تأثیر مکان آهنرباهای میانی بر حرکت الکترون در یک چشمه پلاسما با محصورسازی مغناطیسی چندقطبی حلقوی

علی خسروی و مصطفی سلحشور

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده: هدف این تحقیق بررسی تأثیر مکان آهنرباهای میانی بر عملکرد چشمه پلاسما با محصورسازی مغناطیسی چندقطبی حلقوی (RCMP)است. شبیه‌سازی تک‌ذره‌ای برای تحلیل حرکت الکترون‌ها و توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی انجام شده است. در این مدل، الکترون‌ها از یک کاتد گسیل می‌شوند و پلاسما از طریق تخلیه الکتریکی جریان مستقیم ایجاد می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که مکان بهینه آهنرباهای میانی، با فاصله ۱۲ میلی‌متری از صفحه پایه، قدرت محبوس‌سازی الکترون‌ها را تا ۵۵٪ افزایش می‌دهد. این چیدمان باعث کاهش برخورد الکترون‌ها با دیواره‌ها و افزایش کارایی تفنگ الکترونی می‌شود. این پژوهش می‌تواند در بهبود طراحی منابع پلاسما برای کاربردهای فضایی و صنعتی مؤثر باشد.

کلیدواژه: تفنگ الکترون، چشمه پلاسما، محصورسازی مغناطیسی، مسیر حرکت الکترون، میدان مغناطیسی.

The effect of the location of the intermediate magnets on the electron motion in a ring-cusped magnetically confined plasma source

Ali Khosravi and Mostafa Salahshoor *

School of Physics, Iran university of science and technology, Tehran

*salahshoor@iust.ac.ir

Abstract- The aim of this study is to investigate the effect of the middle magnet positions on the performance of a ring-cusp magnetic confinement plasma source (RCMP). A single-particle simulation is employed to analyze the electron motion and the distribution of electric and magnetic fields. In this model, electrons are emitted from a cathode, and plasma is generated through a direct current (DC) discharge mechanism. The results indicate that the optimal position of the middle magnets, at a distance of 12 mm from the base plate, increases the electron confinement efficiency up to 55%. This configuration reduces electron collisions with the chamber walls and enhances the electron gun's performance. This research can contribute to the improved design of plasma sources for space and industrial applications.

Keywords: electron gun, electron trajectory, magnetic confinement, magnetic field, plasma source.

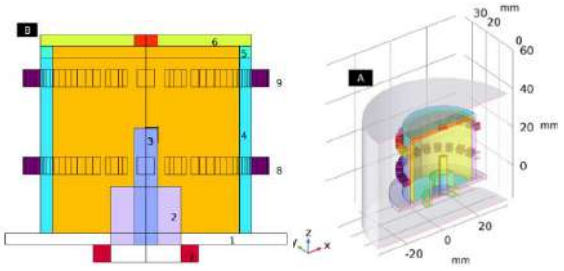
مقدمه

پیشرانش الکتریکی فضایی یک حوزه تحقیقاتی در حال توسعه است که به کمک آن عملیات طولانی‌مدت فضاپیماها میسر می‌شود. بسیاری از محققان به دنبال یافتن روش‌های جدید شتاب‌دهی و پیشرانه‌های جایگزین برای تغییر اندازه پیشرانه‌ها جهت ایجاد نیروی رانش زیاد یا بکارگیری فضاپیماهای بسیار کوچک هستند. یک زیرمجموعه‌ی ضرروری در سیستم‌های پیشرانش الکتریکی خنثی‌کننده‌ی بارفضاست. خنثی‌کننده‌ی پل پلاسمایی (PBN) یکی از پیشرفته‌ترین خنثی‌کننده‌های مورد استفاده در رانشگرهای الکتریکی است. PBN می‌تواند با ایجاد یک «پل» پلاسمایی بین جریان‌های یون مثبت و منفی به‌طور مؤثری بارفضای پرتو یون خروجی را خنثی کند تا از مشکلات باردار شدن فضاپیما جلوگیری شود. این امر برای کاربردهای طولانی‌مدت و ایجاد پیشرانش دقیق در فضا خیلی مهم است. پیشرفت‌های اخیر در فناوری PBN بر بهینه‌سازی چگالی پلاسما، پایداری و مصرف انرژی کمتر متمرکز بوده است تا آن را با انواع مختلف پیشرانه‌ها و ماموریت‌ها سازگار کند. از مزایای مهم PBN می‌توان به طراحی ساده و وزن کم آن اشاره کرد. این نوآوری موجب افزایش طول عمر و مانورپذیری فضاپیماها می‌شود، به ویژه در ماموریت‌های اعماق فضا، که در آن خنثی‌سازی بسیار ضروری است[۱]. در این تحقیق، تاثیر مکان آهنرباهای میانی بر حرکت الکترون در یک چشمه پلاسما با محصورسازی مغناطیسی چندقطبی حلقوی (RCMP) بررسی می‌شود که در آن الکترون‌ها از یک کاتد گسیل می‌گردد و برای ایجاد پلاسما از سازوکار تخلیه الکتریکی جریان مستقیم استفاده می‌شود.

در تحقیق اخیر، توزیع میدان الکتریکی ناشی مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به کاتد و همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی ناشی از مقادیر مختلف پسماند مغناطیسی آهنرباهای دائمی محاسبه و پس از آن، بر اساس مدل تک-ذره‌ای، مسیر حرکت الکترون‌ها در ترکیب‌های مختلف میدان‌ها ردیابی و مقایسه شد[۲]. در مقاله حاضر، تاثیر مکان آهنرباهای میانی بر محبوس‌سازی الکترون‌ها در یک تفنگ الکترون RCMP بررسی می‌شود. ابتدا توزیع میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی به کاتد و همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی ناشی از پسماند مغناطیسی آهنرباهای دائمی محاسبه شده است. پس از آن، بر اساس مدل تک‌ذره‌ای، مسیر حرکت الکترون‌ها در حالت‌های مختلف میدان ناشی از مکان آهنرباهای میانی مقایسه شده است. این مقاله در پنج بخش تنظیم شده است. پس از مقدمه، در بخش۲ مشخصات مدل شبیه‌سازی معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در بخش۳ شرح داده شده است. در بخش۴، ضمن نمایش نتایج شبیه‌سازی حرکت الکترون‌ها، قدرت تفنگ الکترونی RCMP در محبوس‌سازی الکترون‌ها برای توزیع‌های مختلف میدان‌ها ارزیابی شده است. در بخش پایانی جمع‌بندی ارائه شده است.

مدل شبیه‌سازی

در شکل۱ نمای سه‌بعدی مدل هندسی به‌همراه نمای دوبعدی آن در مقطع عرضی نشان داده شده است.



شکل۱. مدل هندسی شبیه‌سازی تفنگ الکترونی RCMP: (الف) نمای سه‌بعدی و (ب) نمای دوبعدی در مقطع عرضی.

در شکل۱-(ب)، شماره۱ معرف صفحه پایه است. قطر خارجی و قطر روزنه مرکزی آن به ترتیب ۴۸ و ۱۲ میلیمتر است. نگهدارنده کاتد (شماره۲) روی صفحه پایه قرار دارد و کاتد (شماره۳) روی نگهدارنده مستقر است. محفظه‌ی پلاسما (شماره۴) روی صفحه پایه قرار دارد و قطر داخلی و ارتفاع آن به ترتیب ۳۲ و ۳۰ میلیمتر است. الکترود بالا (شماره۶) توسط یک عایق (شماره۵) از محفظه پلاسما ایزوله شده است. آهنربای حلقوی پایینی (شماره۷) که در زیر صفحه پایه قرار دارد دارای قطر خارجی ۱۸ میلیمتر و ضخامت ۳ میلیمتر است. شماره‌های ۸ و ۹ به ترتیب معرف آهنرباهای جانبی میانی و بالایی به شکل مکعب با ضلع ۳ میلیمتر هستند. آهنرباهای جانبی دور محفظه پلاسما قرارگرفته‌اند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است [۳]. بر اساس نتایج تحقیق قبلی، ولتاژ کاتد و پسماند مغناطیسی آهنرباها به ترتیب برابر با ۲۰- ولت و ۰.۵۵ تسلا در نظر گرفته شد. این مقادیر مربوط به حالتی است که

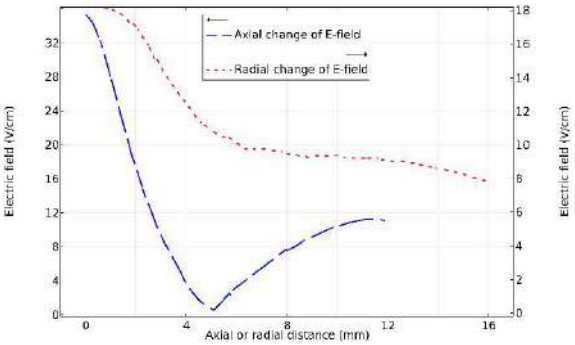
درصد ذرات فعال در پایان شبیه‌سازی بیشینه بود. صفحه پایه و محفظه پلاسما در پتانسیل زمین قرار دارند. الکترود بالا و کاتد هم‌پتانسیل هستند. در این تحقیق، مطابق جدول۱، تعداد چهارده مقدار برای مکان آهنرباهای میانی بر اساس فاصله از صفحه پایه در نظر گرفته شده است.

جدول۱: مقادیر مکان آهنرباهای میانی برای ولتاژ کاتد ۲۰- ولت و پسماند مغناطیسی آهنرباها ۰.۵۵ تسلا.

ردیف	مکان آهنرباهای میانی (میلیمتر)	ردیف	مکان آهنرباهای میانی (میلیمتر)
۱	۴	۸	۱۱
۲	۵	۹	۱۲
۳	۶	۱۰	۱۳
۴	۷	۱۱	۱۴
۵	۸	۱۲	۱۵
۶	۹	۱۳	۱۶
۷	۱۰	۱۴	۱۷

تاثیر مکان آهنرباها بر میدان مغناطیسی

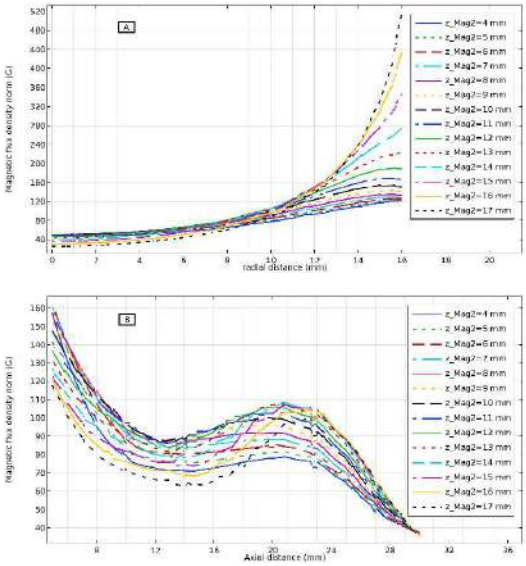
در شکل۲، تغییرات میدان الکتریکی در راستای شعاع و در امتداد محور محفظه، به‌ازای ولتاژ کاتد۲۰- ولت نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار تغییرات محوری و شعاعی میدان الکتریکی (ولت-برسانتی‌متر). محور چپ: تغییرات میدان روی محور محفظه از کاتد تا الکترود بالا و محور راست: تغییرات میدان در راستای شعاع از لبه کاتد تا دیواره محفظه.

در شکل۲، به منظور نمایش همزمان فاصله محوری و شعاعی روی محور افقی نمودار، بجای مقادیر مطلق، از اندازه نسبی این فواصل استفاده شده است. مطابق شکل۲-(الف)، اندازه میدان الکتریکی در مجاورت کاتد بیشینه و با دور شدن از آن به سمت محفظه پلاسما به تدریج کاهش می‌یابد. مطابق شکل۲-(ب)، اندازه میدان الکتریکی در اطراف کاتد بیشینه است و با افزایش فاصله در راستای محور محفظه کاهش می‌یابد. این کاهش میدان تا منطقه میانی محفظه ادامه دارد و با نزدیک شدن به الکترود بالا مجدداً افزایش می‌یابد. در واقع میدان الکتریکی در منطقه میانی دارای کمینه است.

شکل۳، تغییرات چگالی شار مغناطیسی (برحسب گاوس) را در راستای یک شعاع خاص و در امتداد محور محفظه پلاسما، به ازای مقادیر مختلف مکان آهنرباهای میانی نشان می‌دهد. مطابق شکل۳-(الف)، در همه موارد، اندازه چگالی شار مغناطیسی با نزدیک شدن به آهنرباهای جانبی افزایش می‌یابد. مطابق شکل۳-(ب)، در همه موارد، چگالی شار مغناطیسی یک مقدار بیشینه در مجاورت کاتد دارد و با نزدیک شدن به الکترود بالا یک رفتار نوسانی دارد. مطابق این رفتار، اندازه چگالی شار مغناطیسی با دورشدن از کاتد، ابتدا کاهش و در فاصله‌ی دورتر افزایش می‌یابد و نهایتاً با نزدیک شدن به الکترود بالا مجدداً کاهش می‌یابد.



شکل ۳: نمودار تغییرات چگالی شار مغناطیسی (گاوس) به ازای مکان‌های مختلف آهنرباهای میانی، (الف)در راستای شعاع از لبه کاتد تا دیواره محفظه و (ب) روی محور محفظه از کاتد تا الکترود بالا.

تاثیر مکان آهنرباها بر حرکت الکترون

برای بررسی حرکت الکترون در تفنگ الکترونی RCMP، تعداد ۸۰ الکترون با انرژی اولیه ۱ الکترون‌ولت در نظر گرفته شده است. مکان گسیل اولیه الکترون‌ها در قسمت بالای کاتد به صورت دو آرایه خطی در راستاهای x و z تعریف شده است. هر آرایه شامل ۴۰ الکترون است.

به منظور ارزیابی کمی تاثیر مکان آهنرباهای میانی بر قدرت محبوس‌سازی چشمه، در جدول۲ نسبت تعداد الکترون‌های باقی‌مانده در زمان نهایی به تعداد الکترون‌های گسیلی اولیه به ازای مقادیر مختلف مکان آهنرباها نشان داده شده است.

جدول۲: درصد ذرات فعال در پایان شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف مکان آهنرباهای میانی مندرج در جدول۱

ردیف	درصد ذرات فعال (٪)	ردیف	درصد ذرات فعال (٪)
۱	۵۰	۸	۳۶
۲	۴۴	۹	۵۵
۳	۴۵	۱۰	۴۸
۴	۵۰	۱۱	۴۰
۵	۳۸	۱۲	۴۰
۶	۴۴	۱۳	۳۴
۷	۴۵	۱۴	۳۳

مطابق جدول۲، بیشترین درصد ذرات فعال در پایان شبیه‌سازی مربوط به ردیف شماره ۹ و برابر با ۵۵٪ است. بنابراین، بهترین پیکربندی مغناطیسی چشمه پلاسما مربوط به حالتی است که در آن آهنرباهای میانی در فاصله ۱۲ میلی‌متری از صفحه پایه قرار دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا توزیع میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در یک نوع چشمه پلاسما با محصورسازی مغناطیسی چندقطبی حلقوی (RCMP)، به ازای مقادیر مختلف مکان آهنرباهای میانی، محاسبه گردید. نشان داده شد اندازه میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی کاتد به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را دارند. پس از آن، مسیر حرکت الکترون‌ها به ازای مقادیر مختلف مکان آهنرباها ردیابی گردید. نشان داده شد که با قراردادن آهنرباهای میانی در وسط دیواره محفظه پلاسما (در فاصله ۱۲ میلی‌متر از صفحه پایه و ۱۳ میلی‌متر از آهنرباهای بالایی)، قدرت تفنگ الکترونی در محبوس‌سازی الکترون‌ها افزایش می‌یابد.

مرجع‌ها

[1] D. Rafalskyi, A Aanesland, “Brief review on plasma propulsion with neutralizer-free systems”, Plasma Sources Science and Technology. Vol. 25, No. 4, pp. 043001, 2016.

[۲] خسروی، علی، سلحشور، مصطفی، "بررسی حرکت الکترون در تفنگ الکترون پلاسمایی با محصورسازی مغناطیسی چندقطبی حلقوی"، یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی و فیزیک پلاسما، دانشگاه الزهرا، ۲۰۲۴.

[3] COMSOL Multiphysics, AC-DC and Particle Tracing Modules Application Library Manual, Version 6.2, 2024.

بررسی شاردرهم‌تنیدگی و تعداد فوتون اضافی در یک کانال فضای آزاد ارتباطات کوانتومی ماهواره‌ای

سمیرا کاظمی فرد، غلامرضا هنرآسا

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده - حوزه ارتباطات در فضای آزاد قلمرو فناوری‌های ارتباطی است که در آن پراش و اثرات جوی هر دو به تلفات و نویز کمک می‌کنند. ارتباطات کوانتومی که امکان انتقال ایمن اطلاعات کوانتومی را فراهم می اورد، ارتباط نزدیکی با توزیع کلید کوانتومی دارد که کارایی در شاردرهم تنیدگی و تولید کلیدهای کاملا امن را فراهم می‌کند. در این تحقیق برای انتقال اطلاعات از فرستنده (آلیس) به گیرنده (باب) شاردرهم تنیدگی و تعداد فوتون اضافی را بررسی کردیم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه دیافراگم گیرنده، تعداد فوتون اضافی در حالت TLO (نوسان‌ساز محلی منتقل شده) افزایش و در حالت LLO (نوسان‌ساز محلی) کاهش پیدا می‌کند.

کلیدواژه- ارتباطات کوانتومی، ارتباطات کوانتومی ماهواره‌ای، انتقال اطلاعات کوانتومی، توزیع کلید کوانتومی، کانال کوانتومی

Investigating the entanglement flux and the number of additional photons in a free space channel of satellite quantum communications

Samira Kazemifard; Gholamreza Honarasa

s.kazemifard@sutech.ac.ir, honarasa@sutech.ac.ir

Abstract- The field of communication in free space is the domain of communication technologies in which diffraction and atmospheric effects both contribute to losses and noise. Quantum communication, which enables the secure transmission of quantum information, is closely related to quantum key distribution, which provides efficiency in entanglement flux and the generation of completely secure keys. In this research, to transfer information from the sender (Alice) to the receiver (Bob), we investigated the entanglement and the number of additional photons. The results show by increasing the size of the receiver aperture, the number of additional photons increases in TLO (Transmitted Local Oscillator) mode and decreases in LLO (Local Local Oscillator) mode.

Keywords: Quantum channel, Quantum communication, Quantum information transmission, Quantum key distribution, Quantum satellite communication

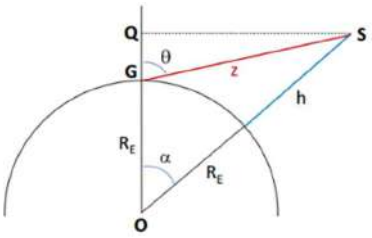
مقدمه

رمزنگاری کوانتومی، یکی از برجسته‌ترین فناوری کوانتومی است. توزیع کلید کوانتومی با سرعت در حال توسعه است و هدف نهایی اشتراک‌گذاری کلید مخفی بین دو کاربر در مسافت زیاد است که برای استراق سمع باید غیر قابل درک باشد، بنابراین می‌تواند کلید بسیار ایمن را ارائه دهد. اولین توزیع کلید کوانتومی ماهواره در سال ۱۹۸۰ میلادی مطرح شد و در دهه اخیر ارتباطات کوانتومی و رمزنگاری کوانتومی را به علم فناوری اطلاعات کوانتومی گسترش یافته است. چالش‌های کلیدی برای سیستم‌هایQKD (Quantum Key Distribution) شامل تعداد فوتون اضافی در ماهواره (Rutherford Appleton Laboratory) که قابلیت توزیع شاردرهم‌تنیدگی با ایستگاه زمینی دارد. این ماهواره در حال حاضر ده‌ها مگا بیت کلید مخفی را در جو زمین توزیع می‌کند. سیستم‌های توزیع کلید کوانتومی با استفاده از کانال کوانتومی در فضای آزاد، بیت‌های کوانتومی را توزیع می‌کند؛ البته اثراتی مانند پراش، نوفه پس‌زمینه، محو شدن و منحرف شدن پرتو به دلیل تلاطم جوی هنوز مشکلات جدی برای فرستنده‌ها و گیرنده‌ها می‌باشند[۱-۵]. ماهواره‌های کوانتومی که به سطح زمین نزدیک هستند می‌توانند تولید کلید مخفی سریع‌تری را ارائه دهند. در این ماهواره‌ها از کانال فضای آزاد استفاده می‌کنند. فناوری این کانال‌ها مزایایی به همراه دارند، به عنوان مثال پهنای باند بالا، بدون تداخل الکترومغناطیسی، استراق سمع و امنیت بیشتر انتقال اطلاعات را می‌توان نام برد. با این وجود جو متلاطم می‌تواند، تاثیر مخربی بر انتقال اطلاعات

داشته باشد[۵]. با گسترش ارتباطات در فضای آزاد، سیگنال‌ها می‌توانند به شدت تخریب شوند و در معرض تلفات نوری بالا قرار گیرند[۳]. لذا در این تحقیق به بررسی شاردرهم‌تنیدگی نسبت به ارتفاع و تعداد فوتون‌های اضافی در گیرنده پرداخته می‌شود.

مبانی نظری

در ابتدا فرض می‌شود ماهواره در مدار دایروی است و با شعاع ثابت نسبت به مرکز زمین قرار گرفته است. طبق شکل ۱ هندسه زمین برای ارتباطات ماهواره‌ای نشان می‌دهد که ماهواره در فاصله شیب ایستگاه زمینی z نسبت به سطح دریا G، زاویه اوج θ، ارتفاع h از سطح زمین قرار دارد.



شکل ۱: هندسه زمین برای ارتباطات ماهواره‌ای[۳]

همچنین ماهواره در زاویه مداری α و شعاع زمین R_E است و ارتفاع آن به صورت رابطه زیر به دست می‌آید[۴]:

$$h=\sqrt{(R_E+h)+(R_E+h_0)(cos^2\theta-1)}-(R_E+H_A)cos\theta \quad (۱)$$

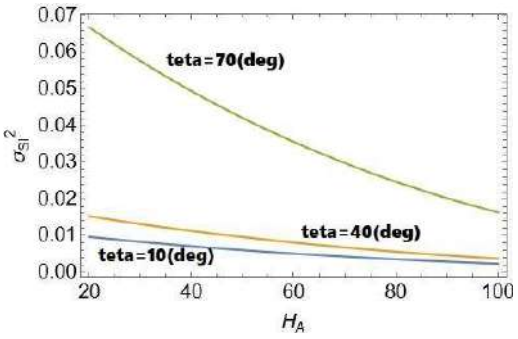
در جو متلاطم، ثابت ساختار ضریب شکت در مسیرهای شیبدار ثابت نیست و با ارتفاع h تغییر می‌کند[۴]:

$$C_n^2(h)=0.00594(v/27)^2(10^{(-5)}h)^{10}exp(-h/1000)$$
$$+2.7\times10^{(-16)}exp(-h/1500)+Aexp(-h/100) \quad (۲)$$

که در آن A مقدار اسمی $C_n^2(h)$ و v سرعت باد در سطح زمین است. پرتو نور در لایه‌های مختلف جو منتشر می‌شود، برای مثال فرض می‌کنیم ایستگاه باب در ارتفاع H_B و ایستگاه آلیس در ارتفاع H_A از سطح دریا است؛ $H_A<H_B$ و $C_n^2(h)$ دیگر ثابت نیستند و با ارتفاع تغییر می‌کنند. سپس به یک نظریه کلی‌تر وابسته به ارتفاع نیاز داریم که به عنوان معیاری برای شاخص واریانس جو متلاطم می‌باشد[۴]:

$$B_R^2(\theta,H_A)=2.25k^{7/6}\sec^{11/6}(\theta)\int_{H_A}^{H_B}dh(h-H_A)^{5/6}C_n^2(h) \quad (۳)$$

در شکل۲ شاخص واریانس نسبت به ارتفاع آلیس در زاویه مختلف اوج بررسی کردیم.



شکل۲: شاخص واریانس نسبت به ارتفاع آلیس در زوایای مختلف اوج

با توجه به شکل۲، با افزایش زاویه اوج θ؛ واریانس B_R^2 کاهش پیدا می‌کند، بنابراین کمترین زاویه را ۱۰ درجه در نظر گرفتیم. علاوه براین، اتلاف نوری کل را می‌توان در جو متلاطم بررسی کرد. انتقال پرتو کل، شامل ضرب سه نوع انتقال پرتو است[۲]:

$$\eta(h)=\eta_{eff}\eta_{atm}(h)\eta_{lt}(h) \quad (۴)$$

در اینجا η_{eff} انتقال پرتو موثر گیرنده است و η_{atm} انتقال پرتو اتلاف در جو متلاطم به صورت رابطه زیر است[۲]:

$$\eta_{atm}(h)=\exp[-\alpha(\lambda,h)h],\alpha(\lambda,h)=\alpha_0(\lambda)e^{-h/6600} \quad (۵)$$

h ارتفاع و α_0 ضریب خاموشی نسبت به سطح دریا است. η_{lt} انتقال پرتو بلند مدت است که به قدرت تلاطم جوی بستگی دارد[۲]:

$$\eta_{lt}(h)=1-e^{\frac{2a_R^2}{w_{lt}^2}} \qquad w_{lt}=w_z\sqrt{1+\frac{4}{3}q\Lambda} \quad (۶)$$

$$\Lambda=\frac{2h}{kw_z^2}\ Q_m=35.05h/(k\ell_0^2)\ q=0.74B_R^2Q_m^{1/6} \quad (۷)$$

که در آن w_z^2 پراش پرتو است و به طور دائم، اندازه و شعاع انحنا پرتو در حال انتشار را افزایش می‌دهد[۲]:

$$w_z^2=w_0^2[(1-\frac{h}{R_0})^2+(\frac{h}{z_R})^2] \qquad z_R=\pi w_0^2/\lambda \quad (۸)$$

با اندازه‌گیری نویز در کانال کوانتومی، می‌توان تلفات و تعداد کل فوتون‌ها در کانال بررسی کرد[۲]. به طور کلی در گیرنده تعداد میانگین کل فوتون داریم[۴]:

$$\bar{n} = \eta_{eff}\bar{n}_{bg} + \bar{n}_{ex} \quad (۹)$$

که در آن $\bar{n}_{bg}$ و $\bar{n}_{ex}$ به ترتیب تعداد فوتون‌های حرارتی پس‌زمینه و تعداد فوتون‌های اضافی تولید شده در گیرنده هستند. $\bar{n}_{bg}$ به چندین عامل مربوط به روشنایی آسمان و اثرات گیرنده بستگی دارد[۴]:

$$\bar{n}_{bg} = \frac{\pi B_{\lambda}^{sky}\Gamma_{rec}}{\hbar\omega} \quad (۱۰)$$

که در آن $\hbar$ ثابت پلانک، ω فرکانس زاویه نور، B_{λ}^{sky} روشنایی آسمان در روز است و Γ_{rec} تمام اثرات گیرنده در رابطه زیر محاسبه می‌شود[۴]:

$$\Gamma_{rec} = \Delta\lambda\Delta t\Omega_{fov}a_R^2 \quad (۱۱)$$

جایی که Ω_{fov} ، $\Delta\lambda$ و Δt به ترتیب میدان دید، پهنای باند طیفی و بازده زمانی آشکارساز است. $\bar{n}_{ex}$ برای دو حالت LLO و TLO اندازه‌گیری می‌شوند. از این رو LO منتقل شده TLO (Transmitted Local Oscillator) نامیده می‌شود و LOسیگنال‌های تولید شده در گیرنده، LLO (Local Local Oscillator) نامیده می‌شود. $\bar{n}_{ex}^{LLo}$ و $\bar{n}_{ex}^{TLO}$ مقادیر مختلفی از تعداد فوتون‌های اضافی که در گیرنده تولید می‌شوند[۴]:

$$\bar{n}_{ex}^{TLO} = \frac{N}{\eta(h)} \quad , \quad \bar{n}_{ex}^{LLO} = N + \frac{\pi\ell_w V_A\eta(h)}{C} \quad (۱۲)$$

$$N = \frac{V_{\det}(NEP)^2 W\Delta t_{LO}}{2\hbar\omega P_{LO}} \quad (۱۳)$$

واریانس مدولاسیون V_A، توان(LO) P_{LO} ، ساعت C، پهنای خط ℓ_w ، پهنای آشکارساز W، توان معادل نویز NEP، مدت زمان پالس Δt_{LO} و واریانس نویز $V_{\det}$ است. به این ترتیب، با بررسی شاردهم‌تنیدگی و انتقال سیگنال از طریق کانال کوانتومی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۵]:

$$\varphi(\eta,\bar{n}) \le -\log_2[(1-\eta)\eta^{\bar{n}}] - h(\bar{n}) \quad (۱۴)$$

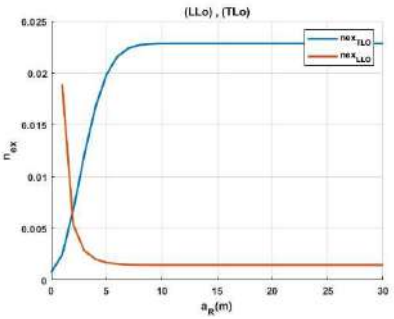
می‌توان از بسط $h(x) = (x+1)\log_2(x+1) - x\log_2 x$ استفاده کرد. بنابراین با توجه به داده‌های جدول ۱ می‌توان شاردرهم‌تنیدگی را نسبت به ارتفاع در حالت TLO بررسی کرد.

