon nitride micro-amplifier based on the silicon dioxide platform in Lumerical software.

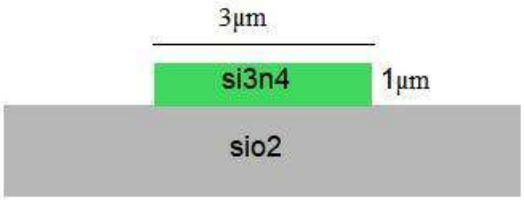
Keywords: Optical Logic Gates, Micro Ring Resonator, Optical processor, NOT gate, Si3N4

۱.مقدمه

تقاضا برای سیستم‌های محاسباتی با سرعت بالا و کارآمد منجر به کشف دروازه‌های منطقی تمام نوری مبتنی بر فناوری‌های فوتونیک شده است. در این زمینه، تشدید کننده‌های میکروحلقه سیلیکون نیترید(*Si3N4*) به دلیل فشرده‌بودن، مقیاس‌پذیری و سرعت بالای عملکرد ، به عنوان گزینه ای امیدوارکننده برای پیاده‌سازی گیت‌های منطقی تمام نوری ظاهر شده‌اند. طراحی دروازه پیشنهادی *NOT* از ویژگی‌های منحصربه‌فرد تشدیدکننده‌های میکروحلقه *Si3N4* برای دستیابی به فشرده‌بودن، مقیاس‌پذیری و برگشت‌پذیری استفاده می‌کند[۱]. از طرفی مواد سیلیکون نیترید به دلیل مزایای بی نظیری از جمله: ضریب شکست بالا که موجب حفظ و مدیریت بهینه نور در داخل ساختار رزوناتور حلقه‌ای و تلفات نوری کم که به حفظ تمامیت سیگنال و همچنین موارد دیگری از جمله پایداری حرارتی، ابعاد فشرده و قابلیت تنظیم الکترونیکی، تشدید کننده های ریز حلقه *Si3N4* را برای توسعه مدارهای مجتمع فوتونیک با سرعت و عملکرد بالا مناسب می سازد. این کار به پیشرفت محاسبات فوتونیک و فناوری‌های پردازش اطلاعات کمک می‌کند[۲]. تشدید کننده های میکروحلقه ساخته شده از *Si3N4* می توانند از اثر نوری غیرخطی کر*(Kerr)* به دلیل شکاف باند بزرگ مواد استفاده کنند و منجر به تغییر در ضریب شکست ماده در پاسخ به نور شدید شوند[۳]. یک گیت نوری *NOT* یک سیگنال نوری را معکوس می‌کند و اجرای آن متکی بر اثرات نوری غیرخطی و مواد خاصی است که به شدت نور پاسخ می‌دهند.گیت های منطقی نوری، از جمله گیت های *NOT*، مزایایی مانند عملکرد با سرعت بالا، پتانسیل پردازش موازی و کاهش تولید گرما را در مقایسه با مدارهای الکترونیکی سنتی ارائه می دهند[۴].

۲.تئوری و شبیه سازی

ما شبیه سازی مان را بر روی یک رزوناتور میکروحلقه از جنس *Si3N4* که بر روی سطح زیرلایه ی *SiO2* واقع شده انجام دادیم. ساختار کلی این پلتفرم در شکل۱ نشان داده شده است، ابعاد موجبر به طول *۳μm* و عرض *۱ μm* و سطح مقطع موثر حلقه *S=450 × 250 nm* بر روی سطح زیرلایه واقع شده است.

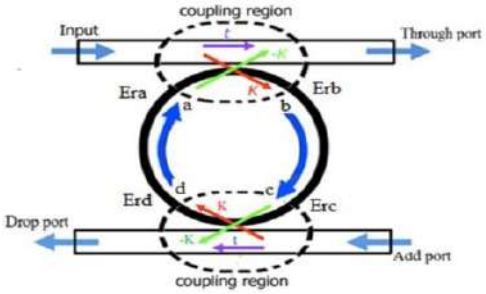


شکل۱: ساختار کلی رزوناتور میکرو حلقه *Si3N4* بر روی سطح زیرلایه *SiO2*

ساختار میکروحلقه متشکل از یک حلقه به شعاع *R= 3.05 μm* که با دو موجبر ورودی و خروجی کوپل شده است. موجبر کوپل شده دو درگاه ورودی می سازد که به آنها پورت ورودی(*Input Port*) و پورت افزودن(*Add Port*) و همچنین دو درگاه خروجی می سازد که از طریق *Throuth Port* و *Drop Port* فراخوانی می شوند. هنگامی که سیگنال از طریق موجبر ورودی تزریق می شود، بخشی از سیگنال تزریق شده به حلقه منتقل می شود. حال اگر طول مسیر نوری طی شده توسط سیگنال انتقال یافته در میکرو حلقه، برای یک دور مضرب عدد صحیحی از طول موج سیگنال ورودی باشد، رزونانس رخ می دهد [۴]. اگر "*R*" شعاع میکرو حلقه باشد آنگاه رزونانس طول موج را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\lambda_{resonance} = \frac{2\pi R}{m} n_{eff}$$

ساختار کلی میکروحلقه به همراه موجبرهای کوپل شده به طور واضح در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲: ساختار کلی میکروحلقه به همراه موجبرهای کوپل شده و درگاه های ورودی و خروجی

در این طرح پیشنهادی، میکروحلقه به عنوان یک گیت *NOT* نوری عمل میکند و برای این منظور با استفاده از خواص غیرخطی ماده سیلیکون نیترید طراحی شده است. در مورد مواد غیرخطی، ضریب شکست غیرخطی به صورت زیر بیان می شود:

$$n_{eff} = n_0 + n_2 I = n_0 + \left(\frac{n_2}{A_{eff}}\right) P$$

که در آن n_0 نشان دهنده بخش خطی و n_2 نشان دهنده بخش غیر خطی است. در اینجا "I" نشان دهنده شدت نوری و "P" نشان دهنده توان میدان نوری است.میدان های ورودی به حلقه که از ورودی های *Input* و *Add Port* داخل می شوند به ترتیب بامعادلات E_t, E_d در ادامه نمایش داده می شوند.

$$E_t = \frac{\sqrt{1-\kappa_1} - \sqrt{1-\kappa_2}exp\,(-\alpha L)exp^2\,(j\phi)}{1-\sqrt{1-\kappa_1}\sqrt{1-\kappa_2}exp\,(-\alpha L)exp^2\,(j\phi)} E_{i1} + \frac{-\sqrt{\kappa_1}\sqrt{\kappa_2}exp\left(-\alpha\frac{L}{2}\right)exp\,(j\phi)}{1-\sqrt{1-\kappa_1}\sqrt{1-\kappa_2}exp\,(-\alpha L)exp^2\,(j\phi)} E_{i2}$$

$$E_d = \frac{-\sqrt{\kappa_1}\sqrt{\kappa_2}exp\left(-\alpha\frac{L}{2}\right)exp\,(j\phi)}{1-\sqrt{1-\kappa_1}\sqrt{1-\kappa_2}exp\,(-\alpha L)exp^2\,(j\phi)} E_{i1} + \frac{\sqrt{1-\kappa_2} - \sqrt{1-\kappa_1}exp\,(-\alpha L)exp^2\,(j\phi)}{1-\sqrt{1-\kappa_1}\sqrt{1-\kappa_2}exp\,(-\alpha L)exp^2\,(j\phi)} E_{i2}$$