جدول۱: مقدار داده‌های محاسبه شده[۱-۵]

$v = 57(m/s)$	$\lambda = 800(nm)$	$R_0 = +\infty$
$W = 100(Hz)$	$\Delta\lambda = 0.1(pm)$	$\Delta t_{LO} = 10(ns)$
$R_0 = +\infty$	$\eta_{eff} = 0.5$	$w_0 = 5(cm)$
$\theta = 10(dg)$	$\Delta t = 10(ns)$	$\ell_0 = 1\times10^{-3}(m)$
$v_{\det} = 1$	$R_E = 6370(km)$	$\alpha_0 = 5\times10^{-6}$
$C = 5(mHz)$	$H_B = 200(m)$	$H_A = 20(m)$
$\hbar = 1.054\times10^{-34}(Js)$	$P_{LO} = 100(mW)$	$NEP = 6(\frac{p\omega}{\sqrt{HZ}})$
$\Omega_{fov} = 10^{-10}(sr)$	$B_{\lambda}^{sky} = 4.75\times10^{-7}$	$A = 2.75\times10^{-14}(m^{\frac{-2}{3}})$

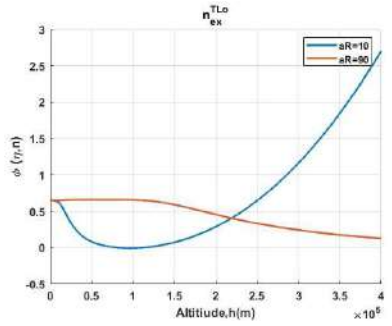
نتیجه و بحث

ابتدا براساس رابطه (۱۲) تعداد فوتون‌های اضافی گیرنده تولید شده در دو حالت LLO و TLO بررسی می‌کنیم. حالت TLO منجر به تولید فوتون‌های اضافی در گیرنده می‌شود. با در نظر گرفتن داده‌های جدول ۱ تعداد فوتون‌ها $\bar{n}_{ex}^{LLo}$ و $\bar{n}_{ex}^{TLO}$ نسبت به اندازه مختلف دیافراگم گیرنده بررسی کردیم که نتایج آن در شکل۳ نشان داده شده است. تعداد فوتون‌های اضافی در حالت $\bar{n}_{ex}^{LLo}$ تا ۶۰ متر اندازه دیافراگم گیرنده، کاهش پیدا کرده است و با افزایش اندازه دیافراگم گیرنده، تعداد فوتون‌های اضافی در این حالت ثابت می‌شود اما برای تعداد فوتون‌های اضافی در حالت $\bar{n}_{ex}^{TLO}$ تا ۹۰متری دیافراگم گیرنده، افزایش پیدا کرده است و با افزایش اندازه دیافراگم گیرنده، تعداد فوتون‌های اضافی در این حالت ثابت می‌شود.

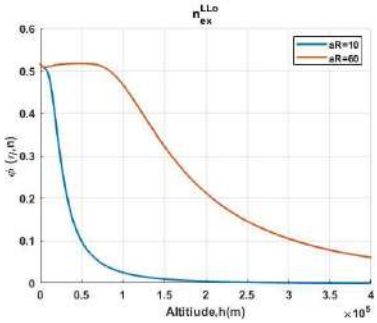


شکل۳: تعداد فوتون‌های اضافی LLO و TLO نسبت به اندازه دیافراگم گیرنده

در شکل۴ شاردرهم‌تنیدگی با دو اندازه دیافراگم گیرنده ۱۰متر(کمترین) و۹۰متر(بیشترین) نسبت به ارتفاع را بررسی کردیم. بنابراین در شکل۴ شاردرهم‌تنیدگی در حالت TLO با اندازه دیافراگم ۱۰متر، بیشترین ارتفاع و با اندازه دیافراگم گیرنده ۹۰متر، کمترین ارتفاع را طی می‌کند. در شکل۵، شاردرهم-تنیدگی مطابق شکل۴ با دو اندازه مختلف اندازه دیافراگم گیرنده بررسی کردیم، بنابراین شاردرهم‌تنیدگی با اندازه دیافراگم گیرنده ۱۰متر کمترین ارتفاع و اندازه دیافراگم گیرنده ۶۰متر بیشترین ارتفاع را طی می‌کند.



شکل۴: شاردرهم‌تنیدگی در حالت TLO با اندازه مختلف دیافراگم نسبت به ارتفاع



شکل۵: شاردرهم‌تنیدگی در حالت LLO با اندازه مختلف دیافراگم نسبت به ارتفاع

نتیجه گیری

در این پژوهش تعداد فوتون اضافی در دو حالت نسبت به ارتفاع دیافراگم گیرنده بررسی کردیم. تعداد فوتون‌های اضافی در حالت TLO با افزایش اندازه دیافراگم گیرنده، افزایش پیدا می‌کند اما شاردرهم‌تنیدگی در حالت TLO با افزایش اندازه دیافراگم گیرنده، ارتفاع کمتری را طی می‌کند. تعداد فوتون اضافی در حالت LLO با افزایش اندازه دیافراگم گیرنده، کاهش پیدا می-کند؛ بنابراین شاردرهم‌تنیدگی در حالت LLO ارتفاع کمتری را طی می‌کند. با افزایش اندازه دیافراگم، مناطق بیشتری برای ورود فوتون‌ها باز می‌شود که تعداد آن‌ها را افزایش می‌یابد، اما ترکیب فوتون‌های ورودی ممکن است منجر به ایجاد حالت‌های مختلف شود که باعث کاهش درهم‌تنیدگی می‌شود.

مرجع‌ها

[۱] J. C. Denton and D. D. Hodson; “A Model to Estimate Performance of Space-Based Quantum Communication Protocols Including Quantum Key Distribution Systems”; Journal of Def Model Simu, vol. 16, No.1, pp.1548-5129, 2019.

[۲] M. Ghalaii and S. Pirandola; “Quantum Communications in a Moderate-to-Strong Turbulent Space”; Communication Physics, vol.5, No.1, pp.2399-3650, 2022.

[۳] S. Pirandola; “Satellite Quantum Communications: Fundamental Bounds and Practical Security”; New Journal of Physics, vol.3, No. 2, pp.2643-1564, 2021.

[۴] M. Ghalaii and S. Pirandola; “Continuous-variable measurement-device-independent quantum key distribution in free-space channels”; Physical Review, vol.108, No. 4, pp.042621, 2023.

[۵] S. Pirandola and R. Laurenza; “Fundamental limits of repeaterless quantum communications”; Nature communications, vol.8, No.1, pp.1-15, 2017.

شناسایی ناخالصی‌های موجود در هروئین با استفاده از طیف‌سنجی رامان

هانیه خالوئی، سید حسن توسلی، ابوالحسن مبشری، اکرم عاملی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – افزودن ناخالصی به مواد مخدر غیرقانونی معضلی پیچیده است که نیازمند به اشتراک گذاری دانش از مطالعات اعتیاد، سم شناسی، جرم شناسی و جنایی است. در این مقاله، طیف‌سنجی رامان به عنوان یک روش سریع و قابل اعتماد برای شناسایی ناخالصی‌های موجود در هروئین معرفی شد. در مجموع ۲۰ نمونه هروئین که توسط پلیس مبارزه با مواد مخدر از مناطق مختلف تهران و کرمان جمع‌آوری شده بود با استفاده از میکروسکوپ رامان که طول موج تحریک آن ۵۳۲ نانومتر بود، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که این روش قادر به شناسایی ناخالصی‌های رایج هروئین (کافئین و استامینوفن)، که به صورت تعمدی و برای افزایش سود به آن‌ها اضافه می‌شوند، است.

کلیدواژه- آنالیز موادمخدر غیرقانونی، طیف‌سنجی رامان، ناخالصی‌های دارویی، هروئین

Identification of Cutting Agent in heroin using Raman spectroscopy

Hanieh Khaloei, Seyed Hassan Tavassoli, Abul Hassan Mobasheri, Akram Ameli

1377hanieh908@gmail.com, h-tavassoli@sbu.ac.ir, mobashery59@gmail.com, ameliakram90@gmail.com

Abstract- The addition of impurities to illicit drugs is a complex problem that requires the sharing of knowledge from addiction, toxicology, criminology, and criminology studies. In this paper, Raman spectroscopy was introduced as a fast and reliable method to identify impurities in heroin. A total of 20 heroin samples collected by the anti-narcotics police from different areas of Tehran and Kerman were analyzed using a Raman microscope whose excitation wavelength was 532 nm. The results showed that this method can identify the common impurities of heroin (caffeine and acetaminophen), which are added to them intentionally to increase profits.

Keywords: Analysis of illegal drugs, Raman spectroscopy, heroin, Cutting Agent

مقدمه

افزایش میزان مصرف مواد مخدر غیرقانونی و پیامدهای آن بر سلامت جسمی و روانی افراد در سال‌های اخیر به یکی از نگرانی‌های اصلی تبدیل شده است. در ایران، گزارش های رسمی حاکی از آن است که در حال حاضر حدود ۲.۱٪ از جمعیت بین ۱۵ تا ۶۴ سال با اختلالات مصرف مواد درگیر هستند که مشکل غالب حدود ۱.۱۲ میلیون نفر (تقریبا معادل ۱.۸٪ از جمعیت) از آن‌ها مصرف مواد افیونی است[۱]. هروئین که با نام دیامرفین یا دی‌استیل مرفین نیز شناخته می‌شود یکی از مشتقات اپیوئیدها است. اپیوئیدها از خشخاش بدست می‌آیند. هروئین که قویترین نوع اپیوئیدها است یکی از مشتقات نیمه مصنوعی مرفین است. هروئین بسیار قدرتمندتر و مخرب‌تر از مرفین است و قدرت اثرگذاری بالایی دارد. در خالص‌ترین شکل، هروئین مانند یک پودر سفید رنگ به نظر می‌رسد اما می‌تواند به رنگ‌های دیگری هم باشد. زمانی که مواد افزودنی دیگر مانند شکر را برای رقیق‌سازی هروئین با آن مخلوط می‌کنند هروئین رنگ‌های دیگری مانند قهوه ای، خاکستری یا حتی سیاه به خود می‌گیرد.

طیف‌سنجی رامان و انواع اصلی آن، به‌عنوان تکنیک‌هایی برای استفاده در آنالیز معمول در سم‌شناسی قانونی پیشنهاد شده‌اند با مزیت اصلی مبتنی بر امکان آنالیز سریع، دقیق، غیرمخرب و بدون معرف[۲]. البته، اغلب نمونه‌های دنیای واقعی به‌طور عمدی یا سهواً توسط یک ماده بسیار فلورسنت آلوده می‌شوند که مانع از تشخیص هدف واقعی توسط طیف‌سنجی رامان می‌شود. به عنوان مثال، یکی از موانع تشخیص و تعیین کمیت موادمخدر غیرمجاز در موادمخدر «خیابانی» وجود آلاینده‌ها و ناخالصی‌هایی مانند آرد، شیرخشک، شکر، بکینگ پودر، کافئین و مواد دیگر است. افزودن ناخالصی به موادمخدر به منظور به حداکثر رساندن سود است. بسته به نوع آلاینده‌ها و ناخالصی‌های مورد استفاده، تشخیص وجود ماده مخدر با طیف‌سنجی رامان ممکن است بسیار دشوار یا حتی غیرممکن باشد [۳]. رقیق‌سازی، با استفاده از مواد غیرفعال، ارزان، در دسترس و مجاز دارویی (قند، نشاسته، کربنات) را می‌توان با تمایل فروشنده برای افزایش سود خود در هر سطح از زنجیره توزیع توضیح داد. در مورد تقلب‌ها، هدف یا ایجاد یک داروی با کیفیت بهتر یا پوشاندن یک محصول بی‌کیفیت با استفاده از موادی با خواص مشابه با داروی غیرقانونی است. در مورد هروئین، می توان به پاراستامول (خواص ضد درد مشابه)،گریزوفولوین (طعم تلخ مشابه)، کافئین، پروکائین و حتی استریکنین (هروئین را در دمای پایین‌تر تبخیر می‌کنند) اشاره کرد [۴].

هدف اصلی این مقاله، توسعه روش کاربردی طیف‌سنجی رامان به عنوان روشی سریع و قابل اعتماد برای شناسایی ناخالصی‌های موجود در هروئین است. در این کار، تعداد۲۰ نمونه هروئین که توسط پلیس مبارزه با موادمخدر تهران و کرمان جمع‌آوری شده بود، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

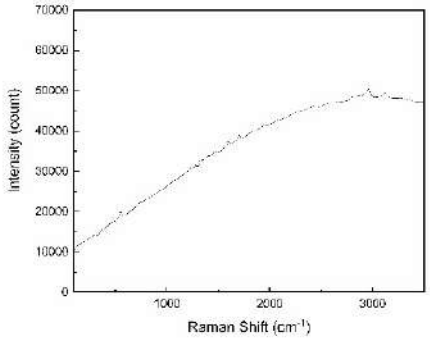
آزمایش روی ۲۰ نمونه هروئین که توسط پلیس مبارزه با موادمخدر از مناطق مختلف تهران و کرمان جمع‌آوری شده بود، انجام شد.

طیف‌ها با استفاده از میکروسکوپ رامان ساخت شرکت تکفام‌سازان طیف نور، جمع‌آوری شد. پراکندگی رامان با لیزر ۵۳۲ nm برانگیخته و از شیئی ×۶۰ برای جمع‌آوری نور پراکنده استفاده شد. این سیستم در محدوده ۱۵۰-۴۰۰۰ cm^{-1} با وضوح فضایی $12cm^{-1}$ کار می‌کند.

بحث و نتایج

تفاوت در شرایط کشت خشخاش، استحصال مرفین و پروسه تولید هروئین و افزودن مواد دارویی و سایر ناخالصی‌ها باعث شده است که پروفایل شیمیایی هروئین‌های مکشوفه متفاوت باشد. از بین تمام نمونه‌های خیابانی هروئین، که توسط پلیس ضبط شده بود، نتایج زیر حاصل شد. هفده مورد از این نمونه‌ها، به دلیل فلورسانس قوی هیچ اطلاعاتی طیفی در اختیار قرار ندادند. این نمونه‌ها قهوه‌ای رنگ بودند و فرض بر این بود که حاوی ناخالصی‌هایی هستند که فلورسانس ایجاد کرده و از شناسایی آن‌ها جلوگیری می‌کند. برای چنین نمونه‌هایی می‌توان از روش‌هایی مانند گروماتوگرافی لایه نازک و کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی استفاده کرد.

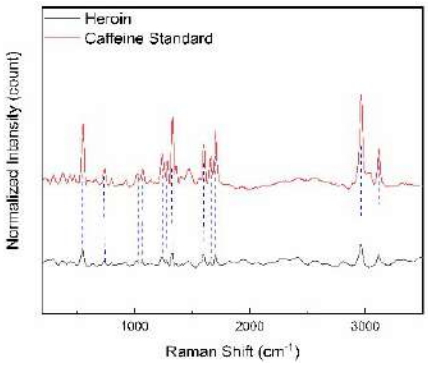
یک نمونه‌ی خیابانی که از کرمان تهیه شده بود، طیف رامانی مطابق شکل۱ شکل۱از خود نشان داد و همانطور که انتظار داشتیم طیف رامان این نمونه فلورسانس زیادی داشت که به علت آلوده شدن نمونه با مواد فلورسنت است.



شکل۱: طیف رامان نمونه خیابانی هروئین

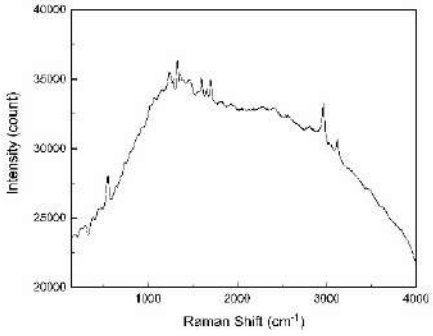
با توجه به قله‌هایی که در طیف این نمونه ظاهر شد و مقایسه با قله‌هایی که در مقالات برای هروئین گزارش شده بود، این نتیجه به دست آمد که طیف به دست آمده مربوط به هروئین نیست. بنابراین با توجه قله‌هایی که در این طیف مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که در این نمونه از کافئین به عنوان ناخالصی استفاده شده است. قله‌های کافئین در ۶۴۴، ۵۵۶ (تغییر شکل O=C-N)، ۷۴۳ (تغییر شکل O=C-C)، ۸۰۲ (تغییر شکل N-C-H)، ۱۰۲۲ (تغییر شکل C-C)، ۱۲۴۲، ۱۲۸۶ (کشش C-N) و ۱۵۹۷cm^{-1} (کشش C=C) قرار دارند[5].

همچنین برای اطمینان بیشتر، استاندارد کافئین تهیه، طیف رامان آن ثبت و با طیف رامان هروئین مقایسه شد، که می‌توان در شکل۲ مشاهده کرد. افزودن کافئین به هروئین باعث می‌شود هروئین در دمای پایین‌تری در هنگام دود کردن تبخیر شود، بنابراین اثربخشی آن به میزان ملایمی افزایش می‌یابد [6].



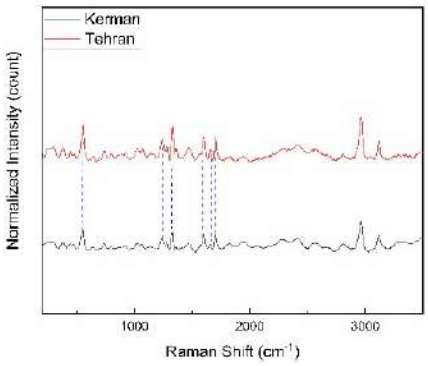
شکل۲: مقایسه طیف رامان هروئین و استاندارد کافئین

در شکل۳ طیف رامان نمونه دیگری از هروئین که از تهران جمع آوری شده بود را نشان می‌دهد.



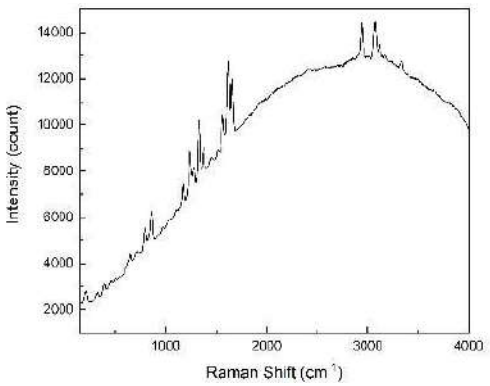
شکل۳: طیف رامان نمونه خیابانی هروئین

طیف رامان این نمونه نیز مانند نمونه قبلی فلورسانس زیادی دارد اما شکل این فلورسانس‌ها با هم تفاوت دارد و این بدین معناست که مواد فلوروفور موجود در این نمونه‌ها با هم تفاوت دارد. مقایسه قله‌هایی که در طیف رامان این دو نمونه نمایان شده است نشان می‌دهد که هر دو نمونه دارای کافئین هستند.



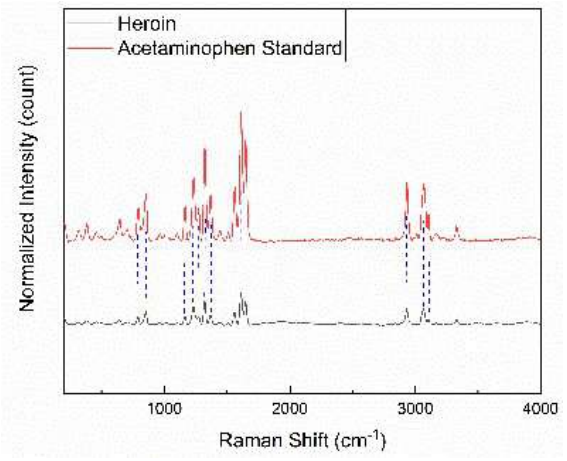
شکل۴: مقایسه طیف رامان دو نمونه خیابانی هروئین کرمان و تهران

همچنین یک مورد دیگر از نمونه‌های مورد بررسی که از تهران جمع‌آوری شده بود طیفی مطابق شکل۵ از خود نشان داد.



شکل۵: طیف رامان نمونه خیابانی هروئین

مقایسه طیفی که از این نمونه جمع‌آوری شده است با طیف نمونه‌های قبلی، تفاوت آن‌ها را نمایان می‌کند. به عنوان مثال دو نمونه‌ی قبلی (شکل‌های ۱ و ۳) در ۵۵۰، ۱۳۲۸ و $۲۹۶۲cm^{-1}$ دارای قله‌های بلندی بودند اما در طیف این نمونه (شکل ۵) این قله‌ها وجود ندارند و بلعکس قله‌هایی مثل ۱۲۳۶، ۱۳۳۰، ۱۶۲۰ و $۱۶۵۲cm^{-1}$ در این نمونه وجود دارد اما در دو نمونه‌ی قبلی نیست. با توجه به قله‌هایی که در طیف رامان این نمونه‌ها مشاهده شد و مقایسه این قله‌ها با قله‌های گزارش شده در مقالات برای استامینوفن این نتیجه حاصل شد که در این نمونه از استامینوفن به عنوان ناخالصی استفاده شده است. باندهای اصلی استامینوفن عبارتند از:۱۶۶۷ (آمید I (C=O))، $۱۶۲۲cm^{-1}$ (N–H)، ۱۵۵۶ (آمید II (کشش C-N، خمش N-H))، $۱۳۲۹cm^{-1}$ (C–H)، $۷۹۹cm^{-1}$ (حلقه فنیل) که همگی در طیف رامان نمونه خیابانی هروئین قابل روئیت هستند [۷]. همچنین مقایسه طیف رامان این نمونه با طیف رامان استاندارد استامینوفن، شکل۶، مهر تاییدی بر این نتیجه‌گیری می‌باشد.



شکل۶: مقایسه طیف رامان نمونه خیابانی هروئین و استاندارد استامینوفن

هروئین طعم تلخی دارد، پاراستامول/استامینوفن ممکن است به دلیل طعم تلخ مشابه، همچنین اثرات ضد درد و نقطه ذوب یکسان با هروئین به عنوان ناخالصی در آن استفاده شود [6].

همچنین برای بررسی صحت نتایج حاصل شده از طیف‌سنجی رامان از روش کروماتوگرافی لایه نازک استفاده شد. که نتایج به دست آمده از این دو روش با یکدیگر مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توانایی طیف‌سنجی رامان در شناسایی ناخالصی‌های موجود در هروئین مورد بررسی قرار گرفت. در این کار ۲۰ نمونه هروئین که از تهران وکرمان جمع‌آوری شده بودند مورد بررسی قرار گرفتند. ۱۷ مورد از این نمونه‌ها به دلیل فلورسانس زیاد قله رامان مشخصی را نشان ندادند. از بین سه نمونه که طیف رامان آن‌ها ثبت شده است، دو نمونه دارای ناخالصی کافئین بودند و یک مورد دیگر حاوی استامینوفن بود. نتایج نشان داد که این تکنیک می‌تواند ناخالصی‌های رایج (کافئین و استامینوفن) در نمونه‌های هروئین را شناسایی کند.

مرجع‌ها

1. Nakhaee, S., et al., Evaluation of urinary trace element levels in patients with opioid use disorder undergoing methadone treatment in western Iran. Scientific Reports, 2024. 14(1): p. 5662.

2. de Oliveira Penido, C.A.F., et al., Raman spectroscopy in forensic analysis: identification of cocaine and other illegal drugs of abuse. Journal of Raman Spectroscopy, 2016. 47(1): p. 28-38.

3. Wei, W.Y. and I.M. White, Chromatographic separation and detection of target analytes from complex samples using inkjet printed SERS substrates. Analyst, 2013. 138(13): p. 3679-3686.

4. Broséus, J., N. Gentile, and P. Esseiva, The cutting of cocaine and heroin: a critical review. Forensic science international, 2016. 262: p. 73-83.

5. Zheng, H., et al., Fabrication of flower-like silver nanostructures for rapid detection of caffeine using surface enhanced Raman spectroscopy. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016. 231: p. 423-430.

6. Solomon, N. and J. Hayes, Levamisole: a high performance cutting agent. Academic forensic pathology, 2017. 7(3): p. 469-476.

7. Borio, V.G., et al., Quantitative evaluation of acetaminophen in oral solutions by dispersive Raman spectroscopy for quality control. Journal of Spectroscopy, 2012. 27(4): p. 215-228.

بررسی ثابت دی الکتریک بلورمایع نماتیک آلاییده با نانوذرات چند فروئیک و فروالکتریک

مریم بیگ محمدی عزیزی[1*]، مهسا خادم صدیق[1]، جعفر پورصمد بناب[1]

مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، ایران

چکیده – در این کار تجربی، مولفه های موازی و عمود ثابت دی الکتریک ($\varepsilon_{\parallel}$ و $\varepsilon_{\perp}$) برای بلورمایع نماتیک E7 و آلاییده شده با دو نانوذره مختلف، بیسموت فریت ($BiFeO_3$) و باریم تیتانات $BaTiO_3$ در دماهای مختلف اندازه گیری شدند. یافته‌ها نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجه در ناهمسانگردی دی الکتریک با وارد کردن نانوذرات به محیط بلورمایع نماتیک است. این نوسانات به صراحت برای دو نانوذره ذکر شده در بالا در غلظت ۰.۱ درصد وزنی مشاهده شد و ثابت دی الکتریک را تغییر داد. بررسی داده های حاصل نشان می دهند که ثابت دی الکتریک بلورمایع نماتیک آلاییده شده با درصد پایین از نانو ذرات را می‌توان کنترل کرد.

کلیدواژه- بلورمایع، ثابت دی الکتریک، بیسموت فریت، باریم تیتانات

Investigating the dielectric constant of nematic liquid crystal doped with multiferroic and ferroelectric nanoparticles

Maryam Beigmohammadi Azizi[*1], Mahsa Khadem Sadigh[1], and Jafar Poursamd bonab[1]

Department of Laser and Optics engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

MaryamBeigmohammadi@gmail.com, JPoursamad@yahoo.com, Mahsa.Sadigh@yahoo.com

Abstract- In this experimental work, the parallel and perpendicular components of dielectric constant ($\varepsilon_{\parallel}$) and ($\varepsilon_{\perp}$) for nematic liquid crystal E7 and contaminated with two different nanoparticles, bismuth ferrite ($BiFeO_3$) and barium titanate ($BaTiO_3$) were measured at different temperatures. The findings show a significant decrease in dielectric anisotropy by introducing nanoparticles into the nematic liquid crystal environment was clearly observed for the two nanoparticles mentioned above at a concentration of 0.1% by weight. Examination of the resulting data shows that the dielectric constant of the nematic liquid crystal doped with a low percentage of nanoparticles can be controlled.

Keywords: Liquid crystal, Dielectric constant, Bismuth ferrite, Barium titanate

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش چشم‌گیری در توسعه دستگاه‌های پیشرفته با استفاده از فناوری‌های فوتونیک و اپتیک وجود داشته است [۳-۱]. بلورهای مایع به عنوان یکی از برجسته ترین مواد در این حوزه برجسته هستند. به طور عمده، ناهمسانگردی نوری و دی الکتریک کریستال‌های مایع نقش محوری در دستگاه‌های الکترواپتیکی و نوری ایفا می کند [۴]. خواص دی الکتریک بلورمایع ها، پاسخ آنها را به میدان های الکتریکی خارجی نشان می‌دهد در حالی که اعمال میدان های الکتریکی باعث جهت-گیری مجدد مولکول های بلورمایع می شود [۵]. در سال‌های اخیر، تمرکز فزاینده‌ای بر روی استفاده از پراکندگی نانوذرات در کریستال‌های مایع برای تنظیم، تقویت و تنظیم ویژگی‌های دی‌الکتریک و نوری آنها صورت گرفته است [۸-۶]. یکی از عناصر حیاتی در بررسی سیستم‌های بلورمایع -نانوذرات، دستیابی به فازهای پراکندگی پایدار نانوذرات است که به نوبه خود پاسخ‌های نوری و الکترواپتیکی مولکول‌های بلورمایع را افزایش می‌دهد[۴].

ترکیب نانوذرات مختلف (نانوذرات با خواص متفاوت از جمله، دی الکتریک، فروالکتریک، فرومغناطیسی، چند فرویی، فلزی و نیمه هادی) می تواند به طور قابل توجهی ویژگی های مواد بلورمایع معمولی را تغییر دهد [۹]. در میان این مواد، نانوذره باریم تیتانات($BaTiO_3$) به دلیل ثابت دی الکتریک بالا و خواص فروالکتریک قوی، یک الکتروسرامیک فوق العاده جذاب است. علاوه بر ترکیب ذرات فروالکتریک، محققان به قلمرو مواد چند فروئیک وارد شده‌اند که خواص فروئیک متعددی از خود نشان می‌دهند و علاقه قابل توجهی را برانگیخته‌اند [۱۱و۱۰]. به عنوان مثال، بیسموت فریت ($BiFeO_3$) خواص فرومغناطیسی و فروالکتریک را در مقیاس نانو آشکار می کند، به ویژه در دمای اتاق، که در آن گشتاورهای الکتریکی و مغناطیسی به طور عمود بر هم جفت می شوند . افزودن نانوذرات $BaTiO_3$ و $BiFeO_3$ در بلورمایع نماتیک E7، پتانسیل قابل توجهی برای تقویت دستگاه های الکترواپتیکی ارائه می دهد[۹]. این مطالعه به بررسی تاثیر نانوذرات فروالکتریک و چند فرویک بر دینامیک مولکولی بلورمایع نماتیک، با تمرکز بر اثرات آنها بر گذردهی دی الکتریک و ناهمسانگردی می پردازد.

مواد و روش‌ها

مواد استفاده شده در این کار تجربی از شرکت مرک و سیگما آلدریچ خریداری شده‌اند و مورد استفاده قرار گرفتند. نانوذره‌ی باریم تیتانات از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شد ولی با توجه به اندازه بزرگ نانوذرات با استفاده از آسیاب گلوله‌ای (Mixer Mill MM 400)، اندازه‌ی آن‌ها را از میکرومتر به ۱۲ نانومتر کاهش دادیم. آسیاب کردن روشی متداول برای تولید مواد در مقیاس نانو از مواد حجیم است. همچنین برای سنتز بیسموت فریت از روش هیدروترمال استفاده نمودیم که در این مقاله به بخش سنتز نمی پردازیم. نانوذره $BiFeO_3$ استفاده شده در این کار تجربی، اندازه ۲۶ نانومتر دارند.

در نهایت، برای بررسی اثرات نانوذرات آلاییده با بلورمایع، سلول‌های موازی و عمود بر هم ساخته شد. این سلول‌ها شامل دو صفحه شیشه‌ای ITO بود که قبل از آزمایش با اتانول، استون و آب دیونیزه به دقت تمیز شدند. سپس لایه ای از پلی وینیل الکل روی صفحات شیشه ای پوشانده شد تا با فرآیند مالش، سلولی موازی به دست آید. علاوه بر این، جهت هموتروپیک مولکول‌های بلورمایع با استفاده از پوشاندن سطوح شیشه‌ای با لسیتین به دست آمد. فضای بین دو صفحه شیشه ای با استفاده از اسپیسرهای کروی تنظیم می شود که ضخامتی برابر ۱۷ میکرومتر دارند.

به خاطر تقارن استوانه‌ای مولکول‌های بلورمایع نماتیک، گذردهی دی‌الکتریک کریستال های مایع به دو مؤلفه‌ی موازی و عمودی ($\varepsilon_{\perp}$،$\varepsilon_{\parallel}$) مجزا می‌شوند. بدین منظور در این پروژه، از سلول بلورمایع با جهت‌دهی موازی برای اندازه‌گیری مؤلفه عمودی ثابت دی‌الکتریک و از سلول با جهت‌دهی عمودی برای اندازه‌گیری مؤلفه موازی ثابت دی‌الکتریک استفاده‌شده است. با چشم‌پوشی از رسانایی لایه ITO و ثابت دی‌الکتریک لایه پلیمری که برای جهت‌دهی مولکول‌های بلورمایع استفاده‌شده است،ثابت‌های دی‌الکتریک از دو رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{c_{\perp}}{c_0} \quad و \quad \varepsilon_{\perp} = \frac{c_{\parallel}}{c_0}$$

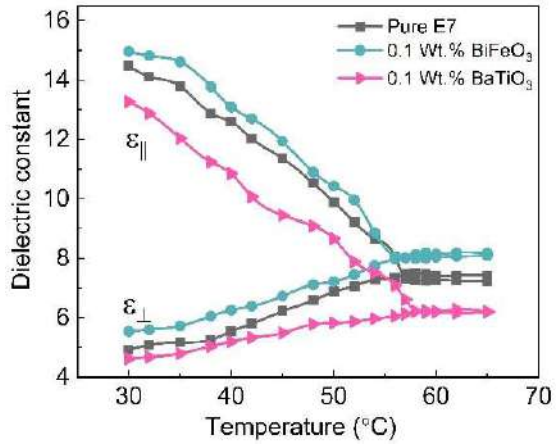
که در این روابط،c_0، $c_{\parallel}$، $c_{\perp}$ به ترتیب ظرفیت مربوط به سلول خالی و سلول با جهت‌دهی موازی و جهت‌دهی عمودی هستند.

برای اندازه‌گیری ظرفیت سلول‌های پر و خالی از دستگاه LCR مدل VICTOR 4091C که دارای دقت اندازه‌گیری ۰/۰۰۰۱ است، استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در دماهای مختلف که شامل دمای قبل و بعد از دمای گذار بلورمایع بود، برای فرکانس ۱۰ کیلوهرتز و ولتاژ ۳۰۰ میلی ولت، برای اندازه گیری ثابت دی الکتریک موازی و عمود بر بلورمایع نماتیک خالص و آلاییده شده با ۰/۱ درصد وزنی از نانوذرات $BiFeO_3$ و $BaTiO_3$ استفاده شد.انجام شد.

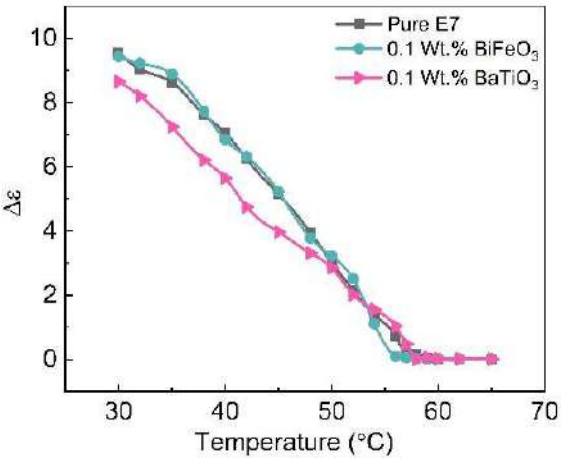
بررسی نتایج

شکل ۱ پاسخ دی الکتریک وابسته به دما بلورمایع E7 را نشان می دهد که با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نانوذرات $BiFeO_3$ و $BaTiO_3$ در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز آلاییده شده است. در اینجا با توجه به اینکه ناهمسانگردی بلورمایع E7 مثبت است طبق نمودار حاصل مقدار $\varepsilon_{\parallel}$ از $\varepsilon_{\perp}$ بیشتر است. در شکل ۱، برای نانوذرات $BaTiO_3$، هر دو $\varepsilon_{\parallel}$ و $\varepsilon_{\perp}$ روند کاهشی را در مقایسه با نمونه خالص نشان می دهند، از سوی دیگر، رفتار متفاوتی برای نانوذرات $BiFeO_3$ مشاهده شد. توجه به این نکته ضروری است که رفتار دی الکتریک بلورمایع نماتیک ها توسط دو عامل اصلی کنترل می شود: قطبیت مولکول‌های سازنده و جهت گیری آنها. ورود ناخالصی‌هایی مانند نانوذرات به این سیستم منظم می‌تواند هم قطبیت و هم جهت مولکولی را مختل کند و در نتیجه بر خواص دی الکتریک تأثیر بگذارد. در اینجا ثابت دی الکتریک نانوذرات $BiFeO_3$ آلاییده شده از نمونه خالص بلورمایع بیشتر می‌شود،در مقابل برای نانوذره $BaTiO_3$ روند کاهشی نسبت به نمونه خالص دارد و می توان به این نتیجه رسید که نوع نانوذره در ثابت دی الکتریک موثر است.

شکل ۲، ناهمسانگردی نانوذرات آلاییده شده با بلورمایع با غلظت ۰/۱ درصد وزنی NP در دماهای مختلف و در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که افزودن نانوذرات $BiFeO_3$ ناهمسانگردی بلورمایع دوپ شده را در مقایسه با نمونه خالص افزایش می دهد. برعکس، $\Delta\varepsilon$ برای نانوذرات $BaTiO_3$ در سیستم کاهش می یابد.



شکل ۱. تغییرات ثابت دی الکتریک بلورمایع آلاییده شده با نانوذرات $BiFeO_3$ و $BaTiO_3$ با ۰/۱ درصد وزنی.



شکل ۲. ناهمسانگردی بلورمایع آلاییده شده با نانوذرات $BiFeO_3$ و $BaTiO_3$ با ۰/۱ درصد وزنی.

نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، افزودن $BiFeO_3$ منجر به افزایش $\varepsilon_{\parallel}$ و کاهش $\varepsilon_{\perp}$ می شود که منجر به افزایش $\Delta\varepsilon$ شده، این نتایج تایید می‌کنند که نانوذرات چند فرویک، مانند بیسموت فریت، نظم جهت‌گیری سیستم را به طور موثرتری نسبت به نانوذرات فروالکتریک، مانند باریم تیتانات، افزایش می‌دهند. نانوذرات مولتی فرویک به افزایش گشتاور دوقطبی کلی سیستم کامپوزیت کمک می کنند که منجر به افزایش ثابت دی الکتریک می شود. پس از آلائیدن این نانوذرات ، گشتاور دوقطبی سیستم NP-NLC افزایش می‌یابد، زیرا برهمکنش‌های دوقطبی نانوذرات به طور مطلوب با ممان‌های دوقطبی مولکول‌های NLC خالص همسو می‌شوند.

هم ترازی گشتاورهای دوقطبی نانوذرات موازی با دوقطبی های مولکولیNLC، گشتاور دوقطبی خالص سیستم را افزایش می دهد و به طور بالقوه ناهمسانگردی دی الکتریک نمونه بلورمایع پراکنده با نانوذرات را افزایش می دهد. طبق نظریه مایر و مایر، افزایش هر دو پارامتر گشتاور دوقطبی و نظم منجر به افزایش متناظر در ناهمسانگردی دی الکتریک می شود. بنابراین، آلاییده شدن بلورمایع ها با نانوذرات $BiFeO_3$ چگالی مولکولی را کاهش می دهد اما نظم جهت گیری را در فاز نماتیک افزایش می دهد.

مرجع‌ها

[1] Yang, S., Wang, J., Yang, B., Chi, H., Ou, J., Zhai, Y., & Li, Q., "A serial digital-to-analog conversion based on photonic time-stretch technology", Optics Communications, 510, 127949, 2022.

[2] Ferhati, H., Djeffal, F., Saidi, A., Benhaya, A., & Bendjerad, A., "Effects of annealing process on the structural and photodetection properties of new thin-film solar-blind UV sensor based on Si-photonics technology", Materials Science in Semiconductor Processing, 121, 105331, 2021.

[3] Zhang, L., Tang, Y., & Tong, L.,"Micro-/Nanofiber Optics: Merging Photonics and Material Science on Nanoscale for Advanced Sensing Technology", iScience, 23(1), 2020.

[4] Singh, D., Singh, U. B., Dhar, R., Dabrowski, R., & Pandey, M. B., "Enhancement of electro-optical and dielectric parameters of a room temperature nematic liquid crystalline material by dispersing multi-walled carbon nanotubes", Liquid Crystals, 48(3), 307–312, 2021.

[5] Singh, U. B., Dhar, R., Dabrowski, R., & Pandey, M. B., " Enhanced electro-optical properties of a nematic liquid crystals in presence of BaTiO3nanoparticles", Liquid Crystals, 41(7), 953–959, 2014.

[6] Kopčanský, P., Timko, M., Studenyak, I. P., Kovalchuk, O. V., Oleinikova, I. V., & Kovalchuk, T., "MDielectric properties of 6CHBT liquid crystals with carbon nanotubes modified by COOH group and nanocomposites on their base", Journal of Molecular Liquids, 227, 61–65, 2017.

[7] Khadem Sadigh, M., Naziri, P., Ranjkesh, A., & Zakerhamidi, M. S.," Relationship of pitch length of cholesteric liquid crystals with order parameter and normalized polarizability", Optical Materials, 119(111373), 111373, 2021.

[8] Gaur, D. K., Agrahari, K., Singh, B. P., Alam, M. B., Parmar, A. S., Manohar, R., & Singh, S.," Optical properties and zeta potential of polyvinyl pyrrolidone capped gold nanoparticles dispersed nematic liquid crystal mixture E7", Optical Materials, 145(114317), 114317, 2023.

[9] Beigmohammadi, M., Khadem Sadigh, M., & Poursamad, J., "Dielectric anisotropy changes in MBBA liquid crystal doped with barium titanate by a new method", Scientific Reports, 14(1), 5756, 2024.

[10] Beigmohammadi, M., Bonab, J. P., & Sadigh, M. K. "Controlling the dielectric constant values of nematic liquid crystals using ferroelectric and multiferroic nanoparticles", Optical Materials, 157, 116332, 2024.

[11] Eerenstein, W., Mathur, N. D., & Scott, J. F., "Multiferroic and magnetoelectric materials", Nature, 442(7104), 759–765. , 2006.

ساخت نانوذرات مگنتو پلاسمونیک سطحی طلا-نیکل با تابش لیزر اگزایمر ArF

محدثه عربی [۱]، سمیه پناهی‌بخش *[۲] و مریم علیان‌نژادی [۱]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، ایران

[۲] پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی،پژوهشگاه علوم وفنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله، نانوساختارهای طلا-نیکل با استفاده از تابش دهی نمونه های لایه نازک دوفلزی طلا-نیکل توسط تابش لیزر اگزایمر ArF با طول موج ۱۹۳ nm و پهنای زمانی۱۵ ns بدست آمد. تابش دهی در شار انرژی ۷۰ mJ/cm^2 و با تعداد ۱۰ پالس لیزری انجام شد. تصاویر FESEM نانوساختارها، نمودار توزیع اندازه ذرات، طیف جذب اپتیکی و طیف رامان رودامین B در حضور نانوساختارها بدست آمد. نتایج این مقاله در کاربردهای پلاسمونیکی نظیر حسگری و SERS اهمیت دارد.

کلیدواژه- لیزر اگزایمر، لایه نازک دوفلزی، نانوساختار پلاسمونی، نیکل، طلا

Fabrication of gold-nickel surface magnetoplasmonic nanoparticles by ArF excimer laser irradiation

Mohadeseh Arabi[1], Somayeh Panahibakhsh[2*], Maryam Aliannezhadi[1]

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

[2] Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Mohadeseh.arabi@semnan.ac.ir, spanahi@aeoi.org.ir , m_aliannezhadi@semnan.ac.ir

Abstract – In this paper, gold-nickel nanostructures were obtained by irradiating thin gold-nickel bimetallic film samples with ArF excimer laser radiation with a wavelength of 193 nm and a time width of 15 ns. Irradiation was performed at an energy flux of 70 mJ/cm^2 and with 10 laser pulses. FESEM images of the nanostructures, particle size distribution diagram, optical absorption spectrum and Raman spectrum of rhodamine B in the presence of the nanostructures were obtained. The results of this paper are important in plasmonic applications such as sensing and SERS.

Keywords: Excimer laser, Thin metal layer , Plasmonic nanostructure , nickel , gold

مقدمه

نانوذرات دوفلزی به دلیل ماهیت ترکیبی و اثرهم افزایی ویژگی های دو فلز و کاربردهایشان، جایگاه امیدوارکننده‌ای در زمینه فناوری نانو دارند[1]. خواص منحصر به فرد نانوذرات دوفلزی می‌تواند بسته به فلزات مورد استفاده و نوع ترکیبات دوفلزی متفاوت باشد[2]. سیستم های دو فلزی مگنتوپلاسمونیک بسیار جالب هستند زیرا آنها عملکردهای مغناطیسی و پلاسمونیکی را در یک نانوماده واحد ترکیب می کنند و امکانات بسیار زیادی را برای تنظیم هر دو ویژگی نشان می دهند [3]، نانوذرات دوفلزی طلا-نیکل Au-Ni به عنوان یکی از انواع نانومواد دو فلزی، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که آنها را برای کاربردهای مختلف در زمینه‌های فناوری نانو، الکترونیک، پزشکی و اپتیک جذاب می‌کند. طلا به عنوان یک فلز مقاوم در برابر اکسیداسیون و خوردگی، می‌تواند پایداری را به نانوذرات اضافه کند. نیکل خواص مغناطیسی دارد و می‌تواند به نانوذرات ویژگی‌های خاصی در حوزه‌های مغناطیسی اضافه کند. ترکیب طلا و نیکل می‌تواند هدایت الکتریکی بهتری نسبت به هر یک از فلزات به تنهایی داشته باشد. در نانوذرات طلا، اثرات پلاسمونیک باعث جذب و پراش نوری در نوارهای خاصی می‌شود، در حالی که نیکل نیز می‌تواند ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی را به نانوذرات اضافه کند. طیف گسترده ای از کاربردهای متنوع، شامل کاربردهای کاتالیزوری [4]، افزایش سطح پراکندگی رامان [5]، بهبود یا اصلاح اثرات مغناطیسی نوری[6] و انواع کاربردهای زیست پزشکی[7] با ترکیب این فلزات میسر است. اگرچه این نانوذرات بسیار امیدوارکننده هستند، روش های سنتز اغلب بسیار چالش برانگیز هستند.

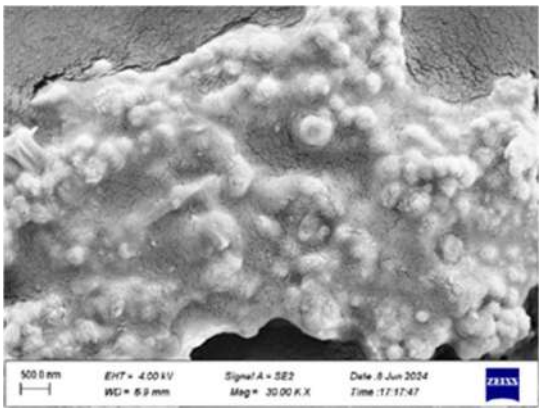
در این مقاله با روش تابش لیزری بر سطح لایه های نازک دو فلزی نانوذرات سطحی تشکیل می شوند که یک روش ساده، مستقیم و بدون تولید آلاینده های شیمیایی است. پلی‌اتر سولفون [1] (PES) یک نوع پلیمر حرارتی با خواص فوق‌العاده در زمینه‌های مختلف صنعتی و علمی است. این پلیمر به دلیل ویژگی‌های خاص خود، به عنوان زیرلایه در کاربردهای متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نانوذرات و لایه‌های نازک، PES به عنوان زیرلایه‌ای برای ادغام و رشد نانوذرات، پوشش‌های نازک و دیگر نانوساختارها به کار می‌رود.

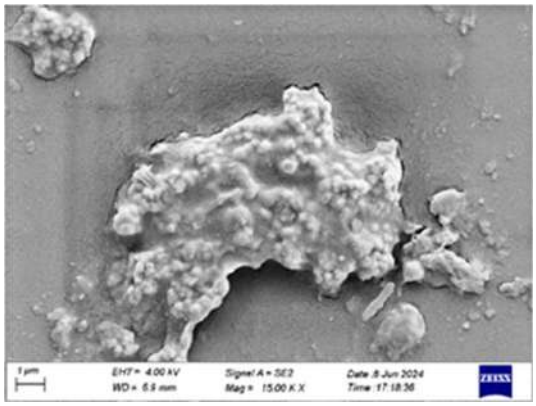
آزمایش

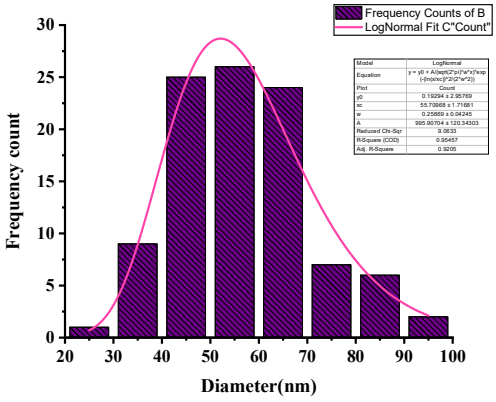
در این پژوهش، نمونه لایه نازک دوفلزی طلا –نیکل تهیه شد. بدین منظور، زیرلایه دی الکتریک از جنس‌پلی اتر سولفون (PES) به صورت دیسک نازک با قطر ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شد و سپس لایه‌نشانی از دو فلز مورد نظر روی زیر لایه ها انجام شد. لایه نشانی با استفاده از دستگاه لایه‌نشانی Balzers مدل Ba510 با نرخ انباشت (A°/S) ۰/۵و فشار خلاء 2×10^{-5} Torr انجام شد. برای لایه نشانی فلزات مورد نیاز با درصد خلوص بالاتر از ۹۹/۹۹۵ تهیه شدند و ابتدا لایه‌نشانی از فلز نیکل با ضخامت ۵۰ نانومتر بر روی زیرلایه انجام شد و پس از آن یک لایه ۵۰ نانومتری از فلز طلا روی لایه اول لایه‌نشانی شد و نمونه لایه نازک دو فلزی ۱۰۰ نانومتری حاصل گردید. در ادامه برای ایجاد نانوذرات دوفلزی سطحی نمونه تحت تابش ۱۰ تپ لیزر اگزایمر ArF مدل ۲۰۰ Lambda Physik X با طول موج ۱۹۳ نانومتر ، شار انرژی لیزر $70mJ/cm^2$ ،پهنای پالس ۱۵ ns، ونرخ تکرار 1Hz قرار گرفت. برای مطالعه‌ی مورفولوژی نمونه تصویر برداری با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی [2] (FESEM) مدل Sigma300-HV انجام شد و برای بررسی میزان عناصر در نمونه از Mapping آنالیز EDAX استفاده شد. برای مشخصه‌یابی طیف اپتیکی نمونه‌ها از طیف سنجی بازتابی[3] (DRS) مدل Avaspec-2048-TEC استفاده شد.

نتایج و بحث

در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) نمونه در دو بزرگنمایی متفاوت 500nmو 1µm و نمودار ستونی توزیع نانوذرات نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین قطرنانوذرات حدود ۵۰ نانومتر است و توزیع ابعاد بازه ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر را در برمی گیرد.

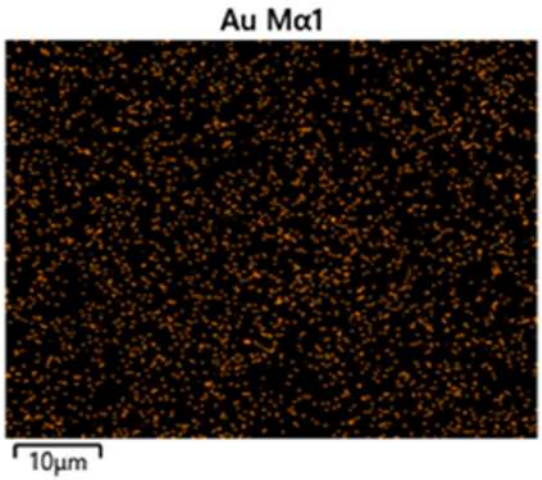


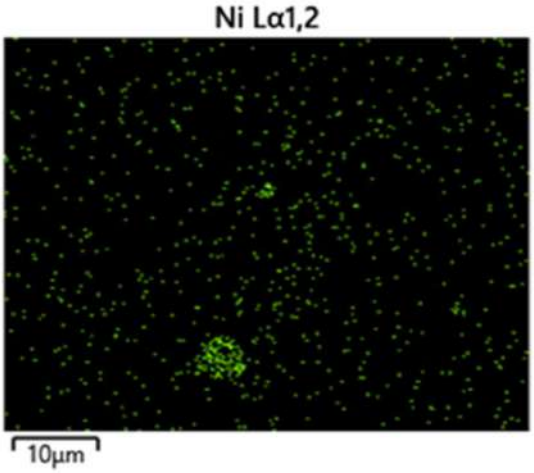




شکل۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و نمودار ستونی توزیع قطر نانوذرات و تابع Log-Normal برازش شده به نمودار ستونی برای نانوذرات طلا-نیکل ایجاد شده با تابش ۱۰ پالس لیزر اگزایمر و شار انرژی ۷۰ mJ/cm2 .

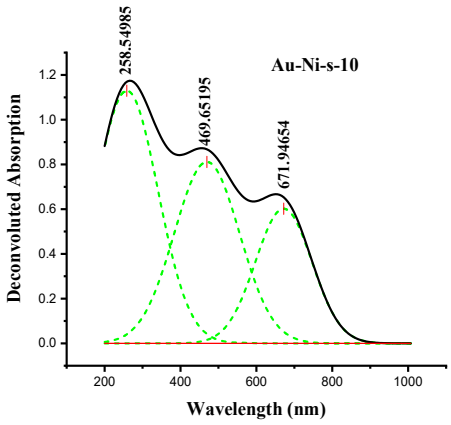
شکل ۲ توزیع هر یک از فلزات را نشان می دهد. فلز طلا تراکم بیشتری در سطح نمونه دارد اما فلز نیکل در مواردی حالت توده ای نشان می دهد.





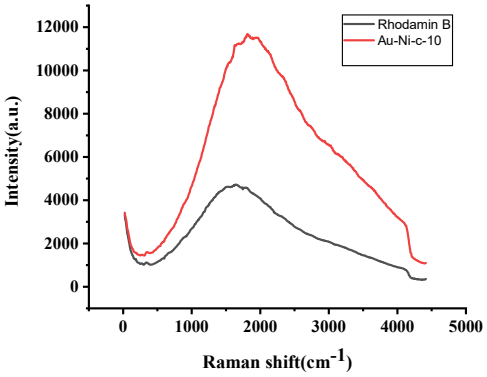
شکل ۲: توزیع اتم‌های طلا ،نیکل برای نمونه با تابش۱۰ پالس لیزر اگزایمر و شار انرژی $۷۰mJ/cm^2$.

شکل ۳ نمودارجذب طلا-نیکل در محیط هوا با تابش ۱۰ پالس لیزر اگزایمر با شارانرژی $۷۰ mJ/cm^2$ را نشان می‌دهد. سه قله جذب اصلی برای نمونه مشاهده می شود که در طول موج های ۲۸۵/۵ ، ۴۶۹/۶ و ۶۷۱/۹ نانومتر می باشند. دو قله جذبی در ناحیه مرئی و یک قله در ناحیه فرابنفش که توزیع مناسبی را برای کاربردهای فوتونیکی، اپتیکی و پزشکی فراهم می کند.



شکل۳: نمودار جذب نمونه دو فلزی با تابش ۱۰ پالس لیزر اگزایمر و شار انرژی ۷۰ mJ/cm² برای نمونه‌های Au-Ni بر روی زیر لایه پلی اتر سولفون.

در شکل (۴) طیف رامان رودامین B با غلظت بسیار پایین 10^{-4} مولار در حضور نمونه‌های Au-Ni به‌عنوان زیر لایه و بدون حضور نمونه نشان داده شده است. مقایسه دو طیف نشان می دهد نانوساختارهای مگنتوپلاسمونیکی طلا-نیکل سطحی بدست آمده اثر بسیار مهمی بر طیف رامان رودامین نشان می دهند و در غلظت های بسیار پایین نیز طیف مناسبی از رودامین B نشان می دهند و لذا این نمونه برای کاربرد SERS نیز بسیار مناسب می باشد.



شکل۴: طیف رامان رودامین B (10^{-4} M) درحضورو عدم حضور نمونه Au-Ni-10 ، با ۱۰ پالس لیزر اگزایمر بر روی زیر لایه پلی اتر سولفون با شار انرژی ۷۰ mJ/cm²

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ایجاد نانوذرات مگنتوپلاسمونیک دو فلزی با استفاده از تاش لیزر به لایه نازک دو فلزی طلا-نیکل با استفاده از تابش لیزر اگزایمر با تابش ۱۰ پالس لیزری و شار انرژی لیزر ۷۰mJ/cm² مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات دوفلزی با میانگین ابعاد ۵۰ نانومتر و در گستره ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر دارای سه قله اصلی در ناحیه مرئی و فرابنفش حاصل شدند. نتایج طیف سنجی رامان رودامین B نشان داد در حضور نمونه طیف رامان و قله های آن به شدت افزایش می یابد.

مرجع‌ها

[1] A. L. Padilla-Cruz, J. A. Garza-Cervantes, X. G. Vasto-Anzaldo, G. García-Rivas, A. León-Buitimea and J. R. Morones-Ramírez, Scientific Reports 11 (1), 5351 (2021).

[2] S. Das, B. Satpati, T. S. Bhattacharya and T. Bala, Nano-Structures & Nano-Objects 22, 100438 (2020).

[3] L. Wang, C. Clavero, Z. Huba, K. J. Carroll, E. E. Carpenter, D. Gu and R. A. Lukaszew, Nano letters 11 (3), 1237-1240 (2011).

[4] J. Xiang, P. Li, H. Chong, L. Feng, F. Fu, Z. Wang, S. Zhang and M. Zhu, Nano Research 7, 1337-1343 (2014).

[5] Y. Wang, Q. Liu, Y. Sun and R. Wang, Nanoscale 10 (26), 12650-12656 (2018).

[6] J. B. González-Díaz, A. García-Martín, J. M. García-Martín, A. Cebollada, G. Armelles Reig, B. Sepúlveda, Y. Alaverdyan and M. Käll, (2008).

[7] G. Y. Karaca, F. Kuralay, E. Uygun, K. Ozaltin, S. E. Demirbuken, B. Garipcan, L. Oksuz and A. U. Oksuz, ACS Applied Nano Materials 4 (4), 3377-3388 (2021).

ساخت یک افزاره نور گسیل پروسکایتی انعطاف پذیر با استفاده از لایه پلیمری پلی(متیل متاکریلات)

فائزه طالبی فر، عزالدین مهاجرانی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده – مواد پروسکایتی با داشتن ویژگی‌هایی از جمله خلوص رنگ بالا، شکاف نوری قابل تنظیم و قابلیت انعطاف پذیری برای استفاده در بسیاری از دستگاه‌های الکترونیکی و نوری از جمله افزاره‌های نور گسیل پروسکایتی انعطاف پذیر (FPeLED) مورد توجه قرار گرفته‌اند. در حال حاضر روش‌های گوناگونی جهت بهبود ویژگی‌های سطحی و نوری لایه‌های انعطاف پذیر پروسکایتی رو به گسترش است، از جمله استفاده از لایه‌های پلیمری. در این مقاله، ما با استفاده از ساختار PET ITO/ PEDOT: PSS/ PVK/ $MAPbBr_3$/ PMMA/ Ag و لایه پلیمری پلی(متیل متاکریلات) با ضخامت ۱ میکرومتر موفق به ساخت یک افزاره انعطاف پذیر شدیم که تحت ۲۰ خمش متوالی ویژگی‌های اولیه خود از جمله نورتابی الکتریکی را حفظ می‌کند.

کلیدواژه- پروسکایت، پلیمر(پلی متیل متاکریلات)، افزاره نورگسیل انعطاف پذیر.

Construction of a Flexible Perovskite light-emitting diode with Using poly(methyl methacrylate)

Faezeh Talebifar, Ezeddin Mohajerani

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

faezehtalebifar1377@gmail.com , e-mohajerani@sbu.ac.ir

Abstract- Perovskite materials with features such as high color purity, adjustable optical gap, and acceptability for use in many electronic and optical devices, including light emitting devices, have received attention. Currently, various methods are being developed to improve the surface and optical properties of perovskite transparent layers, including polymer layers. In this paper, we succeeded in making an acceptable effect under 20 bending by using the structure of PET ITO/ PEDOT: PSS/ PVK/ $MAPbBr_3$/ PMMA/ Ag and poly(methyl methacrylate) polymer layer with a thickness of 1 μm. The sequence retains its primary characteristics, including Electroluminescence.

Keywords: Perovskite, PMMA, Flexible Perovskite light-emitting diode.

مقدمه

انعطاف پذیری افزاره‌های نورگسیل در حال تبدیل شدن به یک فناوری حیاتی و واضح برای کاربردهای نوری مختلف در نمایشگرها، حسگرها و دستگاه‌های نوری است. این منابع عمدتا از روشنایی نسبتا کم، زمان پاسخ آهسته و راندمان نوری کم رنج می‌برند[۱]. در این راستا افزاره‌های نورگسیل پروسکایتی انعطاف پذیر امیدوارکننده هستند، زیرا بسیار انعطاف پذیر بوده و کنتراست و کارایی رنگی بالایی دارند. همچنین با خواص نوری و الکتریکی که دارند توانسته‌اند این فناوری‌ها را از نظر کارایی، طول عمر و خلوص رنگ ارتقا دهند[۲].