هر دو موجبر احاطه کننده میکرو حلقه از جنس سیلیکون نیترید هستند که در ادامه با محاسبه توان حاصل از میدان های ورودی که طبق شبیه سازی حاصل از برنامه متلب نوشته شده با شرایط اینکه مشخصات میدان ورودی(*Input*) شامل طول موج $\lambda_i = 1550\,nm$ و سطح مقطع موثر $s=1.63\times10^{-12}$ و ضریب شکست موثر $n_{eff}=2.783$ و همچنین مشخصات میدان تقویتی(*Add Port*) شامل طول موج $\lambda_p = 400\,nm$ و سطح مقطع موثر $s=1.41\times10^{-12}$ و همچنین ضریب شکست موثرسیلیکون نیترید $n_{eff}=2.863$ می باشند. ضریب شکست خطی و غیرخطی ماده سیلیکون نیترید به ترتیب $n0 = 1.98$ و $n_2 = 2.5\times10^{-15}cm^2W^{-1}$ می باشد. پس از کدنویسی معادلات میدان ها و شبیه سازی حاصل از آن نمودارهای پورتهای ورودی و خروجی بدست می آید و ملاحضه میگردد که هر کدام از ورودی ها عکس همدیگر و همانند یک گیت *NOT* عمل میکنند. وقتی نور با طول موج رزونانسی وارد حلقه می‌شود، به دلیل اندازه‌گیری ساختار حلقه، انرژی نور در حلقه به‌طور مکرر تقویت می‌شود و در نهایت به عنوان خروجی تولید می‌شود. با تنظیم طول موج ورودی به طور مناسب، می‌توان خروجی را به‌طور معکوسی نسبت به ورودی تولید کرد، که این وظیفه را مشابه یک گیت نوری نات (*NOT*) انجام می‌دهد. این روش امکان ایجاد گیت‌های نوری ساده و پیچیده‌تر را فراهم می‌کند و نشان از قابلیت‌های بالقوه میکروحلقه‌های رزوناتوری نوری برای پیاده‌سازی منطق نوری دارد.

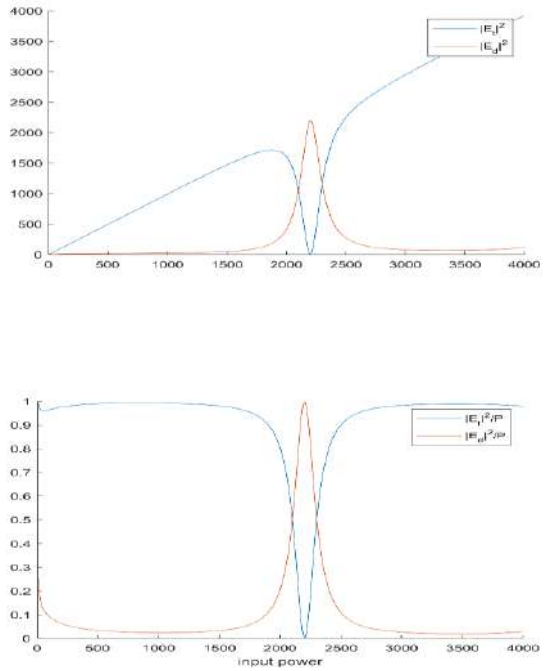


A	Q
0	1
1	0

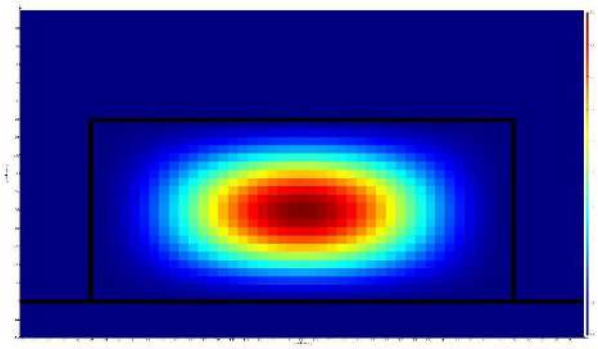
شکل۳: شماتیک ساده از نحوه عملکرد گیت *NOT*

نمودارهای حاصل از شبیه سازی با نرم افزار متلب در شکل های ۴ و ۵ آورده شده است و در ادامه با شبیه سلزی حاصل از نرم افزار لومریکال پاسخ خود را مورد صحت سنجی قرار

دادیم و مشاهده کردیم که با توجه نحوه شبیه سازی مد انتشاری در داخل میکرورزوناتور بر پایه سیلیکون نیترید کاملا مشابه یک گیت منطقی *NOT* عمل میکند(شکل۶)



شکل ۴ و ۵: شبیه سازی های حاصل از توان میدان های ورودی



شکل۶: شبیه سازی حاصل از نرم افزار لومریکال

نتیجه‌گیری

استفاده از نرم افزار لومریکال به عنوان ابزار شبیه سازی و حل معادلات مورد نظر به ما این امکان را داد که از پاسخ بدست آمده برای ضریب شکست اطمینان کامل را داشته باشیم. در نهایت به این نتیجه رسیدیم که یک میکروحلقه از جنس سیلیکون نیترید می‌تواند به عنوان یک گیت نوری نات *(NOT)* عمل کند. به عبارت دیگر، اگر ورودی صحیح باشد، خروجی آن غلط خواهد بود و برعکس. با تنظیم طول موج ورودی به طور مناسب، می‌توان خروجی را به‌طور معکوسی نسبت به ورودی تولید کرد، که این وظیفه را مشابه یک گیت نوری نات *(NOT)* انجام می‌دهد.

مرجع‌ها

[1] D. Mandal, “Design of Optically Controlled Reversible NOT Gate Using Micro Ring Resonators,” *Journal of physics* vol. 2426, no. 1, pp. 012003–012003, Feb. 2023

[2] A. Fushimi and T. Tanabe, “All-optical logic gate operating with single wavelength,” *Optics Express*, vol. 22, no. 4, p. 4466, Feb. 2014

[3] G. K. Bharti and J. K. Rakshit, “Micro-ring resonator based all optical reversible logic gates and its applications,” vol. 13, p. 10, Jan. 2019.

[4] A. Godbole, Prathmesh Pravin Dali, Vijay Janyani, T. Tanabe, and G. Singh, “All Optical Scalable Logic Gates Using Si_3N_4 Microring Resonators,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 326–333, Nov. 2016

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

افزایش کیفیت تصاویر فازی با استفاده از یادگیری عمیق

فاطمه فلاحی، زهرا فلاحی، محمدرضا جعفرفرد، بابک زارع

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

f_fallahi73@physics.iust.ac.ir , z_fallahi73@physics.iust.ac.ir

mrjafarfard@iust.ac.ir , bzarer@iust.ac.ir

چکیده - با فوکوس کردن در تصویربرداری، می‌توانیم فاصله کانونی عدسی لنز دوربین را بر اساس فاصله‌ای که جسم تا دوربین دارد، برای داشتن یک تصویر واضح تنظیم کنیم. در این مقاله به بررسی فوکوس در تصاویر و استفاده از روش یادگیری عمیق برای رفع اعوجاج فوکوس می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد شبکه عصبی کانولوشنی پس از فرآیند یادگیری، قادر خواهد بود که با دقت بسیار بالایی اعوجاج فوکوس را در تصاویربرطرف کند، که نشان دهنده کارایی شبکه در تشخیص و تصحیح اعوجاج فوکوس است و از روش‌های مرسوم با محدودیت‌هایی در استخراج خودکار ویژگی‌ها و دسترسی به مجموعه داده‌های با ابعاد بزرگ پیشی می‌گیرد.

کلید واژه- تمرکز، پراش فرنل، شبکه عصبی کانولوشن، یادگیری عمیق.

Enhancing the quality of phase images using deep learning

Fatemeh Fallahi, Zahra Fallahi, Mohammadreza Jafarfard, Babak Zare

Physics Department, Iran University of Science and Technology

Abstract- By focusing in photography, we can adjust the focal length of the camera lens based on the distance from the object to the camera to get a sharp image. In this article, we will examine focus in images and use deep learning method to fix focus distortion. The results show that the convolutional neural network, after the learning process, will be able to correct the focus distortion in the images with high accuracy, which shows the efficiency of the network in detecting and correcting the focus distortion, and is different from conventional methods with limitations in automatic feature extraction and access. It outperforms large-dimensional datasets.