مواد پروسکایتی ترکیباتی امیدوارکننده برای استفاده در بسیاری از زمینه ها از جمله لایه‌های فوتواکتیو، سلول‌های خورشیدی،افزاره‌های نورگسیل انعطاف پذیر و فوتودتکتورها هستند. این مواد دارای مزایای منحصر به فردی از جمله ضریب جذب بالا، محدوده طول موج گسترده و شکاف باند قابل تنظیم هستند. این مواد به راحتی در محلول پردازش می‌شوند و این فرایند به دمای بالایی نیاز ندارد. اگر چه این ویژگی‌ها پروسکایت را به ماده‌ایی کاربردی برای استفاده در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی مهم تبدیل کرده است، اما دستیابی به یک لایه پروسکایت انعطاف پذیر با ویژگی‌های نوری قابل قبول در حین خمش‌های متوالی دشوار است[۳-۴].

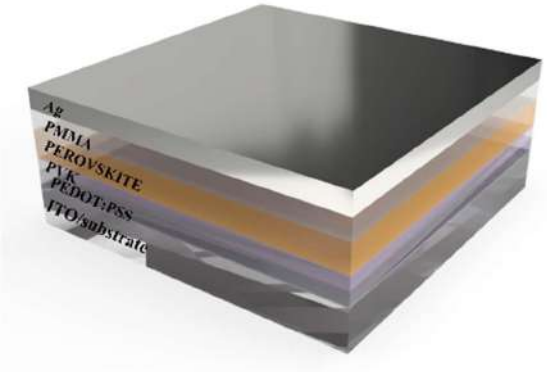
گزارش‌ها حاکی از آن است که استفاده از یک لایه پلیمری در بهبود خواص لایه نور گسیل انعطاف پذیر نقش مهمی دارد. در اینجا، ما با استفاده از ساختار بهینه PET ITO/ PEDOT: PSS/ PVK/ $MAPbBr_3$/ PMMA/ Ag و لایه پلیمری پلی(متیل متاکریلات) با ضخامت ۱ میکرومتر موفق به ساخت یک افزاره نور گسیل پروسکایتی انعطاف پذیر شدیم که پس از ۲۰ خمش متوالی با شعاع ۱ سانتی متر ویژگی‌های نوری اولیه را حفظ می‌کند.

بخش تجربی

لایه پلی اتیلن ترفتالات پوشیده شده با اکسید قلع ایندیم(ITO) را با ابعاد 2 × 1.5 سانتی متر برش داده و سپس آن را بر روی یک زیر لایه شیشه‌ای می چسبانیم. پوشش اولیه پلاستیکی را از روی سطح اکسید قلع ایندیم جدا کرده و آن را به مدت ۳۰ دقیقه تحت تابش دستگاه UV-Ozone قرار می دهیم. محلول پلی (۴،۳-اتیلن دی اکسی تیوفن) - پلی (استایرن سولفونات) (PEDOT: PSS) را روی PET ITO با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه پوشش داده شد و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه پخت شد. سپس محلول پلی (۹-وینیل کربازول) (PVK) با غلظت ۱۰ میلی گرم در ۱ سی سی کلروبنزن با چرخش ۳۰۰۰ دور در دقیقه پوشش داده شد و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه پخت شد. در ادامه ۱۰۰ میکرولیتر از محلول متیل آمونیوم سرب برماید ($MAPbBr_3$)(۳۰ درصد وزنی در حلال دی متیل فرمامید(N,N-Dimethylmethanamide)) به روش لایه نشانی دورانی با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه بر روی PVK لایه نشانی و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۸۵ درجه سانتی گراد پخت شد. در نهایت محلول PMMAبا غلظت۱۰ میلی گرم بر ۱ سی سی کلروبنزن به روش لایه نشانی غوطه وری استفاده کردیم به این صورت که افزاره با سرعت ۱ سانتی متر بر ثانیه غوطه ور و خارج می‌شود و سپس در دمای ۷۵ درجه سانت ی گراد به مدت ۳۰ دقیقه پخت می‌شود. در انتها چسب نقره به عنوان الکترود بالایی توسط روش دکتر بلید لایه نشانی شد.

نتایج و بحث

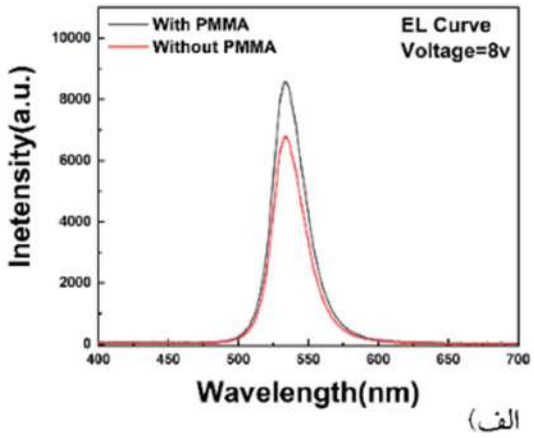
ساختار نشان داده شده در شکل ۱ برای ساخت افزاره نور گسیل پروسکایتی انعطاف پذیر(FPeLED) استفاده شده است. این ساختار براساس تجربیات و آثار گزارش شده انتخاب شده است.



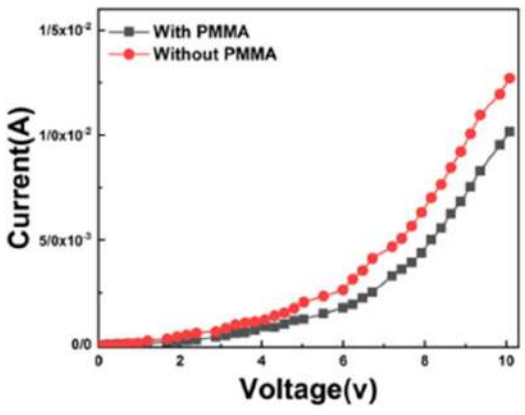
شکل ۱: شماتیک ساختار افزاره نور گسیل پروسکایتی

همانگونه که در شکل۲-الف مشاهده می شود، استفاده از لایه پلیمری PMMA باعث افزایش شدت پیک EL شده که این ناشی از کاهش مراکز نوترکیبات غرتشعشعی است. این پوشش کامل

سطح، جریان نشتی ناشی از تماس مستقیم الکترودها را به حداقل می رساند و از طرفی تزریق الکترون‌های اضافی را محدود کرده و موجب ایجاد تعادل می‌گردد. این لایه پلیمری به عنوان یک مانع برای حامل‌های بار عمل می کند و مانع تزریق بیش از حد بار می‌شود و ولتاژ روشن شدن دیوایس را مطابق شکل ۲-ب اندکی افزایش می دهد. لایه پلیمری PMMA همانند یک لایه محافظتی عمل می‌کند و از لایه پروسکایت در مقابل ترک خوردگی تحت خمش‌های متوالی محافظت می کند، به عبارت دیگر نه تنها از لایه پروسکایتی در مقابل عوامل محیطی و تخریب محافظت می کند، بلکه در بهبود حرکت بارها و خواص نوری نقش مهمی دارد.



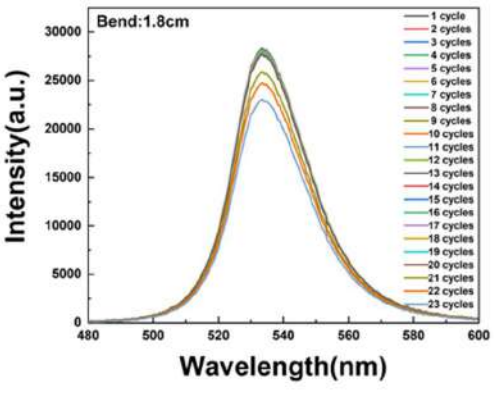
الف)



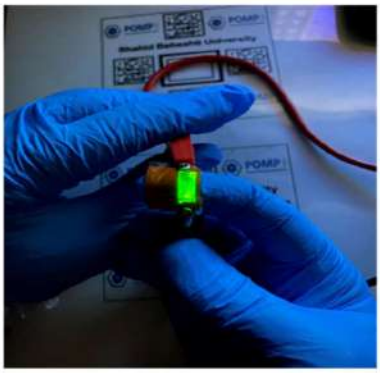
ب)

شکل ۲: الف) نمودار EL و ب) نمودار I-V

همانگونه که در شکل ۳-الف و ب مشاهده می کنید، این لایه باعث حفظ ساختار افزاره می‌شود به گونه‌ایی که پس از ۲۰ خمش متوالی بازدهی نورتابی الکتریکی خود را حفظ می‌کند و پس از آن به علت نشتی جریان شدت پیک EL کاهش می‌یابد.



الف)



ب)

شکل ۳: الف) نمودار EL تحت خمش‌های متوالی و ب) عکس افزاره نور گسیل پروسکایتی انعطاف پذیر.

نتیجه‌گیری

افزاره های نورگسیل پروسکایتی انعطاف پذیر از آنجایی که تحت خمش‌های متوالی قرار می گیرند، پس از هر بار خمش یکسری ترک‌ها در سطح لایه‌های افزاره از جمله لایه کریستالی پروسکایت ایجاد می‌شود که باعث کاهش عملکرد افزاره می‌شود. در اینجا ما با استفاده از یک لایه پلیمری PMMA که نقش یک لایه محافظتی را نیز دارد، اثرات تخریبی این خمش‌ها را کاهش می‌دهیم. به این صورت که این پلیمر بر روی سطح زیر خود به صورت یکنواخت پخش می‌شود و تاثیر قابل توجهی در کاهش جریان نشتی و همچنین جلوگیری از اتصال کوتاه بین الکترودها دارد. این لایه پلیمری باعث می شود افزاره تا ۲۰ خمش متوالی تا حدود زیادی عملکرد خود را حفظ کند.

مرجع‌ها

[1] Zhou, Y., et al., A brief review on metal halide perovskite photocatalysts: History, applications and prospects. Journal of Alloys and Compounds, 2022. 911: p. 165062.

[2] Zhou, Yuanming, Sijiong Mei, Junjie Feng, Dongwei Sun, Fei Mei, Jinxia Xu, and Xianan Cao. "Effects of PEDOT: PSS: GO composite hole transport layer on the luminescence of perovskite light-emitting diodes." RSC advances 10, no. 44 (2020): 26381- 26387.

[3] Wang, Z., et al., Encapsulation-enabled perovskite–PMMA films combining a micro-led for high-speed white-light communication. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021. 13(45): p. 54143-54151.

[4] Kumar, G.S., B. Pradhan, T. Kamilya, and S. Acharya, Enhancing performances of hybrid perovskite light emitting diodes with thickness controlled PMMA interlayer. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2018. 91(8): p. 1241-1248.

طراحی یک حسگر زیستی برای تشخیص سلول‌های سرطانی بدون نیاز به طیف‌سنجی موج خروجی

فهیمه کرمی قره‌قشلاقی[۱]، کاظم جمشیدی قلعه[۲]، علی‌اصغر مظلوم[۲]

[۱] گروه آموزش فیزیک، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹ - ۱۴۶۶۵، تهران، ایران

[۲] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده – شناسایی به موقع سلول‌های سرطانی، در موارد بسیاری نقش حیاتی داشته و احتمال بهبودی کامل را افزایش می‌دهد. برای این منظور، طراحی کیت‌های شناسایی ارزان، غیرتهاجمی و با کاربرد آسان مورد توجه بسیاری است. در این کار، طرح یک کیت شناسایی انواع سلول‌های سرطانی، همچون سرطان خون، سینه، پوست، دهانه رحم و غده‌ی فوق کلیوی را پیشنهاد داده شده‌است. کارکرد سنسور ارائه شده، بر پایه اختلاف در ضریب شکست نوری سلول‌های سرطانی نسبت به سلوهای سالم هم‌نوع در یک موجبر بلور فوتونی دوبعدی با یک پورت ورودی و دو خروجی متقارن می‌باشد. استفاده از دو خروجی در طراحی ساختار، ما را از طیف سنجی موج خروجی و مقایسه طول‌موجی بی نیاز می‌سازد. به طوری‌که انتخابگری مسیر حرکت موج و اختلاف شدت نور دو خروجی، خود مبین نتیجه آزمایش خواهد بود.

کلیدواژه- بلورهای فوتونی دو بعدی، حسگر زیستی، سلول‌های سرطانی، ضریب شکست نوری، طیف خروجی

Design of a biosensor for detection of cancer cells without output wave spectroscopy

Fahimeh Karami-Garehgeshlagi[1], Kazem Jamshidi-Ghaleh[2], Ali Asghar Mazloum[2]

[1] Department of Physics Education, Farhangian University, P.O.Box 14665-889, Tehran, Iran

[2] Department of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

fa.karami@cfu.ac.ir, k-jamshidi@azaruniv.ac.ir, aa_mazloom@yahoo.com

Abstract- Early identification of cancer cells plays a vital role in many cases and increases the possibility of complete recovery of the disease. For this purposes, the design of cheap, non-invasive and easy-to-use identification kits is of great interest. In this work, the design of a kit for identifying different types of cancer cells, such as blood cancer, breast, skin, cervical and adrenal gland cancers, has been proposed. The function of the presented sensor is based on the difference in the refractive index cancer cells compared to healthy cells of the same type in a two-dimensional photonic crystal waveguide with one input port and two symmetrical outputs. The use of two outputs in the design of the structure makes us unnecessary from the output wave spectrometry and wavelength comparison. So that the selectivity of the wave movement path and the difference in light intensity of the two outputs will show the result of the experiment.

Keywords: Biosensor, Cancer cells, Optical refractive index, Output spectrum, Two-dimensional photonic crystals

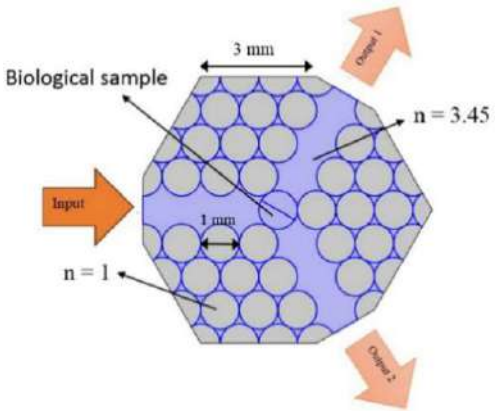
مقدمه

طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۲۰ میلادی، حدود ده میلیون نفر به علت سرطان جان خود را از دست داده‌اند که دومین عامل مرگ و میر بعد از بیماری‌های قلبی است[۱]. سرطان، تقسیم و رشد نامنظم و کنترل نشده سلول‌ها است که اگر به موقع شناسایی شوند احتمال بهبود و درمان کامل آن به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. در حال حاضر، روش‌های تشخیص زودهنگام سرطان شامل معاینات فیزیکی، آزمایش خون، دانش پاتالوژی و سیتولوژی و همچنین انواع روش‌های تصویربرداری همچون سی‌تی اسکن، ام آر آی، پت اسکن، هسته-ای و استخوان می‌باشند. گرچه تمامی این روش‌ها تجربیات موفق در تشخیص بیماری سرطان را دارند ولی در بخشی از آنها مانند سی‌تی‌اسکن استفاده از پرتوهای یونیزان می‌تواند عوارضی به

همراه داشته باشد. برخی دیگر از روش‌ها همچون پت اسکن و ام-آر-آی به دلیل هزینه بالای آن، گزینه مناسبی نمی‌توانند باشند. در روش‌های دیگر نیز یا خطای تشخیص خیلی بالا است و یا در کل به خاطر گستردگی انواع سلول‌های سرطانی و بدون علامت بودن آنها دست‌کم در مراحل اولیه و فقدان زیست-نشانگرهای خونی در بسیاری از انواع سرطان‌ها و تومورها در اساس کاری ناممکن است. از این‌رو در رویکردی جدید، پژوهشگران، بر روی استفاده از حسگرهای زیستی برای تشخیص انواع سرطان‌ها و حتی دیگر بیماری‌ها در مراحل اولیه تمرکز دارند. به تازگی اساس کار مکانیسم فیزیکی برخی از حسگرهای زیستی مبتنی بر مشخصه اپتیکی و خاصیت گاف باندی بلورهای فوتونی بنا نهاده شده‌است. این نوع، بر خلاف نسل‌های اولیه حسگرهای زیستی، به علت دقت و حساسیت بالا، کوچک‌سازی، ارزان بودن، کاهش پیچیدگی و هزینه، مورد توجه تحقیقات گسترده قرار گرفته‌اند [۲-۳]. در این مقاله، سعی داریم تا نوع و ساختار جدیدی از حسگرهای زیستی بر پایه بلورهای فوتونی دوبعدی را برای شناسایی سلول‌های سرطانی معرفی نماییم که در بازه فرکانسی مناسبی بر اساس اختلاف شدت دو خروجی ساختار بدون نیاز به طیف‌سنجی عمل کند. این فرآیند در سهولت کاربرد و کاهش هزینه بسیار موثر است.

ساختار پیشنهادی و روش کار

ساختار پیشنهاد شده در این تحقیق، مطابق شکل-۱، یک موجبر بر پایه بلورفوتونی دو بعدی حاوی ستون‌هایی هوا با ضریب شکست ۱ و سطح مقطع دایروی با قطر ۱ میلیمتر در یک دی-الکتریک زمینه با ضریب شکست ۳/۴۵ تعبیه شده‌است. ساختار طور طراحی شده که شامل یک ورودی و دو خروجی به طور کاملا متقارن است. کانال‌های ورودی و خروجی با حذف ردیف-هایی از ستون‌ها به وجود آمده‌اند. محل تلاقی خروجی‌ها با ورودی (مرکز ساختار) یک استوانه به عنوان جایگاهی برای نمونه تعبیه شده که شامل یک ستون استوانه‌ای است که از وسط به دو نیم دایره تعبیه شده‌است. نیمی از آن با سلول‌های سالم و نیمی دیگر با سلولهای معیوب پر می شود. حال با تاباندن یک موجی در فرکانس معین، میدان‌های خروجی به صورت نسبی مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل-۱: طرحواره‌ی ساختار حسگر زیستی پیشنهادی بر پایه بلور فوتونی دوبعدی با ستون‌هایی از هوا با ضریب شکست ۱ و سطح مقطع دایروی با قطر ۱ میلیمتر در یک دی‌الکتریک زمینه و ضریب شکست ۳/۴۵.

برای شبیه‌سازی، از نرم‌افزاری استفاده می‌شود که بتوان معادلات ماکسول با مشتقات جزئی را از روش المان محدود سود حل کرد [۴-۵]. در این روش، فضا و زمان پیوسته مورد مطالعه با رعایت تمامی جوانب از جمله شرایط مرزی و تعریف خصوصیات ماده و هندسه ساختار، گسسته‌سازی می‌شود. شبکه‌بندی صورت گرفته، ما را قادر می‌سازد تا بتوانیم برای هر ساختار با هر نوع پیچیدگی هندسی از جمله در خم‌ها از روش عددی برای ردیابی موج استفاده کنیم. تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری در هر نقطه از شبکه و حرکت گام به گام موج از روی معادلات ماکسول و به حداقل رساندن تابع خطای این معادلات، جواب مطلوب مسئله خواهد بود. رهیافت گزینش‌گری، مقایسه ضریب انتقال برای دو خروجی ساختار خواهد بود. ضریب انتقال برای هر خروجی برابر با نسبت دامنه موج متناظر به دامنه موج ورودی است. ابزار تشخیصی سلول‌های سرطانی مقایسه تفاوت ضریب شکست نوری سلول‌های سرطانی با سلول‌های سالم هم‌نوع است. تاکنون گزارش‌های متعددی از این داده‌ها در مقالات علمی ارائه شده‌است. نمونه‌ای از این گزارشات برای پنج نوع سلول سرطانی مورد مطالعه به همراه سلول‌های هم‌نوع سالم در جدول-۱ آورده شده‌است [۶]. در شبیه‌سازی‌های عددی از داده‌های مربوط به این جدول استفاده شده است.

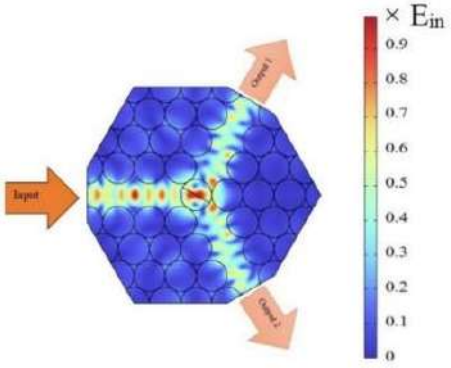
جدول-۱: ضریب شکست مربوط به سلول‌های پنج نوع سرطان: خون، سینه، پوست، دهانه رحم و غده‌ی فوق کلیوی به همراه ضریب شکست سلول‌های سالم متناظر [۶].

نوع سرطان	ضریب شکست سلول‌های سرطانی	ضریب شکست سلول‌های سالم متناظر
خون	۱/۳۹۰	۱/۳۷۶
سینه	۱/۳۹۹	۱/۳۸۵
پوست	۱/۳۸۰	۱/۳۶۰
دهانه رحم	۱/۳۹۲	۱/۳۶۸
غده فوق کلیوی	۱/۳۹۵	۱/۳۸۱

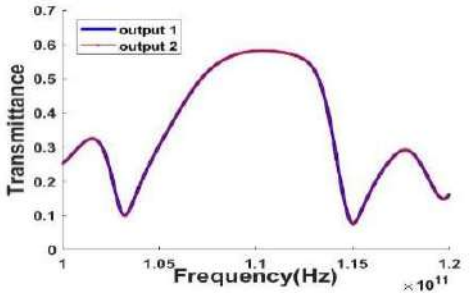
محاسبات عددی

اگر در دو نیم‌دایره مربوط به جایگاه نمونه زیستی دو ماده با مشخصه اپتیکی یکسان قرار گیرد، در اثر تقارن ساختار دامنه میدان‌ها در هر دو خروجی برابر خواهند بود. برای مثال، در شکل-۲، توزیع میدان برای موج تابشی با فرکانس $۱/۱\times۱۰^{۱۱}$هرتز در حالی‌که در هر دو قسمت سل با ماده‌ایی با ضریب شکست ۱/۴ پر شده‌است، نمایش داده شده‌است.

نمودار ضریب تراگسیل برای هر دو خروجی در شرایط ذکر شده برای بازه فرکانسی مورد مطالعه در شکل-۳، آورده شده‌است. همان‌طور که انتظار داشتیم. ضریب انتقال هر دو خروجی کاملا برابر و بر هم منطبق هستند.

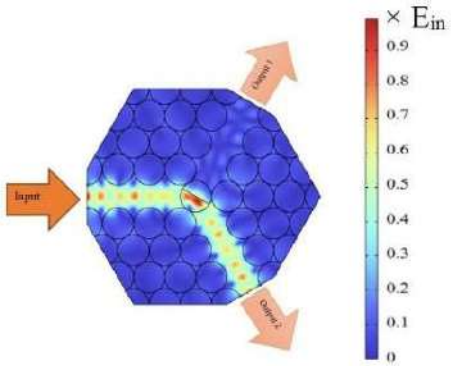


شکل ۲: توزیع میدان الکتریکی برای حالتی‌که در هر دو قسمت سل ماده با ضریب شکست ۱/۴ استفاده شده‌است. فرکانس میدان تابشی در بازه‌ی $۱/۱\times۱۰^{۱۱}$ هرتز در نظر گرفته شده‌است.



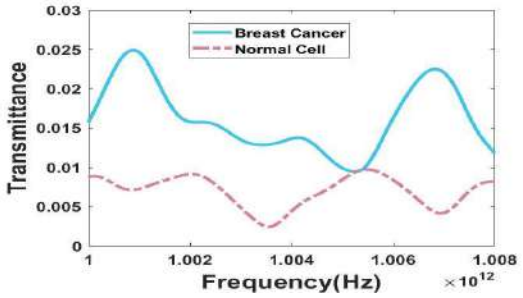
شکل-۳. نمودار ضریب تراگسیل خروجی‌های ۱ و ۲ برای حالتی‌که هر دو قسمت سل با ماده یکسان و ضریب شکست ۱/۴ پر شده‌است. بازه‌ی فراکانس میدان تابشی از ۱×۱۰^{۱۱} تا $۱/۱\times۱۰^{۱۱}$ هرتز انتخاب شده‌است.

شکل-۴، توزیع میدان‌ها از خروجی‌های ۱و ۲ را برای حالتی‌که یک قسمت سل ماده با ضریب شکست ۱/۴ و قسمت دیگر آن هواست را نشان می‌دهد. انتخابگری خروجی سیستم به طور مشهود دیده می‌شود طوری که فقط از پرت ۲ خروجی دیده می‌شود.

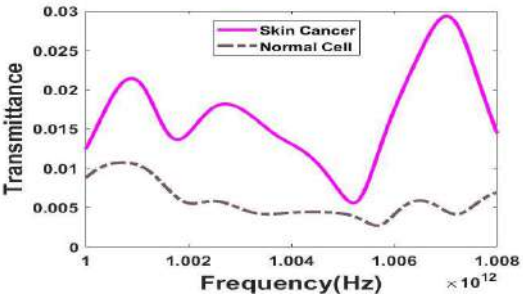


شکل ۴: نمودار توزیع میدان الکتریکی برای حالتی که سل از دو ماده با ضرایب شکست متفاوت (۱/۴ و ۱) پر شده‌است.

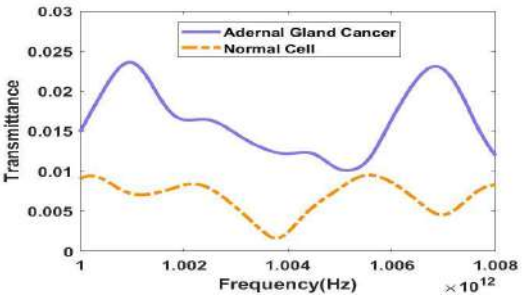
با رهیافت گفته شده، نمودار ضریب انتقال دو خروجی برای سلول‌های سرطانی مورد مطالعه و سلول‌های سالم متناظر، در شکل‌های-۵ تا ۹ رسم شده‌است. در همه‌ی نمودارها، ضریب انتقال هر دو خروجی، در بازه فرکانسی یکسان رسم شده‌اند. در تمامی نمودارها خط پیوسته نمایانگر خروجی مربوط به سلول-های سرطانی و خط‌چین نشاندهنده سلول‌های سالم است. مشاهده می‌شود که در همه‌ی موارد در تمام بازه فرکانسی شدت موج تراگسیلی مربوط به سلول‌های سرطانی بیشتر از نمونه سالم است.



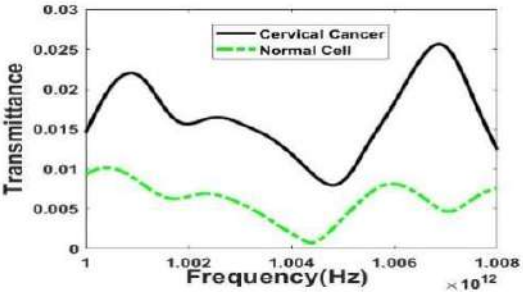
شکل-۵: ضریب تراگسیل در هر دو خروجی مربوط به سرطان سینه



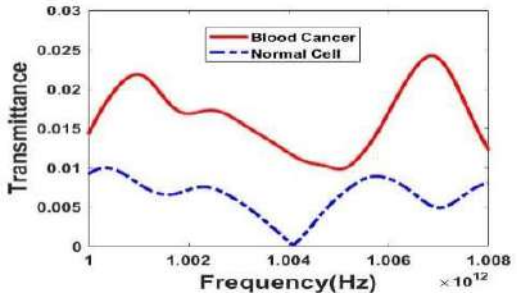
شکل-۶: ضریب تراگسیل در هر دو خروجی مربوط به سرطان پوست



شکل-۷: ضریب انتقال دو خروجی مربوط به سرطان غده فوق کلیوی



شکل ۸: ضریب انتقال دو خروجی مربوط به سرطان دهانه رحم



شکل-۹: ضریب انتقال دو خروجی مربوط به سرطان خون

نتیجه‌گیری

در این مقاله، توانستیم با طراحی و ارائه یک حسگر زیستی بر پایه بلور فوتونی دو بعدی و با در نظر گرفتن تفاوت در ضریب شکست سلول‌های سرطانی و سلول‌های سالم متناظر، به شناسایی پنج نوع سلول سرطانی بپردازیم. این کار بدون نیاز به طیف سنجی موج خروجی و فقط با مقایسه شدت نور خروجی تعبیه شده در ساختار صورت می‌گیرد. ساختار پیشنهادی می‌تواند برای مطالعه بعضی بیماریهای دیگر از جمله قند خون مورد استفاده قرار گیرد.

مرجع‌ها

[1] H. Sung, J. Ferlay, R.L. Siegel “Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries”, Ca Cancer J Clin., Vol. 71, No. 3, pp. 209-249, 2021.

[2] M. Ghoumazi, A. Hocini “Photonic Crystal Based Bio-Sensor Detection in Nanophotonic Structure Using FEM Method”, International Journal of Sensors, Wireless Communication and Control., Vol. 11, No. 2, pp. 216-224, 2021.

[3] H. Sharifi, S. Eskandari “Sensing blood components and cancer cells with photonic crystal resonator biosensor”, Results in Optics, Vol. 14, pp. 100593, 2021.

[4] Y. Yang, Y. Xiang, X. Qi “Design of Photonic Crystal Biosensors for Cancer Cell Detection”, International Journal of Sensors, Wireless Communication and Control., Vol. 14, No. 7, pp. 1478, 2023.

[5] COMSOL Multiphysics Software; https://www.comsol.com/.

[6] T. Parvin, K. Ahmed, A. Alatwi, A. Rashed “Differential optical absorption spectroscopy-based refractive index sensor for cancer cell detection”, Optical Review, Vol. 28, No. 3, pp. 134-143, 2021.