Keywords: Focus, Fresnel Diffraction, Convolution Neural Network, Deep Learning.

مقدمه

بسته به نوع طراحی، لنز از یک یا چند عنصر تشکیل شده که هم عناصر همگرا در آن وجود دارند و هم واگرا، تا بتوانند نور را روی سطح حساس به نور (سنسور) متمرکز کنند. اگر نور در نقطه‌ای قبل و یا بعد از سنسور همگرا شود تصویری خارج از فوکوس ایجاد می‌شود و در نهایت تصویری تار و مبهم خواهیم داشت [۱]. در حوزه پردازش تصویر، پرداختن به اعوجاج فوکوس یک جنبه مهم برای افزایش کیفیت بصری تصاویر است. در این مقاله از بین همه روش‌های موجود برای رفع تاری و فوکوس مجدد [۲]، از روش مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده کرده‌ایم. یکی از جدیدترین موضوعات در بحث تصویربرداری، استفاده از هوش مصنوعی در ارتقاء کیفیت تصاویر با کیفیت پایینی است که توسط دوربین‌ها ثبت شده است.

در فیزیک، اصطلاح "فاز" به موقعیت یک نقطه در زمان (یا در یک چرخه موج) نسبت به یک نقطه مرجع اشاره دارد. در زمینه تصاویر، به‌ویژه در زمینه اپتیک، منظور از تصویر فازی، تصویری است که اطلاعاتی در مورد فاز نور در هر نقطه از تصویر ارائه می‌دهد. این اطلاعات برای درک و تجسم پدیده‌های نوری ارزشمند است و اغلب در تکنیک‌های مختلف تصویربرداری و کاربردهای میکروسکوپی استفاده می‌شود [۳].

هدف از این مقاله، استفاده از روش یادگیری عمیق برای تشخیص و رفع اعوجاج فوکوس در تصاویر فازی است. برای این منظور، مجموعه داده‌ای شامل تصاویر دایره تولید، سپس تصاویر تولیدی دچار اعوجاج فوکوس شده‌اند. و از مجموعه داده برای آموزش شبکه عصبی برای اصلاح اعوجاج فوکوس استفاده می‌شود.

پراش فرنل پدیده‌ای است که هنگام برخورد نور با مانع یا روزنه اتفاق می‌افتد. در زمینه فوکوس و تاری تصویر، پراش فرنل می‌تواند نقش داشته باشد، به‌ویژه هنگام برخورد با موقعیت‌هایی که نور از دیافراگم‌های کوچک عبور می‌کند یا با موانع روبرو می‌شود .حتی اگر یک لنز با فوکوس کامل داشته باشیم، وقتی نور از یک دیافراگم کوچک عبور می‌کند، پخش می‌شود و بر فوکوس تصویر تأثیر می‌گذارد. استفاده از الگوهای پراش فرنل در پردازش تصویر به ما این امکان را می‌دهد که رفتار نور را در تعامل با اجزای نوری درک کنیم. به همین دلیل برای ایجاد اعوجاج فوکوس در تصویر از رابطه پراش فرنل استفاده کرده‌ایم [۴]. به این صورت که با اعمال رابطه زیر بر روی تصویر و تغییر پارامترهای آن وضوح و فوکوس تصویر دچار تغییر می‌شود.

$$g_{\text{out}}(x',y') = \frac{1}{i\lambda l}\left\{i2\pi\frac{1}{\lambda}\right\}$$

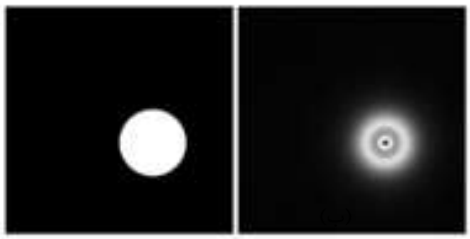
$$\times \iint g_{\text{in}}(x,y)exp\left\{\frac{(x'-x)^2+(y'-y)^2}{\lambda l}\right\}dxdy$$

در رابطه فوق، $g_{\text{out}}(x',y')$ میدان در صفحه خروجی است که در این مسئله به‌عنوان تصویر خروجی در نظر گرفته می‌شود. $g_{\text{in}}(x,y)$ میدان در صفحه جسم (تصویر ورودی)، λ طول موج و l فاصله روزنه تا آشکارساز (دوربین) است.

شبیه سازی

در این مقاله برای رفع اعوجاج فوکوس از شبکه عصبی کانولوشن (CNN) استفاده شده است. برای آموزش این شبکه عصبی مجموعه داده‌ای شامل ۱۰۰۰ تصویر با ابعاد ۲۵۶ × ۲۵۶ از دایره‌هایی با مراکز تصادفی و شعاع ثابت استفاده شده است. برای مجموعه داده‌های شامل اعوجاج فوکوس، رابطه پراش فرنل، رابطه (۱)، روی

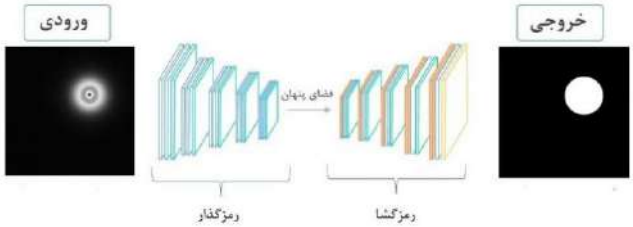
تصاویر اصلی اعمال شده و ۱۰۰۰ تصویر با اعوجاج فوکوس تولید شده است.



(الف) (ب)

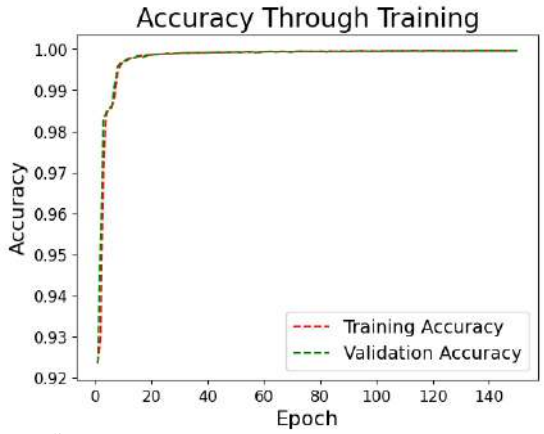
شکل (۱) : (الف) نمونه داده اصلی، (ب) نمونه داده با اعوجاج فوکوس جهت آموزش شبکه.

در مرحله بعد، شبکه عصبی طراحی کرده‌ایم که ورودی آن همان تصاویر اصلی و تصاویر پردازش شده با رابطه پراش فرنل هستند. داده‌های آموزشی شامل ۲۰۰۰ تصویر اصلی و دارای اعوجاج فوکوس و داده‌های اعتبار سنجی هم شامل ۳۰٪ داده‌های آموزشی است. در این نوع شبکه عصبی از مدل رمزگذار خودکار (Autoencoder) استفاده شده است. مدل رمزگذار خودکار نوعی شبکه عصبی است که یاد می‌گیرد داده‌های ورودی را در یک نمایش فشرده رمزگذاری کند، سپس آن را به شکل اصلی رمزگشایی کند. معماری شبکه، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، شامل هر دو لایه رمزگذاری و رمزگشایی است. مدل با یک لایه ورودی شروع می‌شود که تصویر ورودی را دریافت می‌کند. در ادامه از سه لایه پیچشی (Convolutional) با افزایش ابعاد فیلترها برای استخراج ویژگی، یک لایه ادغام (Max pooling) برای نمونه برداری و کاهش ابعاد فضایی نمونه، یک لایه صاف کردن (Flatten) برای تبدیل به تانسور یک بعدی و دو لایه کاملا مسطح (Fully Connected) برای نمایش کدگذاری و کاهش بیشتر ابعاد به منظور فشرده‌سازی اطلاعات استفاده شده‌است. تمام لایه‌های مورد استفاده لایه رمزگذار هستند. در ادامه برای بازسازی تصویر اصلی نیاز به لایه رمزگشا است. لایه رمزگشا در این مدل با آخرین لایه، از لایه رمزگذار شروع می‌شود. سپس به ترتیب، از لایه Reshape برای تبدیل تانسور یک بعدی به تانسور سه بعدی، لایه Upsampling برای افزایش ابعاد فضایی و در پایان چهار لایه Conv2DTranspose (معکوس عمل Convolution) با کاهش اندازه فیلتر در هر لایه برای بازسازی تصویر اصلی استفاده شده‌است.