بهبود تفکیک عرضی سیستم تصویربرداری فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی

امید غلامی[۱] ، ندا امین الرعایا[۲]، حمید لطیفی[۱،۲]

[۱]دانشکده فیزیک ، دانشگاه شهید بهشتی ، تهران ، ایران -[۲]پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده - تصویربرداری فوتوآکوستیک به عنوان یک روش پیشرفته برای تصویربرداری از بافت‌های زیستی شناخته شده است. در حالی که سیستم‌های فوتوآکوستیک معمولی به دلیل محدودیت‌های تفکیک عرضی، معمولاً جزئیات کمتری ارائه می‌دهند، بهبود این تفکیک می‌تواند تأثیر زیادی در کاربردهای بالینی و تحقیقاتی داشته باشد. هدف این مطالعه بهبود تفکیک عرضی یک سیستم فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی برای تصویربرداری از بافت‌های زیستی است. در این تحقیق، تابش لیزر بهینه شده و روی بافت متمرکز شده و بهینه‌سازی پارامترهای نوری و افزایش تمرکز پرتو باعث بهبود قابل توجه در تفکیک عرضی سیستم شد. در این روش، تفکیک عرضی سیستم حدود ۱۲ میکرومتر محاسبه شده است. علاوه بر این، تصاویر با جزئیات بالایی از رگ‌های گوش موش زنده ثبت شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده توانایی بالای این روش برای کاربردهای بالینی و تحقیقاتی در زمینه تصویربرداری زیستی است. این دستاورد می‌تواند به بهبود دقت و کیفیت تصویربرداری در مطالعات پزشکی و پیش بالینی کمک کند.

کلیدواژه- تفکیک عرضی، سیستم تصویربرداری فوتوآکوستیک ، روش اپتیکی

Improvement of the lateral resolution of the photoacoustic imaging system with acoustic resolution

Omid Gholami[1], Neda Aminoroaya[2] and Hamid Latifi[1,2]

[1]Faculty of physics, Shahid Beheshti University, Tehran , Iran, [2]Laser & Plasma Research Institute

o.gholami@Mail.sbu.ac.ir, N_aminoroaya@sbu.ac.ir, latifi@sbu.ac.ir

Abstract- Photoacoustic imaging is recognized as an advanced method for imaging biological tissues. While conventional photoacoustic systems often provide lower detail due to limitations in lateral resolution, improving this resolution can have a significant impact on clinical and research applications. The aim of this study is to enhance the lateral resolution of a photoacoustic system with acoustic resolution for imaging biological tissues. In this research, the laser illumination conditions were optimally focused through the tissue. The optimization of optical setup and the enhance the beam focus led to a significant improvement in the system's lateral resolution. Using this method, the lateral resolution of the system was improved to about 12 microns. Additionally high-detail images of the blood vessels in the ear of a living mouse were captured. The results demonstrate the high potential of this method for clinical and research applications in biological imaging. This achievement could help improve the accuracy and quality of imaging in medical and preclinical studies.

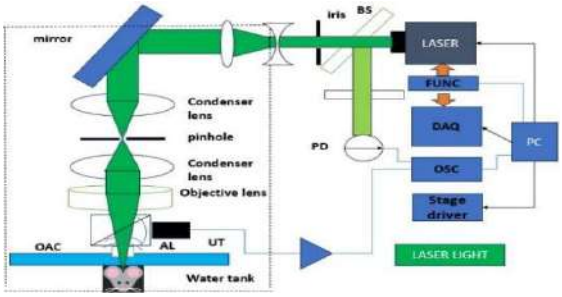
Keywords: photoacoustic imaging system , optical method , lateral resolution

مقدمه

میکروسکوپ فوتوآکوستیک به عنوان یک فناوری ترکیبی براساس اثر فوتوآکوستیک به طور گسترده در زمینه های مختلف تصویربرداری پزشکی به کار می‌رود[1]. در این روش نور لیزر پالسی با انتشار در داخل بافت باعث انبساط حراراتی داخل بافت و تولید امواج در ناحیه ی فراصوت می شود. بسته به نوع استفاده از روش فوتوآکوستیک این سیستم در دو حالت سیستم فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی1(AR-PAM) و سیستم فوتوآکوستیک با تفکیک اپتیکی2(OR-PAM) پیاده سازی می شود. در روش (AR-PAM) کانون آکوستیک کوچک تر از کانون اپتیکی است[2-4] . سیستم (AR-PAM) با توجه به پراکندگی کمتر صوت نسبت به نور در داخل بافت عمق نفوذ بالایی خواهد داشت . از معایب این روش تفکیک عرضی ضعیف آن نسبت به روش (OR-PAM) است . در مقابل در سیستم های (OR-PAM) تمرکز اپتیکی کوچکتر از تمرکز آکوستیکی است.با توجه به تمرکز بالای نور لیزر تفکیک عرضی بهتری نسبت به روش (AR-PAM) دارند ولی با توجه به پراکندگی بالای نور لیزر در داخل بافت عمق نفوذ کمتری نسبت به روش (AR-PAM) خواهد داشت[5] . مشکل اصلی سیستم های (AR-PAM) تفکیک عرضی ضعیف آنهاست.در طول موج های لیزر مورد استفاده در تصویربرداری از رگ خونی که در حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر است تفکیک عرضی این سیستم در حالت (AR-PAM) معمولا در حدود ۳۰ تا ۵۰ میکرومتر است. این تفکیک باعث کاهش دقت و وضوح تصویر در تصویربرداری از ساختارهای کوچک و پیچیده‌ی بافت‌ها می‌شود[6]. در نتیجه، بسیاری از جزئیات مهم بافت‌های بیولوژیکی در تصاویر فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی به‌خوبی قابل تشخیص نیستند. این محدودیت‌ها استفاده گسترده از این فناوری را در تشخیص‌های دقیق پزشکی و تصویربرداری‌های در ابعاد چندین میکرون محدود کرده است[7]. در این مقاله چیدمان سیستم فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی به گونه ای طراحی شده که تفکیک عرضی ۳آن به حدود ۱۲ میکرومتر برسد.

روش ها

چیدمان سیستم فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی بهبود یافته در شکل۱ نشان داده شده است.



تصویر۱ : چیدمان سیستم فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی بهبود یافته BS: تقسیم کننده ی نور، PD:فوتودایود، UT: مبدل اولتراسوند، AL: لنز آکوستیک OAC

در این روش از یک لیزر پالسی-(CNI Lasers MSL-AO-532 (500μJ با طول موج ۵۳۲ نانومتر و پهنای پالس ۷.۵ نانوثانیه و فرکانس تکرار ۱ کیلوهرتز استفاده شده که نور لیزر ابتدا توسط یک تقسیم کننده ی نور۴ به دو قسمت تقسیم می شود و بخش کمی از آن برای بررسی و پردازش سیگنال توسط یک فوتودایود(Silicon PIN Detector, 818-BB-22, Newport) دریافت می شود و بقیه ی آن درون یک مسیر اپتیکی می رود تا در ابتدا نور لیزر پهن شده و سپس از طریق آینه وارد سیستم اسکن دستگاه می شود. در این حالت نور لیزر ابتدا توسط یک لنز محدب به درون روزنه۵ با قطر ۳۰ میکرومتر متمرکز می‌شود سپس نور پراشیده شده از روزنه خارج شده و توسط یک لنز محدب موازی شده و توسط یک لنز آبجکتیو برروی نمونه متمرکز می‌شود. در این مسیر نور لیزر از یک ترکیب کننده ی اپتیکی-آکوستیکی۶ که متشکل از دومنشور است که در بین آنها لایه ی روغن سیلیکونی قرار دارد می‌گذرد. ترکیب کننده‌ی اپتیکی-آکوستیکی به علت تفاوت امپدانس آکوستیکی نور و صوت، نور لیزر را به طور کامل عبور می‌دهد و امواج آکوستیکی تولید شده را به درون مبدل آکوستیکی (V214-BB-RM, 50 MHz, Olympus) می‌فرستد[8]. در این سیستم برای بالا بردن

1 Acoustic resolution photoacoustic microscopy

2 Optical resolution photoacoustic microscopy

3 Lateral resolution

4 Beam splitter

5 pinhole

6 Optoacoustic combiner

تمرکز امواج آکوستیکی از یک لنز آکوستیکی استفاده شده است.برای کوپل امواج آکوستیکی از تانک آب و ژل اولتراسوند استفاده می‌شود. این سیستم می تواند تا عمق ۳ میلی متر و تفکیک عرضی 12 میکرومتر و تفکیک عمقی ۳۰ میکرومتر تصویر بگیرد.

نتایج

برای محاسبه ی تفکیک عرضی سیستم (AR-PAM) از دو روش می توان استفاده کرد که یکی از آنها روش تئوری و با محاسبه ی رابطه ی تفکیک می باشد و دیگری محاسبه ی تجربی می‌باشد.

محاسبه ی تئوری تفکیک عرضی و عمقی

برای محاسبه ی تفکیک عرضی و عمقی سیستم تصویربرداری فوتوآکوستیک با تفکیک صوتی از روابط زیر استفاده می‌کنیم[9] :

$$R_{L,AR} = 0.71\frac{\lambda_A}{NA_A} = \frac{V_A}{NA_A f_A} \qquad (۱)$$

$$R_{A,AR,OR} = 0.88\frac{V_A}{\Delta f_A} \qquad (۲)$$

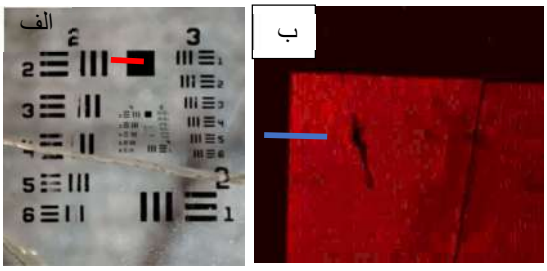
$$R_{L,OR} = 0.51\frac{\lambda_o}{NA_O} \qquad (۳)$$

همانطور که از رابطه (1) مشخص است تفکیک عرضی در (AR-PAM) به طول موج و روزنه ی عددی لنز آکوستیکی وابسته است با همه ی اینها و با توجه به داده های ما در حالت آکوستیکی تفکیک عرضی با محاسبه ی تئوری 48 میکرون متر می‌رسد . همانطور که در رابطه ی (2) مشخص است تفکیک عمقی به سرعت صوت و پهنای باند مبدل اولتراسونیکی وابسته است. برای هر دو سیستم مورد نظر با محاسبه ی تئوری تفکیکی در حدود ۳۰ میکرومتر به دست خواهدآمد.

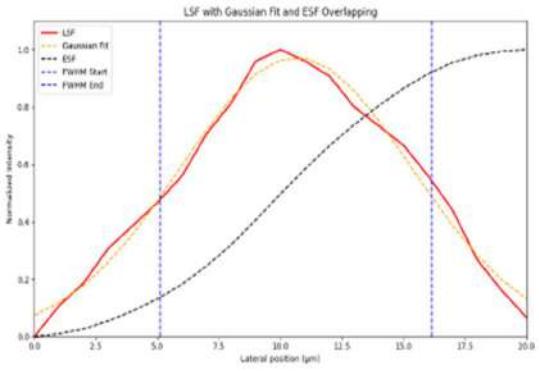
با توجه به رابطه ی (3) تفکیک عرضی در سیستم های (OR-PAM) به طول موج و روزنه ی عددی لنز آبجکتیو وابسته است. اگر سیستم در حالت (OR-PAM) باشد باید طبق محاسبات تفکیکی در حدود ۳ میکرومتر داشته باشد.

محاسبه ی تجربی تفکیک عرضی :

برای محاسبه ی تجربی تفکیک عرضی و عمقی از روش های مختلفی می توان بهره گرفت. یکی از بهترین روش ها محاسبه ی شدت هنگام عبور از لبه می‌باشد. در این روش از یک لبه ی تیز مانند لبه ی تیغ یا لبه ی مربع های تست تارگت usaf1951 تصویر می گیریم و نمودار تغییرات شدت هنگام عبور از لبه یا همان تابع گسترش لبه (ESF)7را رسم می‌کنیم سپس از این نمودار مشتق گرفته و به نمودار گسترش خط (LSF)8 می رسیم .یک تابع گاوسی را روی نمودار(LSF) فیت می‌کنیم. پهنا در نصف مقدار ماکسیمم پهنا در نصف مقدار ماکسیمم (FWHM)۹ تابع گاوسی مورد نظر تفکیک عرضی سیستم را به ما نمایش می‌دهد. با توجه به تصویر ۳ تفکیک عرضی سیستم در حدود ۱۲ میکرومتر می‌باشد و این سیستم می تواند تا حداکثر عمق ۳ میلی متر تصویربرداری انجام دهد.



تصویر ۲ : الف : تست تارگت usaf1951 ب : تصویر فوتوآکوستیک لبه مربع درون تست تارگت usaf1951



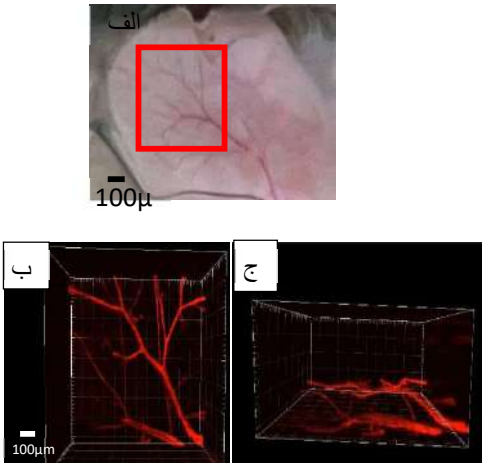
تصویر ۳ : محاسبه ی تفکیک عرضی سیستم طراحی شده ی مورد نظر

7 Edge spread function

8 Line spread function

9 Full width at half maximum

با توجه به اینکه سیستم های تصویربرداری فوتوآکوستیک در تصویربرداری های پزشکی استفاده ی زیادی دارند برای بررسی این سیستم از رگ های گوش موش آزمایشگاهی تصویر گرفته شده است . در این کار موش توسط داروهای کتامین و زایلازین بی هوش شده و روی گوش آن ژل آکوستیکی اعمال شده ونتایج در شکل۴ قابل مشاهده می‌باشد.



تصویر ۴ : الف : تصویر گوش موش ب : تصویر فوتوآکوستیک با تفکیک آکوستیکی بهبود یافته از گوش موش ج : تصویر عمقی گرفته شده از گوش موش با استفاده از سیستم فوتوآکوستیک مورد نظر

مرجع‌ها

1. Wang LV, Yao J. A practical guide to photoacoustic tomography in the life sciences. Nat Methods. 2016;13(8):627-638. doi: 10.1038/nmeth.3925.

2. Zhang HF, Maslov K, Stoica G, Wang LV. Functional photoacoustic microscopy for high-resolution and noninvasive in vivo imaging. Laser Photon Rev. 2013;7(5):731-757. doi: 10.1002/lpor.201200060.

3. Wang LV, Hu S. Photoacoustic tomography: In vivo imaging from organelles to organs. IEEE Pulse. 2012;3(5):28-33.doi: 10.1109/MPUL.2015.2409101.

4. Wang LV, Hu S. Photoacoustic tomography: In vivo imaging from organelles to organs. IEEE Pulse. 2015;6(3):28-48. doi: 10.1109/MPUL.2015.2409101.

5. Gogoi M, Banerjee R. Role of photoacoustic imaging in cancer detection and diagnosis: A comprehensive review. Life. 2022;12(4):588. doi: 10.3390/life12040588.

6. Park S, Lee C, Kim J, Kim C. Acoustic resolution photoacoustic microscopy. Biomed Eng Lett. 2014;4(3):213-222. doi: 10.1007/s13534-014-0153-z.

7. Maslov K, Zhang HF, Hu S, Wang LV. Optical-resolution photoacoustic microscopy for in vivo imaging of single capillaries. Opt Lett. 2008;33(9):929-931. doi: 10.1364/OL.33.000929.

8. Asadollahi A, Latifi H, Pramanik M, Qazvini H, Rezaei A, Nikbakht H, Abedi A. Axial accuracy and signal enhancement in acoustic-resolution photoacoustic microscopy by laser jitter effect correction and pulse energy compensation. J Biomed Opt. 2021;26(5):1-8. doi: 10.1117/1.26.5.050501.

9. Kim JY, Lee C, Park K, Lim G, Kim C. Fast optical-resolution photoacoustic microscopy using a 2-axis water-proofing MEMS scanner. Sci Rep. 2015;5(1):7932. doi: 10.1038/srep07932.

پوشش نابازتابنده و مقاوم به سایش ژرمانیوم-کربن بر زیرلایه سولفید روی

زهرا سوفسطایی[۱]، اکبر اسحاقی [۱]، حسین زابلیان[۲]

[۱]دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده – در این پژوهش، پوشش ژرمانیوم-کربن بر روی هر دوطرف زیرلایه ZnS با استفاده از روش مگنترون اسپاترینگ با استفاده از گازهای CH_4 و Ar به عنوان پیش‌ساز، لایه‌نشانی شد. پوشش ضدبازتاب دولایه $ZnS/Ge_{1-x}C_x$ با ضخامت نوری یک‌چهارم طول‌موج طراحی شد. پوشش ضدبازتاب دولایه با طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه و آزمون‌های محیطی مشخصه‌یابی و ارزیابی شد. طیف عبور مادون‌قرمز (IR) نشان می‌دهد که حداکثر عبور مادون‌قرمز در محدوده طول‌موج ۸-۱۱.۵ میکرومتر، ٪۹۰ است که ٪۱۵ بیشتر از زیرلایه ZnS است. علاوه براین، بازتاب زیرلایه ZnS حدود ٪۲۵ است. این پوشش بازتاب از زیرلایه را به میزان ٪۲۲ کاهش داده است. همچنین میزان جذب پوشش دولایه بر روی دوطرف زیرلایه مقدار ٪۷ بدست آمد.

کلیدواژه- پوشش، خواص ضدبازتابی، ژرمانیوم-کربن، سولفید روی، مگنترون اسپاترینگ

Antireflection and protection double-layer germanium-carbon coating on zinc supplied substrate

Zahra Sofastaei[1*], Akbar Eshaghi[1], Hossien Zabolian[2]

[1] Faculty of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

[2] Faculty of physics, Isfahan University, Isfahan, Iran

* z.sofastaei@gmail.com

Abstract – In this research, a germanium-carbon coating was deposited on both sides of a ZnS substrate using the magnetron sputtering method with CH_4 and Ar gases as precursors. A double-layer antireflection coating $ZnS/Ge_{1-x}C_x$ with an optical thickness of one-quarter wavelength was designed. The dual-layer antireflection coating was characterized and evaluated through Fourier-transform infrared spectroscopy and environmental tests. The infrared (IR) transmission spectrum shows that the maximum infrared transmission in the wavelength range of 8-11.5 μm is 92%, which is 17% higher than that of the ZnS substrate. Furthermore, the reflectance of the ZnS substrate is about 25%. This coating has reduced the substrate's reflectance by 23%. Additionally, the absorption rate of the dual-layer coating on both sides of the substrate was found to be 6%.

Keywords: Coating, Antireflection properties, Germanium-Carbon, Zinc sulfide, Magnetron sputtering

مقدمه

سولفید روی (ZnS) به‌عنوان یک ماده با مقاومت حرارتی خوب و جذب کم، به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان پنجره مادون‌قرمز مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما مشکلاتی نظیر استحکام مکانیکی ناکافی و بازتاب زیاد، استفاده مستقیم از این ماده را محدود می‌کند [۱]. به همین دلیل، استفاده از پوشش‌های ضدبازتاب بر روی ZnS به‌منظور بهبود خواص اپتیکی و مکانیکی آن ضروری است .پوشش‌های چندلایه ژرمانیوم-کربن ($Ge_{1-x}C_x$) به‌عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده برای بهبود عملکرد پنجره‌های مادون‌قرمز معرفی شدند. این پوشش‌ها دارای خواص منحصر به فردی از جمله سختی بالا، چسبندگی خوب و مقاوم در برابر شرایط محیطی هستند [۲]. همچنین، پوشش‌های ژرمانیوم-کربن با قابلیت تنظیم ضریب شکست و جذب کم، می‌توانند به‌عنوان محافظی مؤثر برای پنجره‌های مادون‌قرمز در شرایط نامساعد محیطی عمل کنند [۳]. هدف اصلی این تحقیق، طراحی پوشش ضدبازتاب چندلایه $Ge_{1-x}C_x$ بر زیرلایه ZnS به روش مگنترون اسپاترینگ و ارزیابی میزان عبور، بازتاب و جذب آن است.

روش تحقیق

در این پژوهش، فیلم‌های $Ge_{1-x}C_x$ روی زیرلایه ZnS با فرآیند مگنترون اسپاترینگ با مخلوط گازی از متان (CH_4) با خلوص ۹۹.۹۹٪ و آرگون (Ar) با خلوص ۹۹.۹۹۹٪ به عنوان پیش‌ساز و یک هدف تک کریستالی ژرمانیوم (۱۱۱) لایه‌نشانی شد. در ابتدا زیرلایه با پنبه و استون تمیز و سپس به‌منظور افزایش چسبندگی پوشش به سطح زیرلایه به مدت ۱۰ دقیقه در محفظه خلا تحت جریان گاز آرگون قرار گرفت. سپس پس از تامین خلا پس‌زمینه، گازهای متان و آرگون به داخل محفظه رسوب‌گذاری وارد شدند. جزئیات پارامترهای لایه‌نشانی در جدول ۱ فهرست شده است.

تعیین مشخصات

در این پژوهش، طیف‌های عبور، بازتاب و جذب پوشش‌ها با استفاده از طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون‌قرمز (FTIR) Shimadzu مدل ۸۴۰۰S در محدوده ۲.۵-۲۵ µm اندازه‌گیری شدند. ضریب شکست نمونه‌ها با استفاده از طیف بازتاب محاسبه شد.

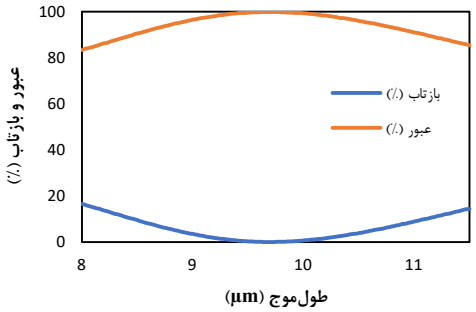
جدول ۱- پارامترهای لایه‌نشانی پوشش ژرمانیوم-کربن

پارامتر	کد نمونه	
	X_1	X_2
توان (W)	۲۰	۱۷
خلا اولیه (Torr)	۴*۱۰$^{-۶}$	۴*۱۰$^{-۶}$
فشار کاری (mTorr)	۴	۴
نرخ شارش Ar (sccm)	۸	۸
نرخ شارش CH_4 (sccm)	۰	۸
زمان (min)	۳۰	۱۲۰
دما (°C)	۲۵۰	۲۵۰

آزمون‌های محیطی شامل ارزیابی چسبندگی، سایش ملایم و سخت، شوک حرارتی، رطوبت و تابش حرارتی مطابق با استانداردهای نظامی MIL-F-48616 و MIL-810-F انجام شد. در این آزمون‌ها، قطعات لایه‌نشانی شده تحت شرایط مختلف قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که پوشش‌های تولید شده از نظر کیفی و فیزیکی مطابق با استانداردهای لازم هستند.

طراحی پوشش ضدبازتاب

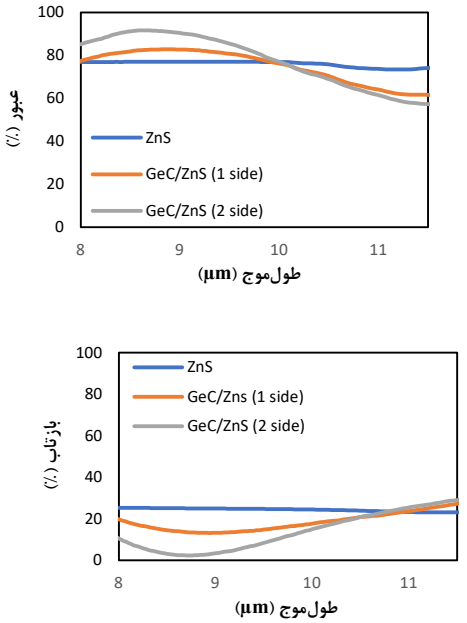
به منظور به دست آوردن عملکرد مطلوب عبور IR در محدوده طول‌موج ۸-۱۱.۵ میکرومتر (µm)، یک پوشش ضدبازتاب دولایه بر اساس فیلم‌های $Ge_{1-x}C_x$ موجود، که بسته به شرایط لایه‌نشانی دارای ضریب شکست در محدوده ۴-۲ هستند، طراحی شده است. در این پژوهش، لایه Ge با ضریب شکست بالاتر برای لایه پایین (لایه ۱) ترجیح داده می‌شود و فیلم $Ge_{1-x}C_x$ با ضریب شکست پایین‌تر برای لایه بالایی (لایه ۲) استفاده می‌شود [۴]. از نرم‌افزار مک‌لئود برای محاسبه عبور فیلم دولایه $Ge_{1-x}C_x$ بر روی زیرلایه ZnS استفاده کردیم. شکل ۱ طیف عبور و بازتاب زیرلایه ZnS را نشان می‌دهد که توسط پوشش دولایه $Ge_{1-x}C_x$ تحت شرایط بهینه، طراحی شده است. باتوجه به شکل ۱ شرایط بهینه ضدبازتاب در ناحیه ۸-۱۱.۵ µm زمانی حاصل می‌شود که ضریب شکست (n) و ضخامت (d) لایه‌های ۱ و ۲ به ترتیب n_1=3.8, d_1=356, n_2=2.5, d_2=1078 انتخاب شوند. اگر جذب نادیده گرفته شود حداکثر مقدار عبور ۹۹٪ و حداقل میزان بازتاب ۱٪ است.



شکل ۱- طیف عبور و بازتاب طراحی پوشش ضدبازتاب دولایه $Ge_{1-x}C_x$ بر زیرلایه ZnS

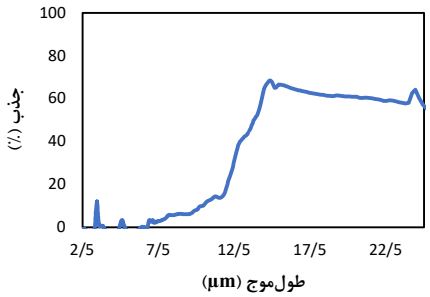
نتایج و بحث

پس از تعیین شرایط طراحی بهینه یک پوشش دولایه برای تایید نتایج شبیه‌سازی شده ساختیم. شکل ۲ هم طیف عبور و هم طیف بازتاب IR زیرلایه ZnS بدون پوشش، پوشش ضدبازتاب دولایه $Ge_{1-x}C_x$ در یک‌طرف و هر دوطرف زیرلایه را نشان می‌دهد. برای ZnS بدون پوشش حداکثر مقدار عبور و حداقل مقدار بازتاب به ترتیب ٪۷۵ و ٪۲۵ در طول‌موج µm ۹ است. با لایه‌نشانی پوشش ضدبازتاب دولایه $Ge_{1-x}C_x$ در یک طرف زیرلایه ZnS، حداکثر عبور و حداقل بازتاب به ترتیب به ٪۸۳ و ٪۱۳ در طول‌موج µm ۹ می‌رسد. همچنین با لایه‌نشانی پوشش دولایه در دوطرف زیرلایه حداکثر مقدار عبور و حداقل مقدار بازتاب به ترتیب به ٪۹۰ و ٪۳ در طول‌موج µm ۹ می‌رسد. حداکثر مقدار عبور و حداقل مقدار بازتاب ZnS بدون پوشش در مقایسه با پوشش ضدبازتاب دولایه $Ge_{1-x}C_x$ در دوطرف زیرلایه در محدوده طول‌موج µm ۸-۱۱.۵، به‌ترتیب به میزان ٪۱۵ افزایش و ٪۲۲ کاهش می‌یابد. علاوه براین، میزان جذب در طول‌موج µm ۹ برای لایه‌نشانی روی یک‌سطح زیرلایه برابر با ٪۴ است. با لایه‌نشانی سطح دوم زیرلایه، میزان جذب در طول‌موج µm ۹ به ٪۷ افزایش می‌یابد. افزایش در مقدار جذب می‌تواند به علت افزایش مقدار هیدروژن در پوشش باشد. اتم‌های هیدروژن معمولاً به‌طور اجتناب‌ناپذیر در فیلم‌ها گنجانده می‌شوند. از طرفی با لایه‌نشانی سطح دوم زیرلایه مقدار هیدروژن کل در پوشش افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار جذب پوشش دولایه روی دوسطح در مقایسه با پوشش دولایه روی یک‌سطح افزایش می‌یابد.



شکل ۲- طیف عبور و بازتاب IR زیرلایه ZnS بدون پوشش در مقایسه با پوشش دولایه $Ge_{1-x}C_x$ بر روی یک‌سطح و دوسطح زیرلایه.

طیف جذبی پوشش ضدبازتاب دولایه $Ge_{1-x}C_x$ در دوطرف زیرلایه ZnS در شکل ۳ نشان داده شده است. نوار جذب در ~۳.۵µm مرتبط با حالت کشش پیوندهای $C-H_n$ (n=1,2,3) است. پیوندهای C-H در فیلم‌ها عمدتاً از رسوب مستقیم گروه‌های $C-H_n$ (n=1,2,3) تجزیه شده از متان به دست آمده است. نوار جذب در ~۵ µm را می‌توان به حالت کشش پیوندهای Ge-H نسبت داد [۵]. نوار جذب در ~۶.۹ µm منسوب به پیوندهای C-H خمشی [۶] و نوار جذب قرار گرفته در ~۷.۱ µm مربوط به پیوندهای Ge-H کششی است [۷]. نوار جذب در ~۸.۱ µm مربوط به پیوندهای C-H خمشی است [۸]. نوار جذب در ~۱۱.۲ µm منسوب به پیوندهای $Ge-CH_3$ جنبانه‌ای است. این امر، پیوند خوردن برخی از اتم‌های ژرمانیوم با اتم‌های کربن را اثبات می‌کند [۷]. نوار جذب قرار گرفته در ~۱۵ µm و ~۱۵.۱ µm مربوط به پیوندهای Ge-C-C کششی است [۵].



شکل ۳- طیف جذب پوشش ضدبازتاب دولایه $Ge_{1-x}C_x$ روی دوسطح زیرلایه ZnS

نتایج آزمون‌های محیطی مطابق با استانداردهای نظامی MIL-F-48616 و MIL-810-F بر روی پوشش $Ge_{1-x}C_x$ نشان‌دهنده چسبندگی و مقاومت مناسب این پوشش در برابر سایش، شوک حرارتی و رطوبت است. هیچ‌گونه آسیب یا تخریبی در نمونه مشاهده نشد و این پوشش توانست تمامی آزمون‌ها را با موفقیت پشت سر بگذارد. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که یک پوشش دو لایه $Ge_{1-x}C_x$ می‌تواند به عنوان یک پوشش ضدبازتاب و محافظ موثر بر روی پنجره مادون قرمز ZnS استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، پوشش $Ge_{1-x}C_x$ روی زیرلایه ZnS توسط روش مگنترون اسپاترینگ لایه‌نشانی شد. نتایج نشان داد که عبور پوشش ضدبازتاب $ZnS/Ge_{1-x}C_x$ از ۷۵ به ٪۹۰ در طول‌موج µm ۹ افزایش یافته است. همچنین میزان بازتاب از زیرلایه از ۲۵ به ٪۳ کاهش یافته است. علاوه براین میزان جذب پوشش دولایه بر روی دوسطح زیرلایه ٪۷ اندازه‌گیری شد. باتوجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌های محیطی پوشش مورد بررسی از کیفیت و دوام بالایی برخوردار است و می‌تواند در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

با تشکر از شرکت صنایع الکترواپتیک صاایران که در انجام این پژوهش یاری کرده‌اند.

مرجع‌ها

[1] C. Hu, W. Zheng, H. Tian, L. Xu, and Q. Jiang, "Effects of the chemical bonding on the optical and mechanical properties for germanium carbide films used as antireflection and protection coating of ZnS windows," Journal of Physics: Condensed Matter, vol. 18, no. 17, p. 4231, 2006.

[2] C. Jiang, J. Zhu, J. Han, and W. Cao, "The surface topography, structural and mechanical properties of Ge1− xCx films prepared by magnetron co-sputtering," Journal of non-crystalline solids, vol. 383, pp. 126-130, 2014.

[3] C. Hu, J. Zhu, W. Zheng, and J. Han, "Annealing effects on the bonding structures, optical and mechanical properties for radio frequency reactive sputtered germanium carbide films," Applied Surface Science, vol. 255, no. 6, pp. 3552-3557, 2009.

[4] C. Hu et al., "Ge1–xCx double-layer antireflection and protection coatings," Applied surface science, vol. 252, no. 23, pp. 8135-8138, 2006.

[5] C. Zoita, C. Grigorescu, I. Vasiliu, and I. Feraru, "Influence of process parameters on structure and optical properties of GeC thin films deposited by RF magnetron sputtering," Thin Solid Films, vol. 519, no. 12, pp. 4101-4104, 2011.

[6] C. Hu, L. Qiao, H. Tian, X. Lu, Q. Jiang, and W. Zheng, "Role of carbon in the formation of hard Ge1− xCx thin films by reactive magnetron sputtering," Physica B: Condensed Matter, vol. 406, no. 13, pp. 2658-2662, 2011.

[7] H. Jamali, R. Mozafarinia, and A. Eshaghi, "Evaluation of chemical and structural properties of germanium-carbon coatings deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition," Journal of Alloys and Compounds, vol. 646, pp. 360-367, 2015.

[8] N. Gupta, B. P. Veettil, H. Xia, S. K. Karuturi, G. Conibeer, and S. Shrestha, "Synthesis of nano-crystalline germanium carbide using radio frequency magnetron sputtering," Thin Solid Films, vol. 592, pp. 162-166, 2015.

مطالعه تاثیر همزمان افزایش غلظت نیترات نقره و کاهش غلظت اسید سیتریک و اسید آسکوربیک برسنتز نانوصفحات مثلثی نقره و بررسی خواص نوری آن‌ها

هادی فرّخی[۱،*]، محمّد جابری[۱]، مجید طاهری[۱]

۱. تهران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فیزیک پلاسما وگداخت هسته‌ای

چکیده – پژوهش‌های صورت گرفته در چند دهه اخیر منجر به توسعه رویکردهای مختلف برای کنترل شکل هندسی نانوذرات حین سنتز شده است. در این پژوهش نانوصفحات مثلثی نقره در آب به‌روش خود هسته‌زایی تولید شده است. دراین روش به جای اضافه کردن هسته خارجی، هسته‌های نقره به عنوان مرکز رشد نانوذرات نقره به صورت خودزا در یک واکنش هیدروشیمیایی تشکیل می‌شوند. از مزایای بارز این روش می‌توان به عدم نیاز به افزودن هسته‌های خارجی ، عدم نیاز به استفاده از حلال‌های آلی غیر دوستدار محیط زیست، قابلیت عملکرد در دمای اتاق و استفاده هم افزایی از چند عامل کاهنده برای کنترل بهتر رشد نانوساختارهای دو بعدی اشاره کرد. خواص اپتیکی نانوذرات سنتز شده به شکل مثلثی با روش طیف سنجی مرئی- فرابنفش مشخصه یابی شده و تاثیر افزایش غلظت نیترات نقره و کاهش غلظت عوامل کاهنده، اسید سیتریک و اسید اسکوربیک، بر طول موج جذب بررسی شده است.

کلیدواژه: اسید آسکوربیک، اسید سیتریک، روش خود هسته‌زایی، نانو صفحات مثلثی نقره، طیف سنجی مرئی فرابنفش.

Studying the simultaneous effect of increasing the concentration of silver nitrate and decreasing the concentration of citric acid and ascorbic acid on the synthesis of triangular silver nanoplates and investigating their optical properties.

Hadi Farrokhi[1,*], Mohammad Jaberi[1] and Majid Taheri[1]

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

*H.farrokhi@Ymail.com

Abstract -The research conducted in the last few decades has led to the development of different approaches to control the geometrical shape of nanoparticles during synthesis. In this research, triangular silver nanosheets were produced in water by Self-Seeding method. In this method, the self-seeding process means that the silver seeds serving as nuclei for the growth of silver nanoparticles are formed autogenously in a same reaction system rather than added externally. The distinct advantages of this method include no need to add external seeds, no need to use organic solvents that are environmentally unfriendly, being able to perform at room temperature, and synergetic use of a few reducing agents for better growth control of two-dimensional nanostructures. The optical properties of nanoparticles synthesized in a triangular shape were characterized by Uv-Visible spectroscopy, and the effect of increasing the concentration of silver nitrate and decreasing the concentration of reducing agents, Citric Acid and Ascorbic Acid, on the absorption wavelength was studied.

Keywords: Ascorbic acid, Citric acid, Self-Seeding method, Triangular silver nanoplates, Uv-visible spectroscopy.

مقدمه

با توجه به تنوع نانوذرات و نیز گستردگی کاربردهای آن‌ها، از روش‌های مختلفی برای تولید نانوذرات استفاده می‌شود [۱]. یکی از روش‌هایی که از سال ۲۰۰۶ مورد توجه قرار گرفته است، سنتز نانوذرات به روش خودهسته‌زایی می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان شکل نهایی نانوذرات نقره را کنترل کرد. با این تکنیک می‌توان نانوصفحات نقره در اشکال هندسی مثلثی،کروی و دیسکی ساخت [۲]. با این روش می‌توان صفحاتی با ضخامت ۲/۳ نانومتر ساخت. از مزایای بارز این روش می‌توان به عدم نیاز به افزودن هسته خارجی، عدم نیاز به استفاده از حلال‌های آلی غیر دوستدار محیط زیست (حلال های غیر ارگانیک)، قابلیت عملکرد در دمای اتاق و استفاده هم‌افزایی از چند عامل کاهنده برای کنترل بهتر رشد نانوساختارهای دو بعدی اشاره کرد. این فرایند متفاوت از سنتز نانومیله‌های طلا یا نقره است که در آن دانه‌های خارجی ابتدا سنتز شده و حداقل ۲ ساعت قبل از استفاده برای تولید نانوذرات نگهداری می‌شوند. هسته زایی در این روش به این معنی است که واکنش خود هسته زایی با افزودن محلول $NaBH_4$ آغاز می‌شود و رشد بعدی نانوبلورهای ریز نقره تازه تشکیل شده با احیای هم افزایی اسید سیتریک و اسید L-آسکوربیک در دمای اتاق به دست می آید. این روش، یک روش هیدروشیمیایی است به این معنی که سنتز نانوصفحات نقره در محلول های آبی به جای حلال‌های آلی که برای محیط زیست ناسازگار هستند اتفاق می‌افتد [۲, ۳].

در این پژوهش نانوذراتی با ساختار مثلثی به روش خود هسته-زایی تولید شده است تاثیر همزمان افزایش غلظت نمک نقره و همچنین کاهش غلظت اسید سیتریک و اسید اسکوربیک بعنوان دوعامل کاهنده بر قله طیف جذبی UV-Visibel آنها بصورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته و اثر این در جابجایی طول موج جذب در بازه زمانی یک ماهه مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

نیترات نقره ($AgNO_3$) با در صد خلوص % 99.5 از کمپانی Fluka ، سدیم دی اکتیل سولفوسوکسینات (NaAOT) با در صد خلوص99% از کمپانی AsanChem، اسید اسکوربیک (ascorbic L–acid) با درصد خلوص 99.7% از کمپانی Merck، اسید سیتریک (Citric acid) با درصد خلوص 99.7% از کمپانی Merck، سدیم بور هیدراید ($NaBH_4$) با در صد خلوص 99% از کمپانی SigmaAldrich، دودکانتیول ($C_{12}SH$) با درصد خلوص 99.5% از کمپانی Merck، ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (CTAB) با درصد خلوص 99.7% از کمپانی Merck، در کلیه مراحل سنتز از آب مقطر خالص بعنوان حلال پایه استفاده می-شود.

سنتز نانو صفحات نقره و مشخصه‌یابی

سنتز نانوصفحات نقره به‌روش خود هسته‌زایی جهت رسیدن به شکل هندسی مثلثی شامل چهار مرحله می‌باشد و در مرحله پنجم روش مطالعه اثر غلظت نیترات نقره و عوامل کاهنده ذکر می‌شود.

مرحله اول: مقدار ۳/۱۲۵ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۲ مولار نیترات نقره و ۶/۲۵ میلی‌لیتر سدیم دی‌اکتیل سولفوسوکسینات را در یک بالن ۵۰۰ میلی‌لیتری با مقداری آب دوبار تقطیر به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق به هم می‌زنیم، سپس حجم نهایی محلول را به ۲۵۰میلی‌لیتر می‌رسانیم و غلظت $AgNO_3$ و NaAOT در این مرحله به ترتیب به ۰/۰۰۰۲۵ مولار و ۰/۰۰۰۵ مولار است.

مرحله دوم: مقدار ۰/۷۵ میلی لیتر از اسید سیتریک با غلظت ۰/۱ مولار و ۰/۶۲۵ اسید اسکوربیک با غلظت ۰/۱ مولار را به ۲۵۰میلی‌لیتر محلول که در مرحله اول تهیه شد می‌افزایم و بسرعت بهم میزنیم. بار دیگر همین مقادیر را با غلظت‌های ۰/۰۱ مولار برای هردو اسید تکرار می‌کنیم.

مرحله سوم: مقدار ۰/۰۵ میلی لیتر از سدیم بور هیدراید با غلظت ۰/۰۰۲ مولار را که در حمام یخ تهیه شده است را به محلول فوق اضافه می‌کنیم و بمدت ۳۰ ثانیه به سرعت بهم میزنیم. محلول $NaBH_4$ که نسبت مولی BH_4^- به Ag^+ به میزان است باعث می-شود تا دانه‌بندی انجام شده و دانه‌های ریز نقره شکل گیرد. سپس کاهش همزمان بوسیله اسید سیتریک و اسید اسکوربیک باعث شکل گیری نانوذرات نقره می‌شود. دانه‌های نقره نه تنها به عنوان هسته برای رشد نانوذرات بلکه به عنوان کاتالیزور هم در فرایند کاهش همزمان دو عامل اسیدی عمل می‌کند. در این هنگام وجود نانوذرات بلوری نقره رشد می‌کند و ملکول های NaAOT بعنوان یک پایدار کننده آنها را تثبت می‌کنند. رنگ محلول واکنش از زرد کمرنگ به بنفش، صورتی، سبز و نهایتا

آبی تغییر می‌کند که محلول آبی رنگ حاوی نانوذرات مثلثی ناپایدار است.

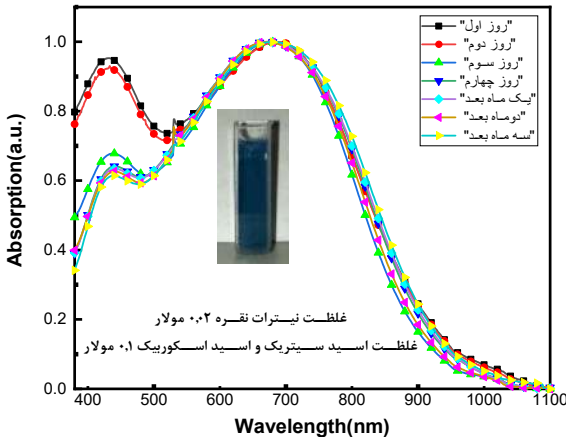
مرحله چهارم: اگر بعد از اتمام فرایند رشد نانوذرات، به محلول واکنش مقدار ۰/۱ میلی‌لیتر از پایدار کننده دودکانتیول اضافه کنیم، نانوذرات مثلثی پایدار می‌شوند. در این روش استفاده از هر سه کاهنده بطور همزمان، برای بدست آوردن شکل منظم نانوذرات نقره اهمیت دارد.

مرحله پنجم: برای مطالعه اثر غلظت نیترات نقره و عوامل کاهنده ابتدا مقدار غلظت نیترات نقره را از ۰/۰۲ مولار به ۰/۰۴ مولار افزایش می‌دهیم. در واقع به ازای مقدار ثابت نیترات نقره حجم محلول حاوی نمک نقره ($AgNO_3$) را از ۳/۱۲۵ میلی‌لیتر به ۱/۵۶۲ میلی‌لیتر کاهش می‌دهیم همزمان غلظت اسید اسکوربیک و اسید سیتریک را از ۰/۱ مولار به غلظت ۰/۰۱ مولار کاهش می‌دهیم[۴].

طیف جذبی نانوذرات نقره توسط طیف‌سنج UV-VIS با شاهد آب اندازه‌گیری شده است. بدین منظور، در این پژوهش طیف-های جذبی توسط دستگاه PerkinElmer مدل LAMBDA EZ 301 اندازه گیری شده است. همچنین جهت مطالعه شکل نانو صفحات از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شده است، که تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری کلوئیدها توسط Phillips EM208S بررسی شده است.

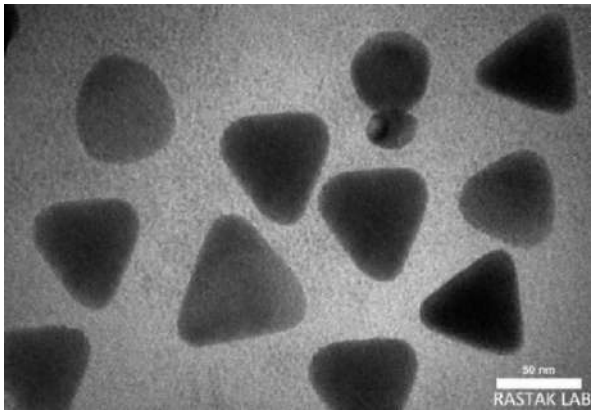
نتایج تجربی و بحث

پایداری نانوصفحات مثلثی نقره توسط طیف جذبی، بررسی شده است. طیف جذبی این نانو ذرات طی سه ماه بصورت دوره‌ای اندازه‌گیری شده است. در نانوصفحات نقره به واسطه رزونانس پلاسمونیک سطحی و با توجه به شکل هندسی و اندازه نانوذرات قله‌های در محدوده ۴۵۰ و ۷۰۰ نانومتر مشاهده می‌شود. شکل ۱ رفتار طیف جذبی نانوصفحات نقره قبل از تغییر در غلظت نیترات نقره و غلظت اسید اسکوربیک و اسید سیتریک را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود هیچگونه جابجایی پیک با گذشت زمان در نمونه مشاهده نمی‌گردد که نشان دهنده پایداری این نانوذرات در طول زمان مطالعه است.



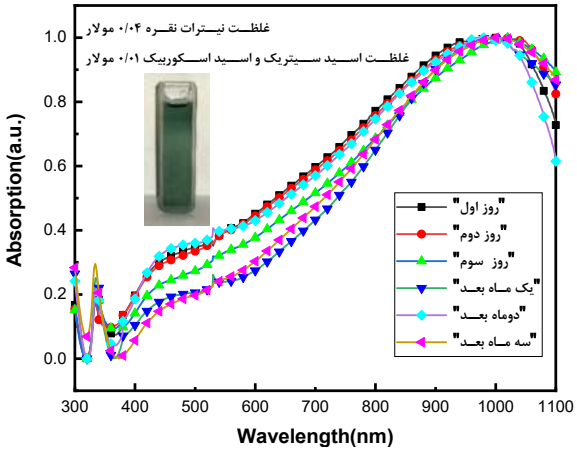
شکل ۱: طیف جذب نانوذرات نقره با گذشت زمان.

شکل۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوصفحات نقره می‌باشد که قبل از تغییر در غلظت را نشان می‌دهد.



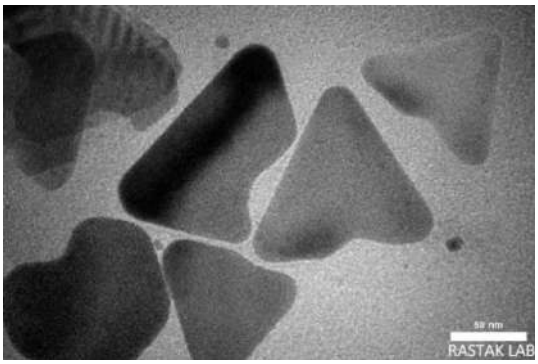
شکل۲: تصویر TEM از نانوصفحات نقره قبل از تغییر در غلظت

شکل۳ رفتار طیف جذبی نانوصفحات نقره بعد از اعمال تغییر در غلظت نیترات نقره از ۰/۰۲ مولار به ۰/۰۴ مولار و غلظت اسید اسکوربیک و اسید سیتریک از ۰/۱ مولار به ۰/۰۱ مولار را نشان می‌دهد.



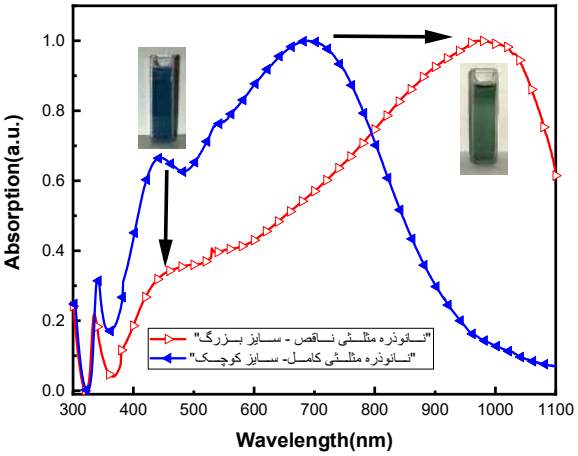
شکل۳: طیف جذب نانوذرات نقره بعد از اعمال تغییرات

شکل۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوصفحات نقره بعد از اعمال تغییرات در غلظت پیش ماده نمکی و عوامل کاهنده را نشان می‌دهد.



شکل۴: تصویر TEM از نانوصفحات نقره بعد از اعمال تغییرات.

با زیاد کردن غلظت پیش ماده نمکی، اندازه ذرات تولیدی بزرگتر می‌شود لذا همانطور که در شکل۵ دیده می‌شود پیک اصلی در نانوصفحات مثلثی به سمت طول موج‌های بلندتر تغییر می‌کند. کاهش غلظت عوامل اسیدی باعث می‌شود که خوردگی درگوشه‌های نانوصفحات مثلثی باتوجه با سایز نانوذرات و غلظت زیاد نیترات نقره بصورت ناقص انجام شود لذا پیک دوم در نانوصفحات مثلثی ناقص که مربوط به گوشه‌های نانوذرات مثلثی است تقلیل پیدا می‌کند. همچنین رنگ محلول حاوی نانوذرات که تابعی از اندازه و شکل آن می‌باشد از آبی (نانوصفحات مثلثی کوچک)، به سبز (نانوصفحات مثلثی بزرگ) تغییر می‌کند.



شکل۵: تاثیر همزمان افزایش غلظت نیترات نقره و کاهش غلظت اسید سیتریک و اسید آسکوربیک

نتیجه‌گیری

مطالعه بر روی اثر غلظت نیترات نقره و عوامل کاهنده بصورت همزمان نشان می‌دهد که با زیاد کردن غلظت پیش ماده نمکی، اندازه ذرات بزرگتر شده و کاهش غلظت عوامل اسیدی باعث می‌شود که خوردگی درگوشه‌های نانوصفحات مثلثی رخ دهد. که تاثیر هر دو این عوامل به وضوح در جابجایی قله جذبی و تصاویر TEM و رنگ نانوذرات مشاهده شده است.

مرجع‌ها

[1] B. Khodashenas, H.R. Ghorbani, “Synthesis of silver nanoparticles with different shapes”, Arab. J. Chem., Vol. 12, No. 8, pp. 1823-1838, 2019.

[2] X. Jiang, Q. Zeng, A. Yu, “A self-seeding coreduction method for shape control of silver nanoplates”, Nanotechnol., Vol. 17, No. 19, pp.4929-4935, 2006.

[3] Q. Zeng, X. Jiang, A. Yu, G.M. Lu, “Growth mechanisms of silver nanoparticles: a molecular dynamics study”, Nanotechnol., Vol. 18, No. 3, pp.035708-035715, 2007.

[4] یزدانی. ف. , ط. چشم انداز, "بررسی پارامترهای مؤثر در سنتز نانو ذرات نقره به روش احیای شیمیایی". مهندسی شیمی ایران, ۲۰۱۶. ۱۵(۸۵) صفحه: ۴۰-۲۹ .

تولید نانوذرات رنگی آلومینا آلاییده به نیکل به روش شیمیایی

موسی علی احمد، فاطمه محمد پور

گروه فیزیک ، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده- در این مقاله نانوذرات رنگی بر پایه آلومینا و نیکل ساخته شد. نانوذرات آلومینا به دلیل پایداری حرارتی و مکانیکی و همچنین مقاومت بالا در برابر خراش کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف دارند. اصلی ترین مشکل این مواد محدود بودن و نداشتن تنوع رنگی می باشد. این مواد معمولا به رنگ سفید موجود هستند که استفاده از آنها را محدود می کند. در این مقاله توانستیم با جانشینی یونهای نیکل در ساختار آلومینا نانوذراتی در رنگهای مختلف تولید کنیم. برای بررسی نمونه های سنتز شده از روشهای XRD، FESEM استفاده شد. نتایج تحلیل رنگی نشان میدهد که نانو ذرات، بسته به درصد آلایش نیکل و دمای کلسیناسیون دارای رنگ های مختلفی هستند. نتایج طیف سنجی XRD نشان داد که اندازه بلورک های تولید شده کمتر از۱۰ nm است و بلورها شکل مکعبی ساده دارند. تصاویر FESEMشکل کروی ذرات را نشان می دهد.

کلیدواژه ها: آلاییدگی با نیکل، آلومینا، رنگینه، نانوذرات

Preparation of nickel pigmented alumina nanoparticles using chemical method

Mousa_Aliahmad, Fatemeh_Mohamadpour

Department of Physics, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

aliahmad@phys.usb.ac.ir, fatemeh.mohammadpoor77@gmail.com

Abstract: the present study was an attempt to produce pigmented nanoparticles with nickel doped alumina. Alumina nanoparticles are used widely in different industries due to their great thermal and mechanical resistance. Limited diversity of colors is the most important problem of these materials. They are usually available in white color, which limits their applications. In this study, we managed to replace nickel ions in alumina structure to produce nanoparticles in different colors. The synthesized samples were tested using XRD and FESEM techniqes. The color analysis results showed that the nanoparticles appear in different colors depending on nickel pigment content and calcination temperature. The XRD spectrographic results showed that crystallite size of the produced nanoparticles was smaller than 10nm, and crystals had a plain cubic form. FESEM images showed that the produced nanoparticles had a spherical form. Nickel pigmented alumina nanoparticles with a wide range of colors, can be a suitable choice for automotive pain industries, glass industries and metal in dustries.

Keywords: Alumina, Nanoparticles, pigment and nickel doped

مقدمه

آلومینا یکی از مهمترین اکسیدهای سرامیک است و طی سالهای طولانی مورد مطالعه محققین قرار گرفته است. این ماده کاربردهای وسیعی در صنعت سرامیک، شیشه سازی، جاذبهای سطحی، کاتالیزورها و کمک کاتالیزورها دارد .آلومینا یکی از مواد سرامیکی بوده که به جهت ارزان بودن هزینه تولید و به علت سختی و همچنین به دلیل پایداری حرارتی بالایی که دارد میتواند به عنوان یک پوشش ایده آل در صنایع مختلف از جمله صنایع رنگرزی و تکنولوژی رنگ خودروها و پوشش های تزیینی مورد استفاده قرار گیرد. روشهای بسیاری برای سنتز نانوذرات اکسیدآلومینیم وجود دارد که از نظر شیوه سنتز به دو روش کلی فیزیکی و شیمیایی دسته بندی میشوند، روشهای فیزیکی شامل آسیاب مکانیکی، ذوب لیزر، اسپری داغ و تجزیه گرمایی در پلاسما و از جمله روشهای شیمیایی می توان به سل -ژل،همرسوبی و لایه نشانی با بخار اشاره کرد [۱-۵]. در این کار پژوهشی نانوذرات رنگی آلومینا آلاییده به نیکل با توزیع یکنواخت با اندازه ی کمتر از۱۰ نانومتر به روش سل-ژل تهیه شده است. نتایج نشان میدهد که با کنترل درصد آلایش و همچنین دمای کلسیناسیون می توان نانوذراتی در رنگهای

مختلف تولید کرد. گاف انرژی نانوذرات آلایش یافته حدود ۴/۱ eV می باشد؛ این مورد نشان میدهد نانوذرات شفافیت اپتیکی بالایی دارند. نانوذرات آلومینا آلاییده به نیکل با دارا بودن تنوع رنگی گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع و تکنولوژی رنگ خودرو ها، صنایع شیشه سازی و محصولات فلزی است.

مواد و روش ها

جهت سنتز به روش سل-ژل ابتدا محلول نیکل نیترات به محلول آلومینیوم نیترات بصورت قطره قطره اضافه شد و روی همزن مغناطیسی (Hot Plate) به مدت چند دقیقه هم زده شد تا کاملاً همگن شود. سپس محلول آمونیاک به صورت قطره قطره به محلول فوق اضافه شد و به مدت چندین ساعت روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. سپس ژل حاصله در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد خشک و در ادامه فرایند کلسیناسیون در دماهای C ° 400، C ° 700 و C ° 1000 و مدت زمان ۲ ساعت انجام شد.

شکل ۱ مربوط به محصولات تولید شده بعد از خشک کردن و آسیاب نشان می دهد. شکل ۲ نمونه های کلسینه شده در دما های مختلف را نشان می دهد، بسته به درصد آلایش نیکل و دمای کلسیناسیون، نانوذرات رنگهای مختلفی دارند.



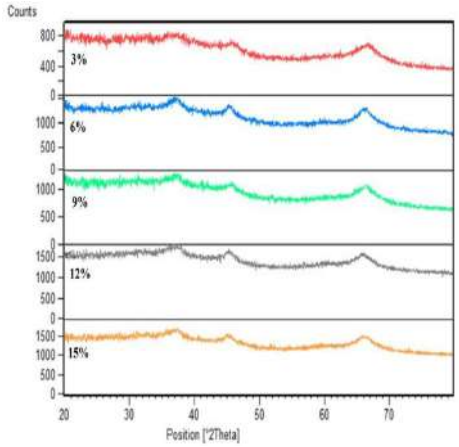
شکل ۱. تصاویر ژل خشک شده در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد قبل از عملیات کلسیناسیون



شکل 2. محصولات نهایی تولید شده (نانو ذرات نیکل-آلومینیوم اکسید) بعد از بازپخت در دماهای مختلف (400 °C, 700 °C, 1000 °C) با درصدهای مختلف نیکل (از 0% تا 15%).

پراش پرتو ایکس

الگوی پراش پرتو ایکس(XRD) نانو ذرات آلومینای خالص و آلومینای آلاییده به نیکل با درصد های آلایش مختلف که در دمای C ° ۷۰۰ کلسینه شده اند در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نانو ذرات آلومینای خالص و آلومینای آلاییده به نیکل با درصد های آلایش مختلف که در دمای C ° ۷۰۰ کلسینه شده اند.

چنانکه مشهود است قله های بازتاب در الگوی پراش نانوذرات Al_2O_3 آلاییده به Ni، در مقایسه با نانو ذراتAl_2O_3 خالص کمی به زاویه های پایین‌تر جابجا شده‌اند و این جابجایی با افزایش درصد آلایش بیشتر شده است، که دلیل آن جایگزینی یون‌های بزرگتر Ni^{+2} به جای یون های کوچکتر Al^{+3} است. همچنین نتایج بدست آمده از الگوی XRD نمونه ها نشان میدهد که سیستم کریستالی برای نمونه خالص مونوکلینیک و برای نمونه های آلاییده به نیکل مکعبی ساده است. الگوی XRD برای کلیه نمونه‌ها با مقادیر ثبت شده در کارتهای استاندارد JCPDS همخوانی کامل دارد به طوریکه هیچ پیک اضافه ای که نشان دهنده ناخالصی باشد دیده نمی شود [۱-۳].

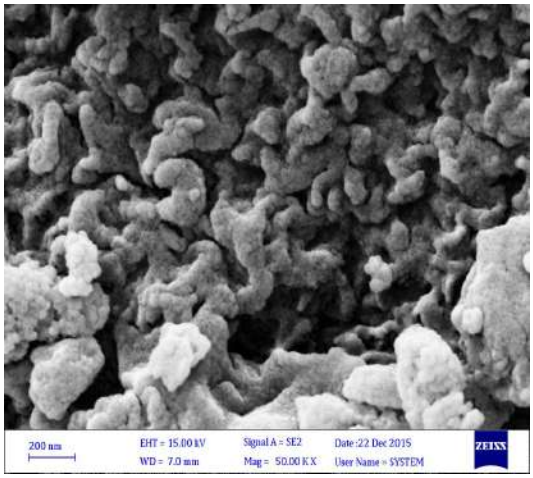
$$D = \frac{0.89\,\lambda}{\beta\,\cos(\theta)}$$ (۱) رابطه شرر

در رابطه β ۱ پهن شدگی در نصف شدت بیشینه، θ زاویه براگ قله، λ طول موج پرتو x که برابر با ۰/۱۵۴ nm است و D اندازه ی ذرات است. به کمک رابطه شرر، متوسط اندازه ی بلورک ها مربوط به بلندترین قله برای نمونه هایی که در دمای C ° ۷۰۰ با درصدهای ۳%، ۶%، ۹%، ۱۲% و ۱۵% کلسینه شده اند به

ترتیب ۲.۱nm، ۲.۹nm،۳.۲ nm، ۳.۸nm و ۴.۲ nm بدست آمد. چنانکه دیده می شود با افزایش درصد آلایش، اندازه ی نانوذرات افزایش می یابد و این ناشی از جایگزینی یون های بزرگتر Ni^{+2} به جای Al^{+3} است.