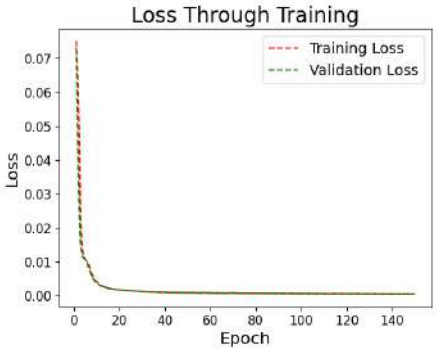


شکل (۲): شماتیک شبکه عصبی رمزنگار خودکار.

در طول فرآیند یادگیری، با تغییر پارامترهای Epoch، Batch Size و افزایش مجموعه داده آموزشی توانستیم به شبکه عصبی با دقت بیش از ۹۹٪ دست پیدا کنیم که نشان‌دهنده آن است که فرآیند یادگیری شبکه در با موفقیت انجام شده است و شبکه با دقت بسیار خوبی قادر به رفع اعوجاج فوکوس است.



شکل (۲) : نمودار دقت شبکه از ابتدای یادگیری تا پایان فرآیند.



شکل (۳) : نمودار اتلاف شبکه در طی فرآیند آموزش.

کیفیت یادگیری اغلب بر روی یک مجموعه داده جداگانه ارزیابی می‌شود تا میزان تعمیم مدل به نمونه‌های جدید ارزیابی شود. برای آزمودن دقت شبکه از داده‌های تست که در فرآیند یادگیری شبکه نقشی ندارند استفاده کرده‌ایم که نتایج پیش بینی آن در شکل (۴) نشان داده شده‌است.



(الف) (ب) (ج)

شکل (۴) : نمونه پیش‌بینی شبکه روی داده‌های آزمایشی جهت ارزیابی کیفیت یادگیری. (الف) تصویر اولیه، (ب) تصویر با اعوجاج فوکوس، (ج) پیش‌بینی شبکه و بازسازی تصویر اولیه.

فرآیند رفع اعوجاج فوکوس به روش های مختلفی انجام می‌شود. به عنوان مثال با بررسی کامل سطح نمونه و همزمان اندازه‌گیری معیار فوکوس (SGA و LFA)، نقطه فوکوس بهینه تشخیص داده می‌شود [۵]. که این روش و روش‌های دیگر در مقایسه با روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی زمان‌برتر و پرهزینه‌تر بوده و از دقت کافی برخوردار نیستند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اعوجاج فوکوس و رفع آن با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن پرداختیم. ابتدا مجموعه داده‌ای از تصاویر اولیه طراحی، سپس با استفاده از اعمال رابطه پراش فرنل روی آنها به تصاویر دارای اعوجاج فوکوس رسیدیم. در ادامه شبکه عصبی کانولوشنی طراحی و از مجموعه داده‌ی تولیدی برای آموزش شبکه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که شبکه عصبی کانولوشن آموزش داده شده، اعوجاج فوکوس را با دقت بیش از ۹۹٪ با موفقیت برطرف می‌کند. این شبکه عصبی به‌دلیل استخراج خودکار ویژگی از داده های ورودی و امکان استفاده از مجموعه داده بزرگ در مقایسه با روش‌های مرسوم که با محدودیت‌های بسیاری مواجه هستند موفق‌تر عمل کرده‌است. نتایج، کارآمدی شبکه طراحی شده را در تشخیص و تصحیح اعوجاج فوکوس تایید می‌کند.

مرجع‌ها

Herrmann, C., et al. Learning to autofocus. in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020.

Gu, J., et al., *Recent advances in convolutional neural networks.* Pattern recognition, 2018. **77**: p. 354-377.

Ding, K., et al., Comparison of full-reference image quality models for optimization of image processing systems. International Journal of Computer Vision, 2021. **129**: p. 1258-1281.

Aime, C., E. Aristidi, and Y. Rabbia, The Fresnel diffraction: A story of light and darkness. European Astronomical Society Publications Series, 2013. **59**: p. 37-58.

Lee, S., et al., Autofocusing and edge detection schemes in cell volume measurements with quantitative phase microscopy. Optics express, 2009. **17**(8): p. 6476-6486.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

حذف ابیراهی کروی از تصاویر با استفاده از یادگیری عمیق

زهرا فلاحی، فاطمه فلاحی، محمدرضا جعفرفرد، بابک زارع

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

mrjafarfard@iust.ac.ir

چکیده –ابیراهی کروی منجر به ایجاد هاله در تصویر می‌شود و کیفیت تصاویر را کاهش می‌دهد. در این مقاله توانایی یک شبکه عصبی در شناسایی و حذف ابیراهی کروی از تصاویر بررسی شده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شبکه عصبی کانولوشن طراحی شده به دلیل استخراج و یادگیری خودکار ویژگی‌های داده‌های ورودی، امکان استفاده از داده‌های متنوع و گسترده در طول آموزش و بهینه‌سازی شبکه از طریق تنظیم پارامترها محدودیت روش‌های مرسوم را تا حد قابل قبولی برطرف کرده است.

کلید واژه- ابیراهی کروی، یادگیری عمیق، شبکه عصبی کانولوشن

.

Eliminating spherical aberration from images using deep learning

Zahra Fallahi, Fatemeh Fallahi, Mohammadreza Jafarfard, Babak Zare

Department of Physics, Iran University of Science and Technology

Abstract - Spherical aberration leads to the creation of a halo in the image and reduces the quality of the images. In this article, the ability of a neural network to identify and remove spherical aberration from images is investigated. The results of this research show that the designed convolutional neural network has overcome the limitations of conventional methods to an acceptable extent due to the automatic extraction and learning of input data features, the possibility of using diverse and extensive data during training and network optimization through parameter setting.

Keywords: Spherical Aberration, Deep Learning, Convolutional Neural Network

مقدمه\

یکی از موضوعات مهم در حوزه تصویربرداری دیجیتال تلاش برای افزایش کیفیت تصویر است. یکی از چالش‌های عمده که در تصویربرداری با آن مواجه می‌شویم وجود ابیراهی کروی است. ابیراهی کروی باعث می‌شود تا نور از مسیر طبیعی خود منحرف شود. با این انحراف، امواج نور به جای همگرا شدن در یک نقطه، در نقاط مختلفی همگرا می‌شوند. عدم همگرایی در یک نقطه سبب کاهش قدرت کانونی کنندگی عدسی می‌شود. این امر به‌صورت یک هاله نسبتا یکنواخت در مرکز و لبه‌های تصویر ظاهر می‌شود که منجر به کاهش وضوح و کیفیت تصویر نهایی خواهد شد. تاکنون تلاش‌های گسترده‌ای به منظور یافتن راهی برای حذف ابیراهی از تصاویر صورت گرفته است [۱] و محققان در روش‌های مرسوم [۲] همواره تلاش کرده‌اند با استفاده از عدسی‌های قابل تنظیم [۳]، به کار بردن لنزهای مبتنی بر مایع با سطوح غیرکروی [۴]، اعمال فیلتر و ... میزان ابیراهی را کاهش دهند. علیرغم تلاش‌های صورت گرفته تا کنون، همچنان نیاز به روشی بهینه برای کاهش اثر ابیراهی و افزایش کیفیت تصاویر احساس می‌شود. امروزه علم در حوزه هوش مصنوعی پیشرفت‌های فراوانی داشته است [۵]. در این مقاله، با هدف حذف ابیراهی کروی، از بین مدل‌های موجود شبکه عصبی از شبکه کانولوشنی استفاده شده‌است. در این مقاله هدف حذف ابیراهی کروی با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن از تصاویر است.

برای آموزش شبکه کانولوشن از یک مجموعه داده اصلی و یک مجموعه داده دارای ابیراهی استفاده شده‌است. برای ساخت مجموعه داده‌های اصلی ابتدا ۱۰۰۰ تصویر با ابعاد ۲۵۶×۲۵۶ شامل دایره با شعاع ثابت و مرکز تصادفی تولید شده‌است. سپس مجموعه داده‌های دارای ابیراهی با اعمال ابیراهی کروی بر تصاویر مجموعه داده اصلی ساخته شده‌است که ابیراهی کروی به کمک رابطه زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$G(x,y) = O(x,y) \otimes PSF(x,y) \quad (۱)$$

که در رابطه فوق $G(x,y)$ نشان‌دهنده تصویر دارای ابیراهی، $O(x,y)$ تصویر ورودی و $PSF(x,y)$ تابع گسترش نقطه است. اثر ابیراهی بر تصویر ورودی نیز از طریق کانولوشن $PSF(x,y)$ و $O(x,y)$ بدست می‌آید. در تابع گسترش نقطه، پرتو هنگامی که به صفحه تصویر برخورد می‌کند به‌جای آنکه پیرامحوری باشد روی صفحه تصویر پخش شود. $PSF(x,y)$ به کمک رابطه زیر بدست می‌آید

$$PSF(x,y) = |FT[p(X,Y)]|^2 \quad (۲)$$

در رابطه فوق $PSF(x,y)$ معادل با مجذور تبدیل فوریه مردمک خروجی است. همچنین در این رابطه $p(X,Y)$ نشان‌دهنده مردمک خروجی است که مردمک خروجی در واقع محل برخورد پرتوها است و از رابطه زیر بدست می‌آید

$$p(X,Y) = e^{2\pi i Z(x,y)} \quad (۳)$$

$Z(x,y)$ نشان‌دهنده چند جمله‌ای سری زرنیک است که چند جمله‌ای زرنیک متناظر با ابیراهی کروی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z(x,y) = SA \times \sqrt{5}(6R^4 - 6R^2 + 1) \quad (۴)$$

SA ضریب ابیراهی کروی و R^2 شعاع انحنای پرتو است.

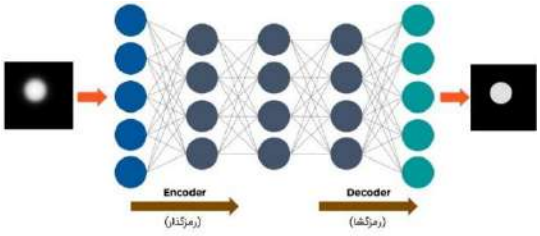
شبیه‌سازی

برای ساخت شبکه عصبی کانولوشنی که بتواند ابیراهی را از تصاویر رفع کند نیاز است که فرآیند آموزش شبکه با داده‌های بدون ابیراهی و شامل ابیراهی کروی انجام شود تا شبکه قدرت تشخیص ابیراهی در تصویر را داشته باشد. به این منظور با اعمال ابیراهی کروی بیان شده در رابطه (۱) بر روی مجموعه داده‌های اصلی، در نهایت ۱۰۰۰ تصویر دارای ابیراهی کروی با ابعاد ۲۵۶×۲۵۶ بدست می‌آید. در شکل (۱) نمونه‌ای از تصاویر مجموعه داده اصلی را به همراه داده‌های دارای ابیراهی کروی نمایش داده شده‌است.



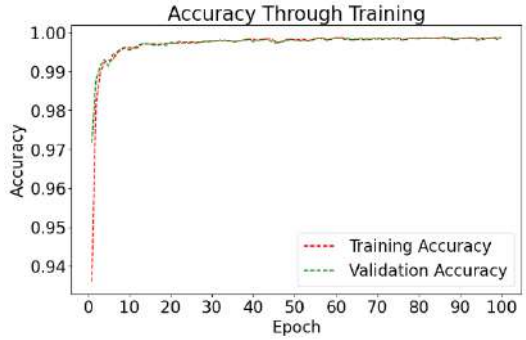
شکل ۱: نمونه‌ای از تصاویر دایره تولید شده اصلی و دارای ابیراهی کروی با شعاع ثابت و مراکز تصادفی.

در این مقاله از شبکه عصبی رمزگذاری خودکار (Autoencoder) استفاده شده است. شبکه عصبی رمزگذاری خودکار نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که برای یادگیری بدون نظارت طراحی شده که شامل دوبخش رمزگذار و رمزگشا است. رمزگذار داده های ورودی را در یک نمایش با ابعاد پایین تر (رمزگذاری) فشرده می کند و رمزگشا داده های اصلی را از این نمایش بازسازی می کند. شبکه به این نحو آموزش داده می‌شود تا تفاوت بین ورودی و خروجی بازسازی شده را به حداقل برساند. شبکه عصبی موردنظر، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در قسمت رمزگذاری متشکل از دولایه کانولوشنی برای بررسی ویژگی‌های خاص هر تصویر، یک لایه ادغام (Max_pooling) برای پایین آوردن ابعاد فضایی ویژگی‌های خاص هر تصویر، یک لایه کانولوشن، یک لایه کاملا متصل (Flatten) برای یک بعدی کردن داده‌های پیچیده و چند بعدی و یک لایه Dense برای کوچک کردن ابعاد تصویر است. سپس شبکه وارد قسمت رمزگشا می‌شود که متشکل از یک لایه Reshape برای سه بعدی کردن داده‌ها، یک لایه UpSampling برای افزایش ابعاد فضایی و ۴ لایه کانولوشنی برای بازسازی تصویر اصلی به ابعاد اولیه است. معماری شبکه بیان شده در شکل (۲) نشان داده شده است:

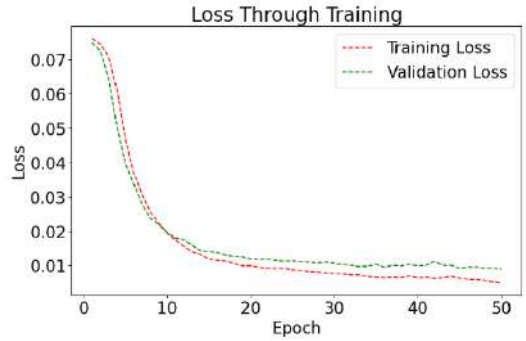


شکل ۲: معماری شبکه عصبی کانولوشن شامل لایه‌های مختلف برای استخراج ویژگی‌های مورد نظر جهت آموزش شبکه برای رفع ابیراهی کروی.

آموزش شبکه با مجموعه داده آموزشی شامل ۲۰۰۰ تصویر اصلی و دارای ابیراهی کروی و داده‌های اعتبارسنجی شامل ۳۰٪ داده‌های آموزشی انجام شده است. نتایج حاصل از فرآیند آموزش شبکه نشان دهنده دقت یادگیری بیش از ۹۹٪ است که نشان از دقت بالا و توانایی شبکه در تشخیص و رفع ابیراهی کروی از تصاویر است. خلاصه‌ای از فرآیند آموزش مدل عصبی در قالب نمودار دقت و اتلاف شبکه به ترتیب در شکل (۳) و شکل (۴) نشان داده شده‌است.