نتایج میکروسکپ الکترونی گسیل میدان

میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FESEM مورد استفاده برای تصویر برداری از نمونه ها مدل Mira 3-XMU با ویژگی محفظه بسیار بزرگ و سرعت خلأ بالا امکان تصویر برداری با بزرگنمایی ۱۰ تا ۷۰۰۰۰۰ برابر را دارد. همانطور که از شکل ۴ مشاهده می شود نانوذرات کروی شکل می هستند که تحت عملیات حرارتی آگلومرها تشکیل و ذرات به یکدیگر متصل شده اند.



شکل ۴ تصاویر FESEM حاصل از نمونه با درصد آلایش ۳ کلسینه شده در دمای $700\ ^{\circ}C$

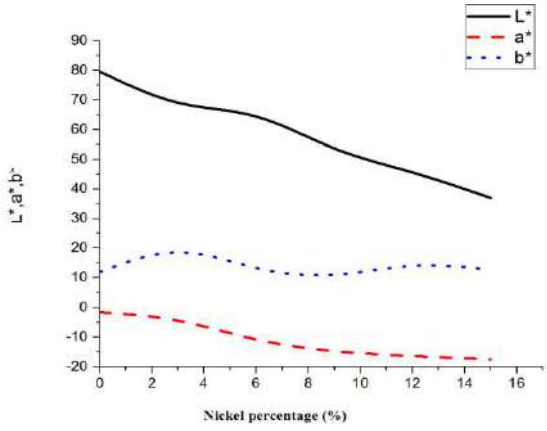
یکی از عواملی که در اندازه نانوذرات تولید شده تاثیر دارد آسیا کاری است. واضح است که رسوب و به دنبال آن کلسینه کردن باعث توده ای شدن ذرات می گردد. با چندین بار آسیا کاری می توان ذرات را از هم جدا کرد و قطر ذرات را کاهش داد. تجمع نانوذرات به وضوح قابل مشاهده است به گونه ای که نانوذرات بصورت توده ای، بهم چسبیده مشاهده می شود. این چسبندگی می تواند به دلیل نیروهای جاذبه بین نانوذرات و یا دمای کلسیناسیون آنها باشد. این دو عامل فاکتورهای مهم کلوخه ای شدن نانوذرات هستند.

نتایج رنگ سنجی

امروزه جهت مشخص نمودن رنگ مواد از فضاهای رنگی و مقادیر عددی در فضای سه بعدی استفاده می شود. با توجه به نوع کاربرد از فضاهای رنگی مختلفی نظیر CMYK، RGB و CIE-$L^*a^*b^*$ استفاده می شود . در میان فضاهای ذکر شده سیستم رنگ سنجی $L^*a^*b^*$ کاربرد بیشتری نسبت به بقیه فضاها دارد. به همین دلیل در این مقاله از این سیستم جهت اندازه گیری و بررسی رنگ نانوذرات استفاده شده است. فضای رنگی L*a*b* یک استاندارد جهانی برای اندازه گیری رنگ است که در سال ۱۹۶۷ توسط کمیسیون بین المللی روشنایی پذیرفته شده است. در این سیستم L* مولفه درخشندگی می باشد که محدوده آن از ۰ تا ۱۰۰ می باشد و پارامتر a* (از سبزی تا قرمزی) و b* (از آبی تا زردی) دو مولفه رنگی هستند که محدوده آنها بین ۱۲۰ تا ۱۲۰- است [6].

اثر درصد آلایش نیکل بر روی پارامترهای رنگی نانوذرات

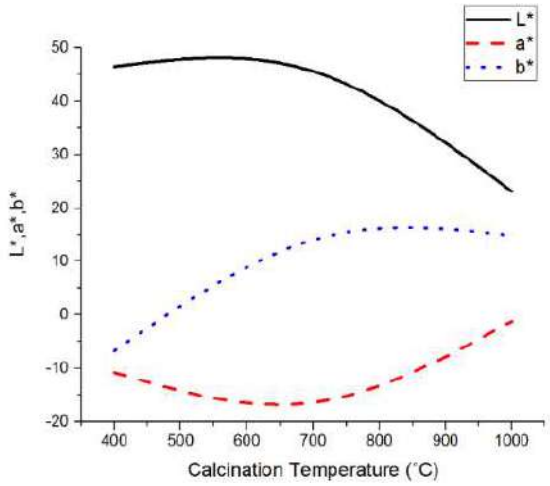
در شکل ۵ اثر درصد آلایش آلومینا به نیکل بر روی پارامترهای مختلف رنگی نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱ مشاهده میشود پس از اعمال عملیات کلسیناسیون به مدت۲ ساعت در دمای $700\ ^{\circ}C$ بر روی نمونه خالص، نانوذرات از میزان رنگ سبز مطلوبی بر خوردار نیستند. به عبارت دیگر پارامتر(a*) در این نمونه ها مقدار بالایی دارد. با افزایش درصد نیکل، مشاهده شد که پارامتر (a*) کم میشود و میزان درجه رنگ سبز نانودرات افزایش می یابد و نمونه سنتز شده با درصد آلایش ۱۵٪ رنگ سبز قابل قبولی دارد.



شکل-۵ اثر درصد آلایش نیکل بر روی پارامترهای رنگی نانوذرات

اثر دمای کلسیناسیون بر روی پارامترهای رنگی نانوذرات

نمونه کلسینه شده در دمای ۴۰۰ کمترین مقدار b* را دارد در نتیجه درجه رنگ آبی در آن بیشتر است. با افزایش دمای کلسیناسیون از 700 °C به 1000 °C رنگ نانوذرات از Breaker Bay به Mikado تغییر می کند. در شکل ۶ نیز اثر دمای کلسیناسیون بر روی پارامترهای مختلف رنگی نانوذرات مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود که هرچه دمای کلسیناسیون کمتر باشد نانوذرات درخشندگی بیشتری دارند. نمونه کلسینه شده در دمای ۴۰۰ بیشترین میزان درخشندگی را از خود نشان می دهد. با توجه به شکل ۶ پارامتر a* ابتدا کاهش می یابد و دوباره در دمای ۷۰۰° C افزایش نسبی پیدا می کند. همچنانکه مشاهده می شود نمونه کلسینه شده در دمای ۷۰۰ کمترین مقدار a* را دارد در نتیجه درجه رنگ سبز در آن بیشتر میباشد.



شکل۶ اثر دمای کلسیناسیون بر روی پارامترهای رنگی نانوذرات:

نتیجه گیری

در این مقاله نانوذرات رنگی آلومینا آلاییده به نیکل با اندازه بلورک کمتر از ۱۰ نانومتر به روش سل-ژل تهیه شد.

در تصاویر FESEM حاصل از نمونه ها ذرات به شکل کروی با سطحی صاف ظاهر شده اند و اندازه‌ی ذرات درحدود ۱۶nm الی ۲۱nm تخمین زده شد که با افزایش درصد آلایش اندازه‌ی ذرات بیشتر شده است. نتایج رنگ سنجی این رنگدانه ها نسبت به دمای کلسیناسیون و درصد آلایش نیکل حساس هستند و با کنترل آنها می توان نانوذراتی در رنگهای مختلف تولید کرد.

مرجع ها

[1] A. M. Abyzov, Oxide and Alumina Ceramics (review). Part.3, Russian Manufactures of Alumina Ceramics, Vol.60, 2019, pp. 183-191, 2019.

[2] S.Anbarsu, S.Ilangovan, K. Usharani, A. Prabhavathi, M. Sugany,S. Balamurugan, C. Kayathiri, M. Karthika, V.S. Nagarethinam, A.R. Balu, Visible light mediated photocatalytic activity of Ni-doped Al_2O_3 nanoparticles, Vol. 18, p. 1004163, 2020.

[3] N. Kumar, K.Kishore, S. Yadav, P. Sharma, materialstoday, Characterisation of Ni-Al_2O_3 composite coatings at different Al_2O_3 concentrations, Proceedings, 2024, In Press.

[4] G. Murugadoss • M. Rajesh Kumar, Synthesis and optical properties of monodispersed Ni2+-doped ZnS nanoparticles, Appl. Nanosci.Vol.4, pp. 67–75, 2014.

[5] Y. S. Kumar, P. Jeevanandam, Synthesis of NiO–Al_2O_3 nanocomposites by sol–gel process and their use as catalyst for the oxidation of styrene, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 610, pp. 567-574, 2014.

[6] Katherine Leon,Domingo Mery, Franco Pedreschi, J orge León, Color measurement in L∗a∗b∗ units from RGB digital images, Food Research International, Vol. 39 (10), 2006, pp. 1084-1091.

بهینه‌سازی به دام انداختن نور در یک چارچوب رسانای شفاف آرایه‌ای برای بهبود عملکرد فوتوآندهای هماتیت

بهروز افتخاری‌نیا

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران.

چکیده- هماتیت، به دلیل شکاف باند ایده‌آل و فراوانی آن در زمین، یک ماده‌ی جذاب برای شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب است. با این حال، کارایی کامل استفاده از فوتوالکترودهای هماتیت به دلیل طول انتقال کوتاه حامل‌های حفره در آن محقق نشده است. در این مقاله، مدل‌سازی الکترومغناطیسی میدان کامل برای یک الکترود شفاف نانوساختار متناوب که با یک فیلم نازک هماتیت پوشانده شده است، بررسی می‌شود. ما متوجه شدیم که ارتفاع و کسر پرشدگی نانوساختارها ویژگی‌های کلیدی در طراحی و بهینه‌کردن هستند و نانوساختارهای بلند با نسبت پرشدگی کم، منجر به شکل‌گیری مدهای تشدید درون ساختار شده و جذب نور در لایه‌ی هماتیت را افزایش می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که چگالی جریان تا ۹/۴ $mA.cm^{-2}$ را می‌توان در یک لایه هماتیت با ضخامت ۲۰ نانومتر که به‌طور یکنواخت بر روی یک چارچوب رسانای شفاف نانوساختار آرایه‌ای لایه‌نشانی شده، به دست آورد.

کلیدواژه- نانومیله‌های اکسید رسانای شفاف، فوتوالکترود هماتیت، شکافت آب

Optimization of light trapping in a periodic transparent conductive framework to improve the performance of hematite photoanodes

Behrooz Eftekharinia

Department of Physics, Faculty of Basic Science, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

B.eftekharinia@nit.ac.ir

Abstract- Hematite is an attractive material for photoelectrochemical water splitting due to its near ideal bandgap and abundance in the Earth. However, the full potential of hematite has not been realized due to its short hole transport distance. In this paper, full-field electromagnetic modeling is used to study a periodic nanostructured transparent electrode coated with a thin hematite film. We find that the height and filling ratios of the nanostructures are the key design features, where the high nanostructures with low filling ratios are the ideal design for a nanostructured electrode with resonant-sized components. Simulated results show that current densities of up to 9.4 $mA.cm^{-2}$ can be achieved in a 20 nm thick hematite layer deposited evenly on a properly designed nanostructured transparent conductive framework.

Keywords: Transparent conductive oxide nanorods, Hematite photo-electrode, Water splitting

1. Introduction

Photoelectrochemical (PEC) splitting of water has been widely pursued during the past decade as a sustainable mean for producing hydrogen. There has been tremendous research on semiconductor materials as photoanodes for PEC purposes. Among different semiconductors, hematite has the advantage of earth-abundance; however, it suffers from short minority carrier transport distance that significantly limits the performance [1-2].

Here we use full-field electromagnetic calculations to study how the morphology of a nanostructured transparent conductive oxide affects the light trapping in a hematite layer uniformly coated on top. The nanostructures are assumed to be periodic arrays of transparent conductive oxide (TCO) stripes and we vary the size and spacing of these nanorods and study their impact on the light absorption in hematite. We study the impact of the nanostructure geometrical parameters on the light absorption in the hematite layer. Subsequently, we attribute these finding to the physics of optical resonators where at resonance the optical absorption can be maximized.

2. Methods and Device Structure

We study a nanostructured photoanodes schematically shown in Fig. 1 in which the nanostructure is coated onto a 200-nm fluorinated tin oxide (FTO) transparent electrode on a glass substrate. The FTO is a TCO material that is widely used for photoelectrochemical water splitting system therefore we carry out our calculations for this material.

The structure (Fig. 1(a)) comprises an ordered array of FTO stripes uniformly coated with a 20-nm thick layer of hematite. FTO is responsible for electron collection and hematite thin film coated on top functions as the active medium for photo-electrochemical water oxidation reaction. Important geometrical parameters of the structure include the lattice constant, P, the height of the FTO rods, H, and filling ratio (FR), defined as the fraction of a unit-cell occupied by the FTO.

To calculate light absorption in this nanostructure, we conduct full-field electromagnetic simulations by solving Maxwell equations inside a unit cell of the structure using FEM. The structure is periodic along the x-axis and we carry out computations only for a unit cell with periodic boundary conditions (PBC), also called Floquet boundary conditions, applied on both sides. The sunlight illumination is unpolarised; therefore, it can be assumed as an equal share of transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarization. Definition of TM (or TE) polarized light is that the H- (E-) component is perpendicular to x-y plane and parallel to the z-axis. Perfectly matched layer (PML) condition is applied at the bottom of computation domain to simulate the propagation into the glass substrate without any reflection.

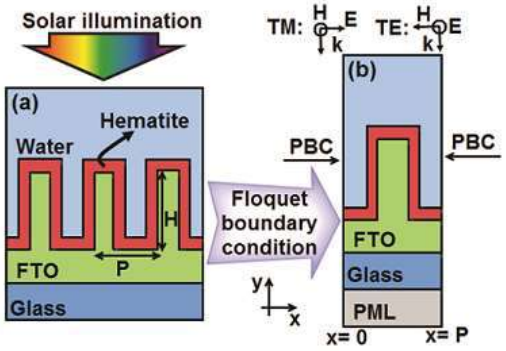


Fig. 1: (a) Schematic of the Fe_2O_3/FTO nanostructured electrode, which is periodic along the x-axis. The light enters the cell from the water side, (b) A unit cell of the two-dimensional electrode used for FEM simulation, which is limited on both sides by PBC (periodic boundary condition) and PML (perfectly matched layer) at the bottom.

The absorption current density or maximum achievable photocurrent density is calculated by integrating optical absorption multiplied by standard air mass 1.5 (AM1.5) photon flux expressed as:

$$J_a\,(\mathrm{mA.cm^{-2}}) = (e/hc)\int A(\lambda)\Phi_{AM1.5}\lambda\, d\lambda \qquad (1)$$

where $A(\lambda)$ is the optical absorption, $\Phi_{AM1.5}$ is AM1.5 photon flux, λ is the wavelength, e is the unit charge of the electron, h is the Planck constant, c is the speed of light in vacuum, and the integration is carried out in the 400-620 nm wavelength range, where 620 nm is the optical absorption edge of hematite.

3. Simulations and Results

The most important design parameters are the lattice constant (P), the height (H), and the FR of the FTO nanorods in the structure with 20 nm hematite coating. We vary lattice constant in 300-460 nm range with 20 nm steps for four given heights of 250, 400, 650, and 1500 nm. The filling ratio of the FTO is fixed at 50% and it is uniformly coated with a 20-nm hematite layer. To conduct a full assessment on the structural design, we evaluate J_a values versus lattice constant for four different FTO stripes heights. As shown in Fig. 2, the increment of lattice constant leads to the reduction of J_a for short stripes of H= 250 and 400 nm. However, the photocurrent density is not dramatically affected by variations in the lattice constant for longer stripes of H=650 and 1500 nm. The photocurrent density of the H=1500 nm reaches nearly 8 $\mathrm{mA.cm^{-2}}$ using a 20-nm thick hematite coating. This illustrates the excellent potential of FTO/hematite nanostructures for improving optical absorption and photocurrent generation in extremely thin hematite layers.

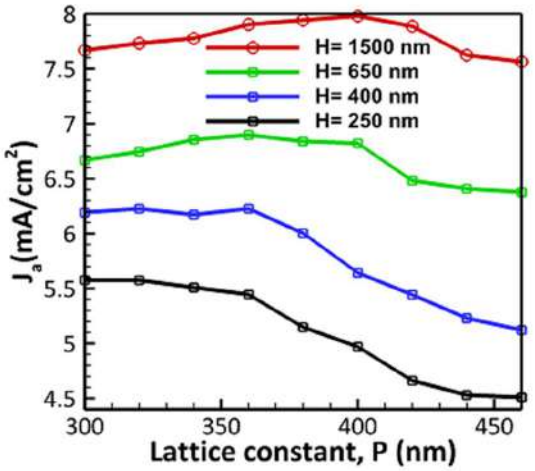


Fig. 2 Absorption photocurrent density (J_a) values that have been calculated for FTO/hematite (20 nm) nanostructures at different P and H values.

Fig. 3(a) and (b) shows the optical absorption spectra in a 20-nm hematite thin film uniformly coated onto FTO rods of H=250 nm and three different lattice constants for TE and TM polarizations of the incident light. These spectra show a number of peaks that their wavelengths shift with varying the lattice constant. Fig. 3 reveals that the absorption peaks are shifted to longer wavelengths as the lattice constant increases.

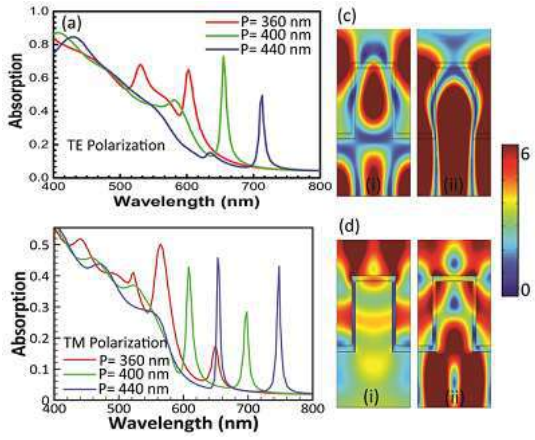


Fig. 3 Optical absorption spectra in the 20 nm-thick hematite thin film for FTO/Fe_2O_3 nanostructured electrodes of H= 250 nm and three different values of lattice constants, P, under (a) TE- and (b) TM-polarized light incidence. Profiles of electric field amplitude for (c) TE polarization, P= 400 nm: (i) λ= 582 nm, (ii) λ= 655 nm, and (d) TM polarization, P= 400 nm: (i) λ= 525 nm, (ii) λ= 605 nm.

The resonance in this structure takes place through the light localization in individual nanorods followed by coupling the localized light in individual stripes to the localized modes of nearby stripes in the lattice [3-4]. Thus, these modes hybridize and form a new set of modes that are referred to as guided-resonance or grating modes. Furthermore, since the guided resonance modes originate from the hybridization of the cavity modes of individual nanorods therefore the density and wavelength of the guided resonance modes is strongly affected by the size and height of each strip.

Fig. 3(c) and d shows the colour-plots of electric field amplitude across a unit cell of nanostructure with P=400 nm at two wavelengths of absorption peak for TE and TM polarizations. These plots show that for TE light, the electric field is strongly localized within the FTO stripes and its overlap with the hematite shell leads to the peak in optical absorption. The situation in TM light incidence slightly differs where there is not a clear light localization within the FTO nanorods but the electric field is particularly strong at parts of hematite shell.

Fig. 4(a) and (b) shows the absorption spectra for FTO/hematite nanostructured electrode with different heights and P= 400 nm for TE and TM polarizations, respectively. Comparison of the absorption spectra of Fig. 4 shows that as the height of the stripes increases i) the optical absorption in hematite, particularly at short wavelengths, increases and ii) more peaks appear in the absorption spectra of the electrode. These effects indicate the height of the stripes affects the density of resonance modes of the structure. This is related to the fact that the longer stripes support a larger number of resonance modes individually and therefore in the periodic nanostructure they lead to larger density of resonance modes. This notion is confirmed by the profile of electric field amplitude (Fig. 4(c) and (d)) showing intensity fringes along within the strip, an indication of optical resonance at the stripe cross-section.

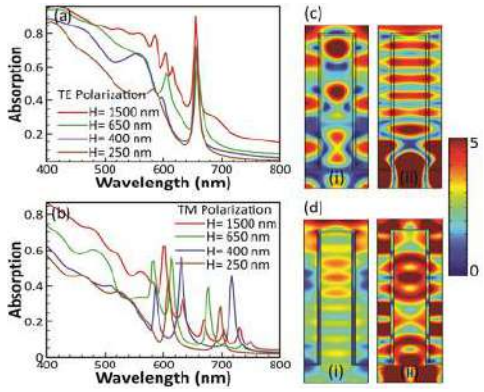


Fig. 4 Optical absorption spectra in the 20 nm-thick hematite thin film for FTO/Fe_2O_3 nanostructured electrodes of P= 400 nm with four different FTO nanorods heights for (a) TE and (b) TM polarized-light incidence. Profile of electric field amplitude for (c) TE polarization at (i) λ= 585 nm, (ii) λ= 655 nm, and (d) TM polarization at (i) λ= 560 nm, (ii) λ= 600 nm.

Fig. 5 shows the calculated absorption photocurrent densities versus FR for nanostructures with H= 650, P= 360 nm, and H=1500 nm, P=400 nm.

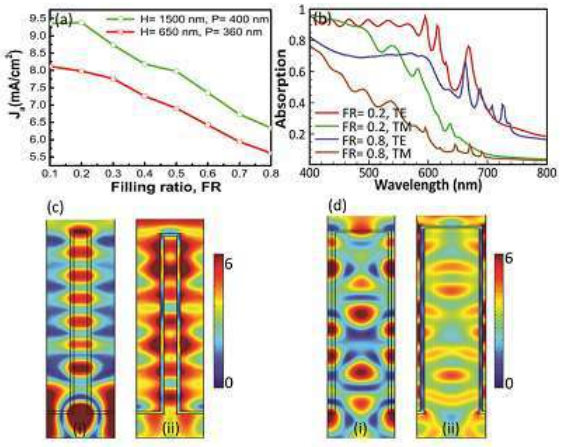


Fig. 5 (a) Absorption photocurrent density versus filling ratio of FTO nanorods in the lattice, (b) Optical absorption spectra in a 20-nm hematite shell uniformly coated onto a FTO nanostructure of (H= 650, P=360 nm) and (H=1500 nm, P= 400 nm) as FR varies from 0.1 to 0.8. Profiles of electric field amplitude for in a nanorod of H=1500 nm, P=400 nm, and (c) FR=0.2 at (i) λ=590 nm, (ii) λ=665 nm and (d) FR=0.8 at (i) λ=590 nm, (ii) λ=665 nm under TE-polarized light incidence.

It reveals that J_a is significantly higher at small FR values of 0.1 and 0.2 for both electrodes reaching a maximum of 9.4 mA.cm^{-2} for the nanostructured electrode of H=1500 nm, P=400 nm. Fig. 5(b) shows the optical absorption spectra for the two nanostructured electrodes at FR=0.2 and 0.8. The color-plots of electric field amplitude shown in Fig. 5(c) and (d) illustrate that the electrode with FR=0.2 the light couples to the resonance mode of the stripe and have a strong interaction with the hematite shell.

References

[1] M. Mushtaq, P. U. Sathyakam, and R. Vijayaraghavan, "Performance, comprehension and applications of hematite-based photoanodes in PEC water splitting," Next Materials 3(1), 100159 (2024).

[2] I. Kondofersky et al., "Electron Collection in Host–Guest Nanostructured Hematite Photoanodes for Water Splitting: The Influence of Scaffold Doping Density," ACS applied materials & interfaces 7(8), 4623-4630 (2015).

[3] A. Dabirian, and N. Taghavinia, "Theoretical study of light trapping in nanostructured thin film solar cells using wavelength-scale silver particles," ACS applied materials & interfaces 7(27), 14926-14932 (2015).

[4] N. Li, Y. Lai, S. H. Lam, L. Shao, J. Wang, "Directional control of light with nanoantennas," Advanced Optical Materials 9(1), 2001081 (2021).

اندازه گیری دما و چگالی پلاسمای سیم انفجاری با استفاده از روش طیف سنجی

مریم اکبری نساجی*[۱]، رضا امرالهی[۱] مرتضی حبیبی[۱]، حسین جعفری[۱]

[۱] دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی ۴۴۱۳- ۱۵۸۷۵ ، تهران- ایران

چکیده – این مقاله توصیفی بر طراحی و ساخت دستگاه پلاسمای پالسی دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. در این دستگاه از یک بانک خازنی به ظرفیت ۳۶۰ میکروفاراد و ولتاژ ۲/۵ کیلو ولت استفاده کرده ایم. توان دستگاه ۱۰۰۰ ژول است. یکی از فاکتورهایی که برای بهینه سازی دستگاه باید در نظر گرفته شود، مطالعه و بررسی اثر جنس سیم در قدرت موج شوکی دستگاه است. سیم در هر بار تخلیه الکتریکی تغییر حالت می دهد و به پلاسما تبدیل می شود. در این مقاله مشخصات پلاسمای سیم را با استفاده از روش طیف سنجی به دست آوردیم. پلاسمای سیم، پلاسمای آرک تعادلی است . دمای و چگالی پلاسمای سیم استیل را به ترتیب ۰/۲ الکترون ولت و cm^{-3} ۲×۱۰^{۱۶} به دست آوردیم.

کلیدواژه- سیستم پلاسمای پالسی، سیم انفجاری، فشار، موج ضربه، دما.

Measuring the temperature and density of plasma generated by wire explosion using OES methods.

Maryam Akbari Nasaji[1*], Reza Amrollahi[1] , Morteza Habibi[1,] , Hossein Jafari[1]

[1]Department of Physics and Energy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran 159163-4311, Iran

[*] mnasaji@aut.ac.ir

Abstract- This article provides a detailed overview of the design and construction of a pulsed plasma system at Amirkabir University of Technology. The device features a capacitor bank with a capacity of 360 µf and operates at a voltage of 2.5 kV, delivering a total power of 1000 joules. To optimize the performance of the device, it is essential to study the impact of different wire materials on the power of the shock wave produced. During operation, the wire transforms due to electric discharge, converting it into plasma. In this study, we characterized the wire plasma using OES methods. The results indicate that the wire plasma behaves as a balanced arc plasma, with a temperature of 0.2 eV and a density of 10^{-16} cm^{-3}.

Keywords: Pulse plasma system, wire explosion, pressure, shockwave, temperature.

مقدمه

با توجه به توسعه روزافزون استفاده از سیستم های پلاسمای پالسی ولتاژ بالا در صنایع بزرگ مانند صنایع نظامی، لیزرهای پالسی با توان بالا، افزایش بهره برداری از چاه‌های نفت، تولید نانو پودرها، ... مطالعه این سیستم‌ها بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از مسایلی که نیاز است بیشتر به آن پرداخته شود مطالعه ویژگی های پلاسمای تولید شده توسط این سیستم‌های پالسی و نحوه ایجاد و انتشار آن در محیط و قدرت موج ضربه ناشی از پلاسما است. [۱و۲و۳] . انرژی موج ضربه در کاربردهای مختلف متفاوت است. بنابراین، با تغییر سطح انرژی، پارامترهای مدار و تغییر در اندوکتانس مدار، می‌توان انواع مختلفی از امواج ضربه‌ای را برای کاربردهای مهم تولید کرد. طراحی، ساخت و دستیابی به حالت بهینه برای همه طرح‌بندی‌های تجهیزات کاربردی، از جمله دستیابی به موج ضربه بهینه، تابعی از مشخصات دما و چگالی پلاسماست. [۴و۵]. مشخصات پلاسما نیز تابعی از مشخصات سیم انفجاری، انرژی و ویژگی‌های مدار الکتریکی، است. مطالعه درباره ویژگی های پلاسمای سیم ما را در دریافت موج ضربه قوی تر کمک می کند. در این مقاله از یک سیستم پلاسمای پالسی صنعتی استفاده می شود و پلاسمای سیم آن مورد مطالعه قرار می گیرد.[۶و۷و۸]. برای دستیابی به بالاترین راندمان عملیاتی، دستگاه پلاسمای پالسی نیاز به منبع تغذیه ولتاژ بالا با سطح ولتاژ پایدار و ریپل کم دارد.[۹و۱۰]. اساس فیزیکی کار سیستم پلاسمای پالسی استفاده از پالس های متوالی با قدرت یکسان است که در فواصل زمانی برابر با تخلیه یک جریان الکتریکی بسیار زیاد از یک هادی فلزی با قطر معین است. وقتی این جریان بسیار زیاد از سیم عبور می کند، سیم فلزی ناگهان ذوب می شود و منفجر می شود. انرژی این انفجار به صورت بخار فلزی با چگالی، دما و فشار بسیار بالا در فضای اطراف پخش می شود. جبهه موج تولید شده در اثر انفجار با سرعت مافوق صوت به صورت شعاعی گسترش می یابد و از روزنه های اطراف خود عبور می کند و منجر به ایجاد اثرات کششی و فشرده سازی در محیط می شود. قسمت های منبع تغذیه و بانک خازن در قسمت های قبل توضیح داده شده است.

ستاپ آزمایش

راه اندازی سیستم پلاسمای پالسی انفجاری با تخلیه میکروثانیه و قابلیت تغییر نوع، ضخامت و طول سیم‌های مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. این مجموعه در پژوهشکده فیزیک و انرژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شده است.