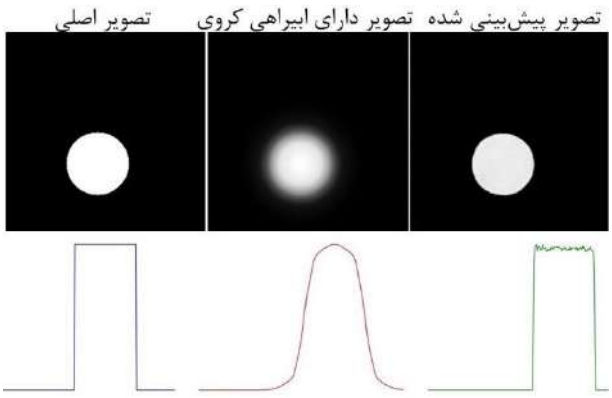
شکل ۳: نمودار دقت شبکه عصبی نشان داده شده در شکل (۲).



شکل ۴: نمودار اتلاف شبکه عصبی نشان داده شده در شکل (۲).

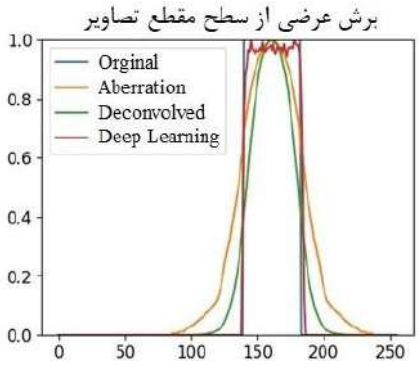
به منظور سنجش دقت و عملکرد شبکه آموزش دیده در حذف ابیراهی کروی، از داده‌های آزمایشی که قبلا در فرآیند

آموزش شبکه مشارکتی نداشته‌اند استفاده شده است. نتایج پیش‌بینی شبکه بر روی داده‌های آزمایشی در شکل (۵) نیز به وضوح عملکرد مطلوب و توانایی مدل عصبی پیشنهادی را در کاهش ابیراهی کروی نشان می‌دهد.



شکل ۵: تصاویر ردیف بالا نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی روی داده‌های آزمایشی است که در طول آموزش شبکه مشارکتی نداشته‌اند و تصاویر ردیف پایین برش عرضی هر تصویر در امتداد محور افقی است.

فرآیند حذف ابیراهی کروی به روش‌های متفاوتی از جمله روش کانولوشن معکوس (Deconvolved) انجام می‌شود[۷]. در شکل (۶) نمونه‌ای از حذف ابیراهی کروی به کمک کانولوشن معکوس و شبکه عصبی صورت گرفته است. می‌توان با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل (۶) به توانایی بالای حذف ابیراهی کروی توسط شبکه عصبی پی‌برد.



شکل ۶: برش عرضی در امتداد محور افقی (مقایسه روش یادگیری عمیق و کانولوشن معکوس).

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک شبکه عصبی کانولوشن به تشخیص و حذف ابیراهی کروی در تصاویر پرداخته‌ایم. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد شبکه طراحی شده با دقت بیش از ۹۹٪ می‌تواند ابیراهی کروی را در تصویر تشخیص و آن را رفع کند، همچنین به دلیل یادگیری خودکار ویژگی‌ها، سازگاری با مجموعه داده‌های متنوع و داده‌های آموزشی گسترده و همچنین انعطاف پذیری آن برای تنظیم پارامترها و بهینه‌سازی در طول آموزش در مقیاس بزرگ، نسبت به روش کانولوشن معکوس توانست موفق‌تر عمل کند.

مرجع‌ها

Turcotte, R., Y. Liang, and N. Ji, *Adaptive optical versus spherical aberration corrections for in vivo brain imaging.* Biomedical optics express, 2017. **8**(8): p. 3891-3902.

Taniguchi, Y., et al., *Correction of spherical aberration in HREM image using defocus-modulation image processing.* Microscopy, 1992. **41**(1): p. 21-29.

Reichelt, S. and H. Zappe, *Design of spherically corrected, achromatic variable-focus liquid lenses.* Optics express, 2007. **15**(21): p. 14146-14154.

Yu, H., et al., *Tunable liquid-filled lens integrated with aspherical surface for spherical aberration compensation.* Optics express, 2010. **18**(10): p. 9945-9954.

Gu, J., et al., *Recent advances in convolutional neural networks.* Pattern recognition, 2018. **77**: p. 354-377.

Jallod ,U.E., *Simulations of Four Types of Optical Aberrations using Zernik Polynomials.* Iraqi Journal of Science, 2017. **58**(1C): p. 583-591.

Avila, F., *Spherical Aberration and Scattering Compensation in Digital Imaging by a New Blind Deconvolution Method.* 2022.

سی‌امین
کنفرانس اپتیک و فوتونیک
و شانزدهمین کنفرانس مهندسی
و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه دامغان
۹ تا ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

بررسی تابع توزیع افت و خیز زاویه فرود نور عبوری از محیط متلاطم زیر آب

ابراهیم محمدی رازی، رضا شکوهی قهفرخی، مرضیه عرب کوهسار

گروه فیزیک،دانشکده علوم پایه، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

e.mohammadi@ub.ac.ir

چکیده – در این مقاله تابع توزیع افت و خیز مولفه‌های زاویه فرود نور عبوری از محیط متلاطم زیرآب در دو راستای عمود بر راستای انتشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس باریکه نور لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر و قطر ۱ سانتیمتر از محیط متلاطم زیر آب عبور می‌کند. محیط متلاطم را آکواریوم پر از آب با ابعاد $20 \times 36 \times 20$ سانتیمتر مکعب که بر روی یک گرم‌کن برقی قرار گرفته تشکیل می‌دهد. میانگین دمای آب با افزایش دمای گرم‌کن در بازه ۲۰ تا ۴۳ درجه با گام‌های ۱ درجه تغییر می‌کند. باریکه نور لیزر از مکان‌های مختلف نسبت به دیواره آکواریوم از محیط متلاطم زیر آب عبور می‌کند. در انتهای مسیر مولفه‌های زاویه فرود نور در دو راستای عمود بر جهت انتشار تعیین و تابع توزیع افت و خیز آن محاسبه می‌شود. چهار تابع توزیع: گاوسین، لگ‌نرمال، ویبال و گاما به داده های تجربی برازش می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که تابع توزیع وایبل بهترین انطباق را با داده‌های تجربی دارد.

کلید واژه–تلاطم زیر آب،گرادیان دما، زاویه فرود نور

Investigation of probability density function of angle of arrival propagating through convective underwater turbulence

Ebrahim mohammadi Razi[1], Reza Shokoohi[1], marzieh arabkuhsar[1]

[1]Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Bojnord, Bojnord, Iran

Abstract- In this paper, the probability distribution function of the fluctuation components of the angle of arrival of propagated light beam through underwater turbulent is studied. Accordingly, a laser beam with a wavelength of 532 nm and a diameter of 1 cm propagates through the turbulent underwater medium. The turbulent medium is a water filled aquarium with dimensions of $20\times36\times20$ cm^3, placed on an electric heater. The average water temperature varies from 24 to 44 degrees with increments of 1 degree as the heater temperature increases. The laser beam propagates through different positions relative to the aquarium wall from the turbulent underwater medium. At the end of the path, the fluctuation components of the angle of arrival in two perpendicular directions to the propagation direction are determined, and their probability distribution function is calculated. Four distribution functions, Gaussian, Log-Normal, Weibull, and Gamma, are fitted to the experimental data. The results indicate that the Weibull distribution shows the best fit to the experimental data.

Keywords: Underwater turbulence, temperature gradient, angle of arrival fluctuations.

مقدمه

درسال‌های اخیر بررسی انتشار پرتو لیزر در محیط متلاطم زیرآب با توجه به کاربردهای وسیع آن در زمینه‌هایی نظیر تصویربرداری زیرآب [۱]، ارتباطات نوری بی‌سیم زیرآب [۲]، سنجش از دور و کاربردهای نظامی مورد توجه محققان بوده است. انتشار پرتو نور در این محیط با محدودیت‌هایی همچون جذب، پراکندگی و تلاطم نوری همراه است. نوسانات دما و شوری دو عامل اصلی تلاطم اپتیکی زیرآب می‌باشد. در برخی از مطالعات انجام شده، از نوسانات شوری در مقابل نوسانات دمایی صرفنظر شده است. تلاطم همرفتی یکی از روش‌های ایجاد نوسانات دمایی در تلاطم زیر آب است. همرفت رایلی- بنارد ساده‌ترین سیستم برای مطالعه تلاطم همرفتی است. در این سیستم، مایع از پایین گرم و از بالا خنک می‌شود. با این حال در برخی مطالعات، محیط متلاطم فقط از پایین گرم می‌شود[۳]. مطالعات بسیاری تاثیر چنین محیط متلاطمی را در انتشار باریکه لیزر بررسی نموده‌اند. برای پیش‌بینی تأثیر تلاطم نوری در انتشار پرتو نور، رفتار آماری نوسانات افت و خیز زاویه فرود نور هنگام عبور از محیط متلاطم مهم است. به طور خاص، تابع چگالی احتمال نوسانات زاویه فرود نور پس از عبور از محیط متلاطم برای محاسبه ویژگی تلاطم استفاده می‌شود.

در این مقاله تاثیر نوسانات دمایی محیط متلاطم زیر آب بر آمار تابع توزیع افت و خیز مولفه‌های زاویه فرود نور در انتشار در محیط متلاطم زیر آب بررسی می‌شود. بر این اساس در ادامه چیدمان آزمایش مورد استفاده توضیح داده خواهد شد. سپس نحوه اندازه‌گیری زاویه فرود نور به همراه محاسبه تابع چگالی افت و خیز آن بیان می‌شود. چهارتابع گاوسین، لگ‌نرمال، ویبال و گاما معرفی و به داده‌های تجربی برازش می‌شود. در نهایت نتایج برازش ارائه و تفسیر می‌شود.

نحوه انجام آزمایش

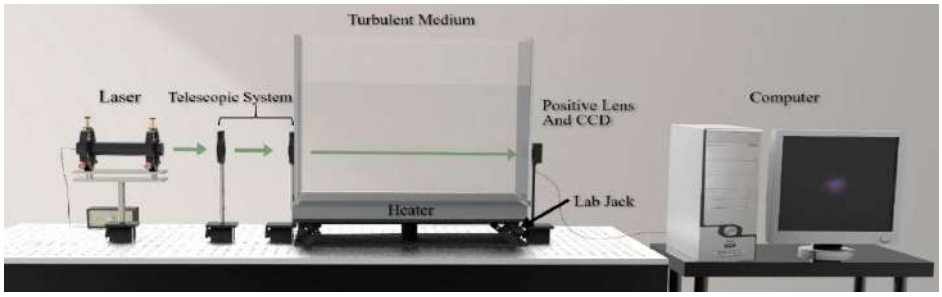
شکل ۱ طرح واره‌ی چیدمان آزمایش انجام شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه بجنورد را نشان می‌دهد. نور لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر با استفاده از یک سیستم تلسکوپی موازی و با قطر ۱ سانتیمتر وارد محیط متلاطم آبی می‌شود. محیط متلاطم زیر آب از یک آکواریوم با ابعاد $20 \times 36 \times 20$ سانتیمترمکعب تشکیل شده است. آکواریوم بر روی یک گرم‌کن الکتریکی با دمای قابل تنظیم قرار دارد. این سیستم تلاطم همرفتی رایلی- بنارد را ایجاد می‌کند. با افزایش دمای گرمکن، دمای میانگین آب افزایش می‌یابد. باریکه نور لیزر پس از عبور از محیط متلاطم توسط یک عدسی همگرا با فاصله کانونی ۲.۵ سانتی‌متر بر روی صفحه حساس دوربین CCD متمرکز شده و سپس تصاویر ثبت شده برای تحلیل به کامپیوتر منتقل می‌شود. سرعت داده برداری دوربین CCD ۶۰۰ تصویر در ثانیه و زمان نوردهی ۰.۳میلی ثانیه است. برای بررسی تاثیر گرادیان دما بر افت و خیز زاویه فرود، دمای آب آکواریوم از دمای ۲۰ تا ۴۳ درجه سلسیوس، با گام 1 درجه تغییر می‌کند. در هر آزمایش نور لیزر از محیط متلاطم عبور کرده و در انتهای مسیر، زاویه فرود نور چنانچه در بخش بعد خواهد آمد در دو راستای عمود بر راستای انتشار محاسبه می‌شود. در نهایت واریانس افت و خیز زاویه فرود نور در دو راستا تعیین و تابع توزیع آن محاسبه می‌شود. بر اثر تلاطم مکان تمرکز نور لیزر یا معادل آن مولفه‌های زاویه فرود نور بر روی دوربین سی‌سی‌دی افت و خیز می‌کند. برای بررسی تأثیر دیواره بر جهت حرکت و نیز بر نوسانات زاویه فرود نور، پرتو لیزر از فاصله ۱۷ سانتیمتری از کف (Y) و فواصل مختلف از دیواره‌های جانبی (X) محیط عبور می‌کند. شکل ۱ (سمت راست) برش عرضی مخزن آب را نشان می‌دهد که مکان‌های عبور پرتو نوری با حروف a، b و c، مشخص شده است. فاصله مسیر پرتو از سطح آب ۰/۷ سانتیمتر است. در تمام آزمایش‌ها شوری آب صفر است. برای حذف لرزش‌های ناخواسته، تمام چیدمان اپتیکی بر روی میز اپتیکی ضد ارتعاش انجام شده است.

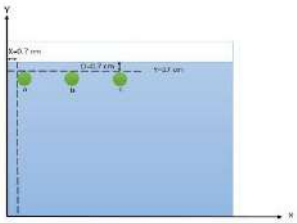
تئوری

برای تحلیل داده‌ها در ابتدا با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب مرکز شدت تصویر باریکه لیزر ثبت شده تعیین می‌شود، اگر $I(x,y)$ توزیع شدت نور در صفحه کانونی عدسی مثبت باشد، مرکز شدت لکه در راستای x طبق رابطه زیر داده می‌شود

$$x_G = I_{tot}^{-1} \iint xI(x,y)dxdy, \qquad (1)$$

که I_{tot} شدت کل تصویر لکه است. رابطه مشابهی را می‌توان برای مرکز شدت در راستای y نوشت. برای تصاویر گسسته CCD، انتگرال به جمع روی پیکسل‌های CCD تبدیل می‌شود.





شکل ۱. چیدمان آزمایش(سمت چپ) به همراه برش عرضی آکواریوم و محل عبور باریکه نور لیزر از آن(سمت راست).

در محاسبه انتگرال ابتدا مرکز پرشدت‌ترین پیکسل را مشخص می‌کنیم سپس به مرکز آن و به شعاع قرص ایری که برابر $\boldsymbol{r = 1.22\,\lambda/D}$ (که $\boldsymbol{\lambda}$ طول موج و D قطر لکه است) دایره‌ای رسم می کنیم. سپس انتگرال را در این محدود محاسبه می‌کنیم. با محاسبه $\boldsymbol{x_G}$ و $\boldsymbol{y_G}$ ، زاویه فرود طبق رابطه ۲ بدست می آید.

$$\alpha_x = \frac{l_x \times (x_{Gi} - \bar{x}_{Gi})}{F} \qquad (2)$$

که l_x، x_{Gi}، $\bar{x}_{Gi}$ و F به ترتیب اندازه پیکسل CCD در راستای x، مکان مرکز جرم تصویر i ام، میانگین مولفه x مکان مرکز جرم تصاویر مختلف و فاصله کانونی عدسی مثبت است. پس از محاسبه زاویه فرود نور در دو راستا، تابع چگالی احتمال افت و خیز مولفه‌های زاویه فرود نور تعیین شده و چهار تابع توزیع گاوسین، لگ‌نرمال، ویبال و گاما که به صورت زیر تعریف می‌شوند به داده‌های آزمایشگاهی برازش می‌شود.

تابع توزیع گاوسین

$$f(x) = a\exp(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}) \qquad (3)$$

تابع توزیع لگ نرمال

$$f(x) = a\exp(-\frac{(\ln(x/b))^2}{2c^2}) \qquad (4)$$

تابع توزیع ویبال

$$f(x) = a\exp(-(n+m^{\frac{1}{d}})^d + m) \times m^{-m} \times (n+m^{\frac{1}{d}})^{d-1}, m = \frac{d-1}{d}, n = \frac{x-b}{c} \qquad (5)$$

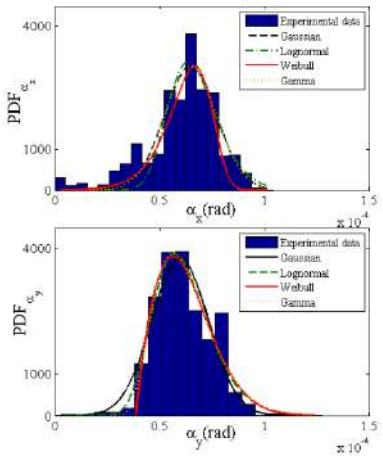
تابع توزیع گاما

$$f(x) = a\exp(-\frac{x-b}{c})\left[\frac{(\frac{x-b}{c}) + d - 1}{d-1}\right]^{d-1} \qquad (6)$$

که اعداد a ، b، c و d ثابت‌های توابع توزیع هستند. برای بررسی برازش توابع توزیع مختلف و ارزیابی میزان تطابق آن‌ها با داده‌های تجربی، از متریک Goodness fitting استفاده می‌کنیم که به عنوان معیار R^2 نیز شناخته می‌شود. برای یک توزیع معین، با نزدیک شدن مقدار اندازه‌گیری R^2 به حداکثر (یعنی ۱)، توزیع، بهتر با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت دارد.

نتایج

شکل ۲ نمودار چگالی احتمال افت و خیز زاویه فرود نور در ارتفاع ۱۷ سانتیمتر از کف آکواریوم و فاصله ۱۸ سانتیمتر از دیواره جانبی (مربوط به مکان c در شکل ۱) هنگامی که دمای میانگین آب ۳۳ درجه سانتیگراد است را به همراه توابع توزیع برازش شده در دو راستای x و y نشان می‌دهد.



شکل ۲. تابع چگالی احتمال افت و خیز مولفه های زاویه فرود نور در دو راستای x و y به همراه توابع گاوسین، لگ‌نرمال، ویبال و گاما برازش شده.

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد در هر موقعیت دمای میانگین آب از ۲۱ درجه تا ۴۳ درجه با پله‌های یک درجه تغییر

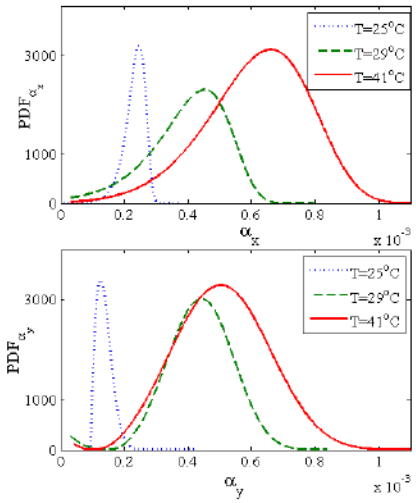
داده شد. جدول ۱درصد دفعاتی را که تابع توزیع در آن بیشترین R^2 را دارد نشان می‌دهد. مطابق نتایج این آزمایش بهترین تابع برازش شده به داده‌های تجربی تابع توزیع ویبال می‌باشد. در منابع علمی فرض بر آن است که افت و خیز زاویه فرود نور از تابع توزیع گاوسین تبعیت می‌کند، با این وجود مشاهده می‌شود که تابع ویبال در درجه اول و گاما در درجه بعدی مطابقت بیشتری با داده‌های تجربی دارد. شکل ۳ و ۴ تغییرات تابع توزیع برازش شده وایبل به داده‌های تجربی را برای دو موقعیت b و c را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل پیداست با افزایش دما ماکزیمم تابع توزیع به سمت افت و خیز بیشتر زاویه فرود نور پیش می‌رود. که نتیجه ای از افزایش میزان شدت تلاطم است.

جدول ۱: درصد مواردی که تابع توزیع های مختلف بیشترین انطباق را با داده‌های تجربی دارند.

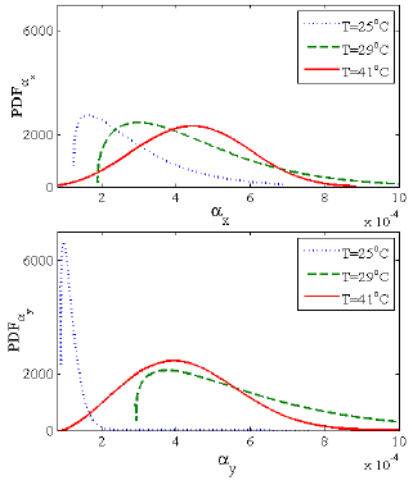
نام تابع	مولفه زاویه فرود	محل a	محل b	محل c
Gaussian	PDF_{α_x}	۷٪/۳۱	۲۲٪	۱۱٪/۷۶
	PDF_{α_y}	۲۰٪/۴۵	۱۵٪/۲۱	۱۷٪/۶۴
Lognormal	PDF_{α_x}	۱۲٪/۱۹	۲٪	۱۱٪/۷۶
	PDF_{α_y}	۴٪/۵۴	۰	۰٪
Weibull	PDF_{α_x}	۵۳٪/۶۸	۵۴٪/۳۴	۳۲٪/۳۷
	PDF_{α_y}	۴۰٪/۹	۳۶٪/۹۵	۵۵٪/۸۹
Gamma	PDF_{α_x}	۲۶٪/۸۲	۲۱٪/۷۳	۴۴٪/۱۱
	PDF_{α_y}	۳۴٪/۰۹	۴۷٪/۷۶	۲۶٪/۴۷

نتیجه‌گیری

در این مقاله تابع توزیع افت و خیز مولفه‌های زاویه فرود نور عبوری از محیط متلاطم زیرآب در دو راستای عمود بر راستای انتشار مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر دمای مختلف تلاطم زیر آب و نیز مکان انتشار باریکه بررسی شد. چهار تابع توزیع: گاوسین، لگ‌نرمال، وایبل و گاما به داده های تجربی برازش شد. نتایج نشان دادند که تابع توزیع وایبل بهترین انطباق را با داده‌های تجربی دارد.



شکل ۳ تابع توزیع احتمال وایبل برازش شده به داده‌های تجربی افت و خیز مولفه‌های زاویه فرود نور مربوط به مکان b.



شکل ۴ تابع توزیع احتمال وایبل برازش شده به داده‌های تجربی افت و خیز مولفه‌های زاویه فرود نور مربوط به مکان c.

مرجع‌ها

Korotkova O 2019 Light propagation in a turbulent ocean Progress in Optics 64 (Amsterdam: Elsevier) 1–43

Kocak D M, Dalgleish F R, Caimi F M and Schechner Y 2008 A focus on recent developments and trends in underwater imaging Mar. Technol. Soc. J. 42 52–67.

[3] Mohammadi Razi E, Shokohi R and Rasouli S 2022 Study of Anisotropy of the Convective Optical Underwater Turbulence and the Effect of the Mean Water Temperature in the Presence of a Varying Temperature Gradient on it, Laser Physics, 32(9), 095602 .