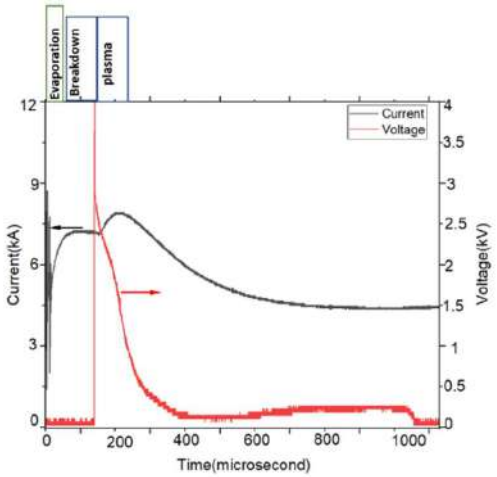


شکل۱: چیدمان آزمایش طیف سنجی سیم انفجاری

سیستم های تشخیصی که در این راه اندازی استفاده کردیم: ۱- سیم پیچ روگوفسکی برای اندازه گیری جریان، ۲- پروب ولتاژ بالا برای اندازه گیری ولتاژ تخلیه خازن، ۳- پروب فشار برای اندازه گیری فشار موج ضربه. حداکثر ولتاژ شارژ ۲/۵ کیلو ولت است. حداکثر جریان تخلیه ۱۲ کیلو آمپر است. زمان تخلیه فعلی ۲۵۰ میکروثانیه است. ظرفیت خازن ۳۶۰ میکروفاراد می باشد. حداکثر توان دستگاه ۱۰۰۰ ژول است. اندوکتانس مدار ۱۴۰ نانوهانری است. وابستگی زمانی یکی از ویژگی‌های سیستم‌های انفجاری است که هر چه تخلیه کوتاه‌تر رخ دهد، موج ضربه قوی‌تر می‌شود. در این صورت نسبت di/dt بیشتر خواهد بود. یک اسیلوسکوپ چهار کاناله Tektronic استفاده شده است.

طیف نور مرئی بدست آمده از پلاسمای پالسی سیم در شرایط مختلف حاوی اطلاعات مهمی می باشد. هریک از خطوط متناظر با یک گذار الکترونی یک یون می‌باشد. خطوط متناظر با یون مربوطه نامگذاری شده‌اند. داده‌ها و عناصر با استفاده از داده‌های سایت NIST تعیین شده اند. برای سیم استیل ناخالصی ها مشخص شده اند. طیف سنج مورد استفاده، ساخت شرکت فناوران فیزیک نور می‌باشد. در اینجا از چند نمونه سیم برای اندازه‌گیری استفاده کرده‌ایم. سیم های تنگستن، مس-نیکل و استیل. سیم های مورد نظر در بخش مرکزی فیدر قرار می گیرد.

سیم ها به طول ۴ سانتیمتر و قطر ۲۰۰ میکرومتر هستند. انرژی ۱۰۰۰ ژول در آن‌ها تخلیه می‌شود. مراحل تبدیل سیم به پلاسما و ایجاد موج شوکی در شکل ۲نشان داده شده است.



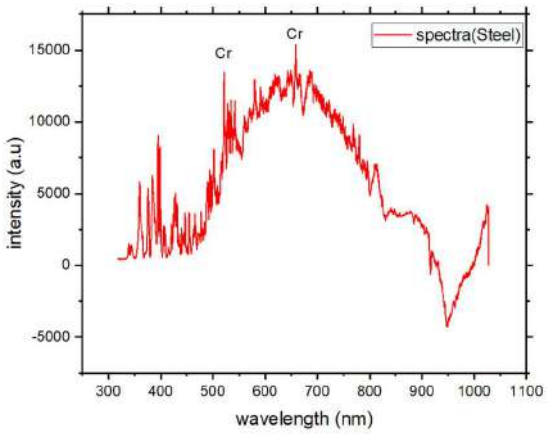
شکل۲: مراحل تخلیه الکتریکی در سیم استیل، جبهه جریان و ولتاژ تخلیه

در جدول ۱ مشخصات تخلیه الکتریکی در این سه سیم به دست آمده و باهم مقایسه کرده‌ایم. فشار را با استفاده از پروب فشار JC90 ساخت شرکت jiucheng اندازه‌گیری کردیم.

جدول ۱: مشخصات الکتریکی تخلیه در سیم‌های تنگستن، مس-نیکل و استیل

سیم	جریان kA	نشست انرژی (ژول)	فشار MPa	انرژی موج شوکی (ژول)
تنگستن	۶/۲۵	۳۵۰	۶/۳	۲۱۲
مس-نیکل	۶/۱۸	۳۴۰	۸	۳۴۲
استیل	۵/۲۵	۳۵۵	۸/۷	۴۰۴

از آنجایی که پلاسمای تشکیل شده در سیم از نوع آرک در فشار اتمسفر است یک پلاسمای تعادلی است. اگر زمان تخلیه کوتاه باشد انرژی اتلافی از میزان انرژی وارد شده خیلی کمتر باشد در این حالت شرط LTE برقرار است. طیف گسیلی پلاسمای استیل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف گسیلی پلاسمای استیل با استفاده از طیف سنج

در این پلاسما، چگالی بالا و دما پایین است. پس می توان از رابطه بولتزمن برای محاسبه دما استفاده کرد. .

$$\mathrm{Ln}\left(\frac{I_{ik}\lambda_{ik}}{hc\ {}_kA_{ik}}\right)=\left(-\frac{1}{kT_e}\right)E_k+\ln\left(\frac{FC}{U(T_e)}\right) \quad (1)$$

در فرمول بالا I_{ik}, h, c, A_{ik}, g_k, F, λ_{ik}, U(Te), E_k, k Te به ترتیب دمای الکترون، ثابت بولتزمن، انرژی انتقالی به تراز بالاتر،تابع جز وزنی، طول موج انتقالی، بازده اپتیکی، تابع وزنی، احتمال انتقال بین ترازها،سرعت نور، ثابت پلانک و خط شدت انتقالی بین خطوط است. برای محاسبه چگالی از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$N_e = 10^{16}\left(\frac{\Delta\lambda_{stark}}{2w}\right) (۲)$$

در این رابطه پهنای استارک ۰/۰۱۸۶ A^o است. W هم معادل ۰/۰۴۷ انگسترم است.

با شناسایی عناصر موجود در طیف، مشخص شد که در محدوده طول موج ۳۰۰-۹۰۰nm، خطوط طیفی آهن، کروم، روی، سیلسیم، منگنز، منیزیم، کربن و اکسیژن و هیدروژن به عنوان مهمترین ناخالصی‌ها شناسایی شده‌اند. از آنجایی که مقدار ناخالصی ها در این بازه بسیار فراوان هستند روی دو پیک اصلی که کرم هستند برای اندازه‌گیری دما تمرکز کرده‌ایم. با استفاده از رابطه ۴ و کد متلب اندازه دما برای پلاسمای سیم معادل ۲۲۰۰ کلوین به دست آوردیم و چگالی $۰/۲ * ۱۰^{۱۶}$ است. با توجه به مراجع پاسخ قابل قبولی است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله دستگاه پلاسمای پالسی را معرفی کردیم و اجزای ساخت و الزامات طراحی را بیان کردیم. در ادامه به مطالعه تجربی انفجار سیم‌های مختلف پرداختیم و مشخصات موج شوکی آن ها را باهمدیگر مقایسه کردیم. با استفاده از روش طیف سنجی دما و چگالی پلاسمای سیم را به دست آوردیم. دمای پلاسمای سیم استیل معادل ۲۲۰۰ کلوین و چگالی آن $۱۰^{۱۶}$* ۰/۲ است.

مرجع‌ها

[1] J. Mariyate, A. Bera, Paradigm shift towards the sustainability in upstream oil industry for enhanced recovery - A state-of-art review, J. Clean. Prod. 386 (2023) 135784. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135784.

[2] R. Han, J. Wu, H. Zhou, Y. Zhang, A. Qiu, J. Yan, W. Ding, C. Li, C. Zhang, J. Ouyang, Experiments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir stimulation, Matter Radiat. Extrem. 5 (2020). https://doi.org/10.1063/1.5135725.

[3] L. Xie, H. Liang, G. Zhao, B. Wei, Z. Su, H. Yang, W. Hua, Characteristics of pulsed surface arc discharge actuator and its verification of flow control over a Delta wing, Sensors Actuators, A Phys. 297 (2019) 111550. https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111550.

[4]Z. Zhang, B. Nie, Z. Zhao, C. Zhang, Investigation on Large-Scale Tests of Rock Fracturing by High-Voltage Electric Pulse with Voltage as a Variable, Energy and Fuels. 37 (2023) 9692–9703. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01256 [5] H. Li, H. Wu, Z. Wang, G. Zhang, J. Li, H. Zhou, M. Wang, Experimental and numerical simulation of the propagation law of shock waves in corrugated steel-lined tunnels, Process Saf. Environ. Prot. 168 (2022) 1019–1030. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.051.

[6]R. Han, J. Wu, A. Qiu, W. Ding, Y. Zhang, Electrical explosions of Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Nb, Mo, Ag, Ta, W, W-Re, Pt, and Au wires in water: A comparison study, J. Appl. Phys. 124 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5030760.

[7] Y.E. Krasik, A. Fedotov, D. Sheftman, S. Efimov, A. Sayapin, V.T. Gurovich, D. Veksler, G. Bazalitski, S. Gleizer, A. Grinenko, V.I. Oreshkin, Underwater electrical wire explosion, Plasma Sources Sci. Technol. 19 (2010) 34020. https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/3/034020.

[8] Akbari Nasaji, M., Habibi, M., & Amrollahi, R. (2024). The effects of wellbore stone materials and fluid density on the shock wave induced by plasma pulse system propagation in rock: An analytical and experimental study. Review of Scientific Instruments, 95(7)..

[9]H. Jafari, M. Habibi, High-Voltage Charging Power Supply Based on an LCC-Type Resonant Converter Operating at Continuous Conduction Mode, IEEE Trans. Power Electron. 35 (2020)

[10] Nasaji, M. A., Habibi, M., & Amrollahi, R. (2024). Design, construction, and testing of an exploding wire pulsed plasma system for generating shock waves in industrial applications. Radiation Physics and Chemistry, 224, 112094. https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2739757.

بررسی تصاویر شبکیه چشم انسان با استفاده از توموگرافی همدوس نوری برای تشخیص بیماری دژنراسیون ماکولا

حسن پاکارازده[۱] ، لعیا حریری[۱] ، علی عظیمی[۲]

[۱]دانشکده فیزیک ، دانشگاه صنعتی شیراز ، شیراز ، ایران

[۲]مرکز تحقیقات چشم پزشکی پوستچی، گروه چشم پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

چکیده: در این مقاله، ابتدا اصول و مبانی دستگاه توموگرافی همدوس نوری معرفی می‌گردد. سپس به بررسی و تحلیل تصاویر به‌دست‌آمده از این دستگاه در مرکز چشم‌پزشکی پوستچی شیراز پرداخته می‌شود. در این پژوهش، تصاویر شبکیه بیماران مبتلا به دژنراسیون ماکولا مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی شامل تحلیل ضخامت شبکیه و ویژگی‌های خاص این بیماری در بیماران است. در پایان نیز، داده‌های حاصل به صورت جدولی تنظیم و ارائه می‌گردد.

کلیدواژه : دژنراسیون ماکولا، توموگرافی همدوس نوری (OCT) ، ضخامت شبکیه

Investigation of human retina images using optical coherence tomography for diagnosis of macular degeneration disease

Hassan Pakarzadeh[1], Laya Hariri[1] , Ali Azimi[2]

[1]Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

[2]poostchi ophthalmology research center, department of ophthalmology, school of medicine, Shiraz University of medical sciences, Shiraz, Iran

pakarzadeh@sutech.ac.ir, l.hariri98@gmail.com, ali.azimi1365@gmail.com

Abstract: In this paper, firstly, the principles and basics of the optical coherence tomography (OCT) device are introduced. Then, the images obtained from this device are examined and analyzed in Poustchi Ophthalmology Center of Shiraz. In this research, retinal image of patients suffering from various eye diseases are examined. This review includes the analysis of retinal thickness and types of diseases observed in these patients. Finally, the resulting data are listed in a tabular form.

Keywords: Macular degeneration, optical coherence tomography (OCT), Retinal thickness

مقدمه

توموگرافی همدوس نوری (OCT[1]) به‌عنوان یک فناوری پیشرفته تصویربرداری، به‌طور فزاینده‌ای در تشخیص و مدیریت بیماری‌های چشمی مورد توجه قرار گرفته است. این روش، با استفاده از نور همدوس، امکان تصویربرداری با دقت بالا از ساختارهای داخلی شبکیه چشم را فراهم می‌آورد و به پزشکان این امکان را می‌دهد که تغییرات میکروسکوپی در بافت‌ها را شناسایی کنند.[۱] OCT به‌ویژه در تشخیص و پیگیری بیماری‌هایی مانند دژنراسیون ماکولا، گلوکوم و رتینوپاتی دیابتی کاربردهای بارزی دارد. این فناوری نه‌تنها به تسهیل تشخیص زود هنگام کمک می‌کند، بلکه اطلاعات دقیقی درباره پیشرفت بیماری و پاسخ به درمان ارائه می‌دهد.[۲] در این مقاله، به بررسی تصاویر توموگرافی همدوس نوری در شبکیه چشم انسان برای بیماری دژنراسیون ماکولا در درمانگاه پوستچی شیراز پرداخته خواهد شد. ابتدا، اصول فنی و روش‌شناسی OCT معرفی می‌شود و سپس کاربردهای آن بررسی خواهد شد.

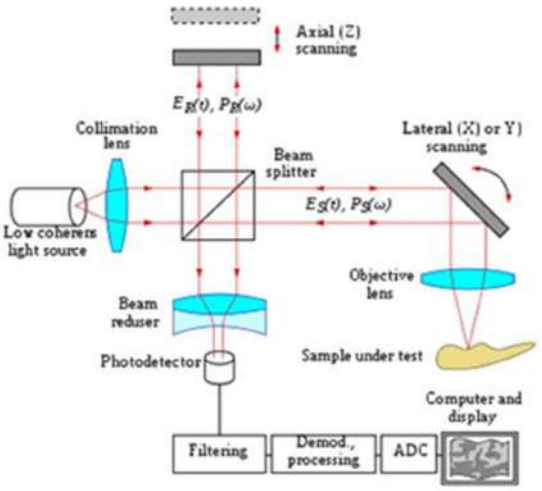
مبانی فیزیکی

(OCT) یک روش تصویربرداری با وضوح بالا است که بر اساس اصول تداخل نور و استفاده از نور همدوس بنا شده است. این روش به‌طور عمده در پزشکی و به‌ویژه در چشم‌پزشکی برای بررسی ساختارهای داخلی چشم، به‌ویژه شبکیه، به کار می‌رود. در این فناوری، یک منبع نور همدوس، معمولاً لیزر، به دو پرتو تقسیم می‌شود: یکی از پرتوها به بافت مورد نظر (شبکیه) تابانده می‌شود و پرتو دیگر به عنوان پرتو مرجع استفاده می‌شود. پس از تابش پرتو به بافت، نور منعکس شده از بافت به همراه پرتو

مرجع با یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند. این تداخل منجر به تولید الگوهای تداخلی می‌شود که می‌توانند به‌وسیله یک آشکارساز اندازه‌گیری شوند. با تغییر در عمق تابش نور و تحلیل الگوهای تداخلی، اطلاعاتی درباره ساختار لایه‌های مختلف شبکیه استخراج می‌شود. این روش به‌دلیل دقت بالا و قابلیت تصویربرداری غیرتهاجمی، به یکی از ابزارهای کلیدی در تشخیص و مدیریت بیماری‌های چشمی تبدیل شده است[۳] [۴] علاوه بر این، OCT از تکنیک‌های پردازش سیگنال و الگوریتم‌های تصویر برای بازسازی تصاویر استفاده می‌کند که امکان تجزیه و تحلیل دقیق‌تر و به‌دست آوردن تصاویر سه‌بعدی از بافت‌های شبکیه را فراهم می‌آورد. این قابلیت‌ها به پزشکان این امکان را می‌دهد که تغییرات ساختاری را در مراحل اولیه بیماری‌ها شناسایی کنند و درمان‌های مناسب را ارائه دهند. [۵]

نحوه کار دستگاه

در شکل ۱ یک پرتو نور تک‌رنگ از منبعی نوری گسیل می‌شود و پس از برخورد به یک پرتوشکاف، به دو پرتو تقسیم می‌گردد.



شکل ۱ : طرحواره دستگاه OCT .

یکی از این پرتوها به عنوان پرتو مرجع، به آینه‌ای هدایت شده و منعکس می‌شود. پرتو دیگر به عنوان پرتو نمونه، به سطح نمونه‌ای چندلایه تابیده می‌شود. بر اثر برخورد پرتو نمونه با لایه‌های مختلف نمونه، امواج بازتابیده شده از هر لایه با هم تداخل کرده و الگوی تداخلی پیچیده‌ای را ایجاد می‌نمایند. این الگوی تداخلی که توسط آشکارساز نوری ثبت می‌شود، حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد ضریب شکست و ضخامت لایه‌های مختلف نمونه است. با تحلیل دقیق این الگو، می‌توان ساختار داخلی نمونه را با دقت بالایی تعیین نمود .

تابش نور: یک منبع نور کم‌انرژی (معمولا نور مادون قرمز نزدیک) به داخل چشم تابانده می‌شود.

1 optical coherence tomography

بازتاب نور: بخشی از نوری که به شبکیه می‌رسد، بازتاب شده و به سمت دستگاه برمی‌گردد.

اندازه‌گیری زمان بازگشت: دستگاه زمان بازگشت نور را اندازه‌گیری می‌کند. با توجه به سرعت نور و زمان بازگشت، می‌توان فاصله بین هر لایه از شبکیه تا سطح چشم را محاسبه کرد.

ایجاد تصویر: با تکرار این فرآیند برای نقاط مختلف شبکیه، دستگاه می‌تواند یک تصویر سه بعدی دقیق از ساختارهای داخلی چشم ایجاد کند

در این فناوری، یک منبع نور همدوس، معمولاً از نوع لیزر، به دو پرتو تقسیم می‌شود. یکی از این پرتوها به عنوان پرتو مرجع به یک آینه هدایت شده و منعکس می‌گردد، در حالی که پرتو دیگر به بافت مورد نظر، یعنی شبکیه، تابانده می‌شود. پس از برخورد پرتو به بافت، نور منعکس شده از شبکیه با پرتو مرجع تداخل پیدا می‌کند. این تداخل منجر به تولید الگوهای تداخلی می‌شود که می‌توانند به وسیله یک آشکارساز نوری ثبت و تحلیل شوند. با تغییر عمق تابش نور و بررسی الگوهای تداخلی به‌دست آمده، داده‌های دقیقی در مورد ساختار لایه‌های مختلف شبکیه استخراج می‌شود.

دستگاه OCT :

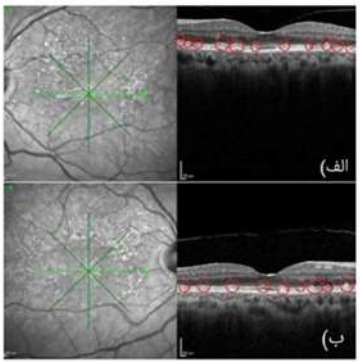
دستگاه OCT که در شکل ۲ ارائه شده است، نمونه‌ای از فناوری پیشرفته‌ای است که در مرکز پوستچی شیراز برای انجام عکسبرداری‌های پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه از برند هایدلبرگ، یکی از معتبرترین تولیدکنندگان تجهیزات تصویربرداری پزشکی در کشور آلمان، ساخته شده است.



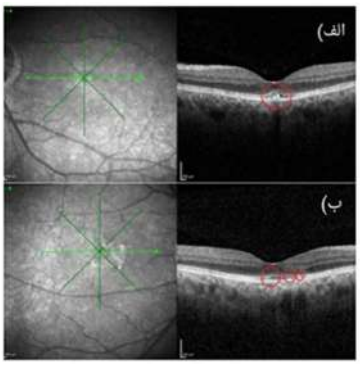
شکل ۲ : تصویر دستگاه OCT در مرکز چشم پزشکی پوستچی شیراز .

نمونه تصاویر شبکیه چشم :

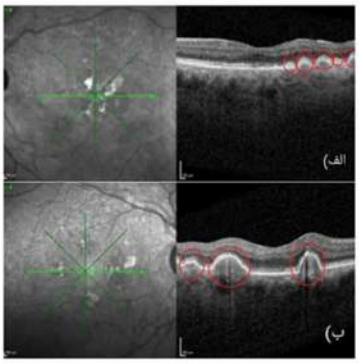
در شکل‌های ۳، ۴ و ۵، تصاویر چشم چپ و راست سه بیمار ارائه شده است.



شکل ۳ : نمونه شبکیه چشم خانم ۶۳ساله الف) چشم چپ ب) چشم راست .



شکل ۴ : نمونه شبکیه چشم آقای ۷۳ساله الف) چشم چپ ب) چشم راست .



شکل ۵ : نمونه شبکیه چشم آقای ۸۹ ساله الف) چشم چپ ب) چشم راست .

نواحی مشخص‌شده با دایره‌های قرمز، برآمدگی‌هایی را نشان می‌دهند که به‌وضوح نمایانگر وجود بیماری دژنراسیون ماکولا وابسته به سن (AMD) هستند. در مقایسه با چشم‌های سالم، در این نواحی لایه شبکیه به‌طور کامل و صاف بوده و فاقد هرگونه برآمدگی است. این تغییرات در لایه‌های شبکیه تأکیدی بر وجود بیماری AMD و اختلالات مرتبط با آن هستند.

نتیجه‌گیری :

در این مقاله، به بررسی اصول فیزیکی تصویربرداری همدوسی اپتیکی (OCT) پرداخته و کاربردهای بالینی آن در تهیه تصاویر شبکیه چشم بیماران مبتلا به دژنراسیون ماکولا (AMD) را مورد بررسی قرار داده‌ایم. با تحلیل تصاویر لایه‌های شبکیه و ارزیابی میزان برآمدگی در لایه مشخص شده در تصاویر ، توانستیم به میزان پیشرفت بیماری پی ببریم. این روش به پزشکان امکان می‌دهد تا با دقت بیشتری وضعیت بیماری را ارزیابی کرده و تصمیمات درمانی مناسبی اتخاذ کنند.

سپاسگزاری :

از جناب آقای دکتر مصطفی نظرپور به خاطر مساعدت و همکاری در تهیه تصاویر OCT صمیمانه سپاسگزاری می‌نماییم.

مرجع‌ها :

[1] Wojtkowski, M., et al., “Three-dimensional Retinal Imaging with High-Speed Ultrahigh-Resolution Optical Coherence Tomography,” In American Journal of Ophthalmology, 146(5), 679-687 (2008).

[2] Bagci, A. M., Shahidi, M., Ansari, R., Blair, M., Blair, N. P., Zelkha, R., “Thickness Profiles of Retinal Layers by Optical Coherence Tomography Image Segmentation,” In Am. J. Ophthalmol., 146(5), 679-687 (2008).

[3] Fujimoto, J. G., Pitris, C., Boppart, S. A., Brezinski, M. E., “Optical Coherence Tomography: An Emerging Technology for Biomedical Imaging and Optical Biopsy,” Neoplasia, 2(1), 9–25 (2000).

[4] Iwańczyk, S., Woźniak, P., Araszkiewicz, A., Grygier, M., Klotzka, A., Lesiak, M., “Optical Coherence Tomography in the Diagnosis of Myocardial Infarction with Non-obstructive Coronary Arteries,” Adv. Interv. Cardiol., 18(3), 192–200 (2022).

[5] Talcott, K. E., et al., “Automated Detection of Abnormal Optical Coherence Tomography Bscans Using a Deep Learning Artificial Intelligence Neural Network Platform,” Int. Ophthalmol. Clin., 64(1), 115–127 (2024).

کنترل اثر کشش فوتونی در سامانه‌ی کوانتومی دوترازی دوگانه

سارا استوارآذر، آذر وفافرد و مصطفی صحرایی

چکیده - در پدیده کشش فوتونی، پرتوی نوری با عبور از یک محیط متحرک دچار کشیدگی شده و یک جابه‌جایی در مسیر پرتوی خروجی ایجاد می‌شود. در این مقاله با در نظر گرفتن سامانه‌ی اتمی دوترازی دوگانه به عنوان محیط دی‌الکتریک متحرک تحت تابش باریکه‌های لیزری، اثر کشش جانبی فوتونی را در این محیط مورد مطالعه قرار خواهیم داد. با بررسی تاثیر میدان لیزری کنترلی بر روی کشش فوتونی، نشان داده می‌شود که ارتباط معکوسی میان آن‌ها وجود دارد و با افزایش فرکانس رابی میدان کنترلی، مقدار کشش فوتونی کاهش می‌یابد.

کلیدواژه- سامانه اتمی دوترازی دوگانه، کشش فوتونی، میدان لیزری

Control of the photon drag effect in a duplicated two-level quantum system

Sara OstvarAzar, Azar Vafafard, and Mostafa Sahrai

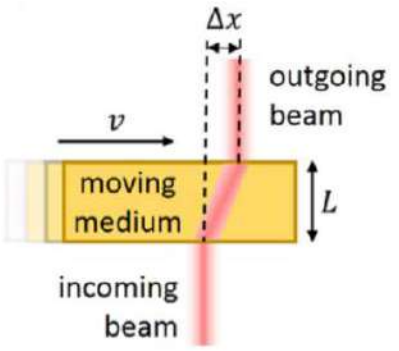
saraazary.1995@gmail.com

Abstract- In the photon drag phenomenon, a light beam is dragged by passing through a moving medium and the path of the transmitted beam is shifted. We are interested in investigating the photon drag effect in a duplicated two- level atomic system as a moving dielectric medium under laser beams radiation. It is shown that changing the Rabi frequency of the control field considerably affect the photon drag. Reducing the Rabi frequency of the control field leads to enhancement of the photon drag.

Keywords: Duplicated two- level atomic system, Photon drag, Laser field

مقدمه

درک علمی از اندرکنش تابش الکترومغناطیسی با ماده به طور مداوم در حال بهبود است و اهمیت زیادی در حوزه فیزیک اتمی و اپتیک کوانتومی دارد. درمیان انواع مختلف اندرکنش‌های نور و ماده بررسی کشش فوتونی نقش مهمی در پیشرفت دانش بنیادی و فناوری ایفا کرده است. کشش فوتونی تغییر مسیر نور هنگام عبور از یک محیط متحرک می‌باشد. منشا فیزیکی این پدیده، تغییر حالت قطبش خطی نور ناشی از اختلاف فاز بین حالت‌های قطبش دایروی راست و چپ می‌باشد که متناظر با تکانه زاویه‌ای نور است. تغییر حالت قطبش نور در کشش فوتونی باعث پیشرفت فناوری‌های نوین نظیر کدگذاری تصویر، سوئیچ‌های نوری و دروازه‌های منطقی و مدولاسیون کارآمد نور در دستگاه‌های فوتونیکی و پلاسمونیکی می‌شود. در سال ۱۸۱۸ آگوستین ژان فرنل پیش بینی کرد که نور منتشر شده در یک محیط متحرک تا حدی کشیده می‌شود. لورنتس تاثیر پاشندگی در یک محیط متحرک را بر روی اثر کشش فوتونی پیش بینی کرد و دریافت که پاشندگی قوی باعث افزایش این اثر می‌شود. با تابیدن نور به یک محیط متحرک ،فوتون‌ها بسته به نوع جابجایی محیط می‌توانند به یکی از سه حالت طولی، جانبی یا چرخشی کشیده شوند [۱, ۲]. طبق شکل ۱ کشش جانبی فوتونی عبارت است از تغییر مسیر نور هنگامی که عمود بر سرعت محیط اپتیکی منتشر می‌شود.



شکل ۳. طرح شماتیک از کشش جانبی فوتونی هنگام عبور از یک محیط متحرک[۳]

هم‌چنین جابه‌جایی چرخشی حالت قطبش خطی نور تحت زاویه کوچک، کشش چرخشی فوتونی نامیده می‌شود . اثر کشش فوتونی کاربردهایی در زمینه‌ی ساخت حسگرهای مولکولی مجتمع، آشکارسازهای نوری فوق سریع، افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، بررسی اثرات گرانشی بر روی نور، کشش ذرات سنگین نظیر نوترون‌ها ، تقویت نور همدوس و کشش پلاسمون‌های سطحی دارد [۴].

در این مطالعه، یک سیستم اتمی دو ترازی دوگانه در نظر گرفته می‌شود که تحت اعمال میدان‌های کنترلی قوی با فرکانس رابی Ω_c و کاوشگر ضعیف با فرکانس رابی Ω_p قرار گرفته است. سیستم دوترازی دوگانه را می‌توان نسخه تبهگن سیستم‌های دوگانه دانست که در زمینه پدیده‌های نوری غیرخطی تشدیدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جهت بررسی اثر کشش فوتونی در سامانه مورد نظر از دیدگاه نیمه کلاسیکی و معادلات حرکت ماتریس چگالی استفاده خواهیم کرد. هامیلتونی سیستم در اندرکنش با میدان‌های اعمالی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H_I = -\hbar\{[\Omega_p e^{-i\omega_p t}(|4\rangle\langle 1| + |3\rangle\langle 2|) + \Omega_c(|3\rangle\langle 1| - |4\rangle\langle 2|)]\} + c.c.\}. \quad (۱)$$

در ادامه جملات ماتریس چگالی از فرم کلی معادله حرکت ماتریس چگالی لیوویل به شکل زیر قابل محاسبه هستند:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H,\rho] + \mathcal{L}_\rho \quad (۲)$$

$$\dot{\rho}_{21} = -i\Omega_c e^{i\Delta_c t}\rho_{23} - i\Omega_p e^{i\Delta_p t}\rho_{24} + i\Omega^*_p e^{-i\Delta_p t}\rho_{31} - i\Omega^*_c e^{-i\Delta_c t}\rho_{41} \quad (۳)$$

$$\dot{\rho}_{31} = -i\Omega_c e^{i\Delta_c t}\rho_{33} - i\Omega_p e^{i\Delta_p t}\rho_{34} + i\Omega_c e^{i\Delta_c t}\rho_{11} + i\Omega_p e^{i\Delta_p t}\rho_{21} \quad (۴)$$

$$\dot{\rho}_{41} = -i\Omega_c e^{i\Delta_c t}\rho_{43} - i\Omega_p e^{i\Delta_p t}\rho_{44} + i\Omega_p e^{i\Delta_p t}\rho_{11} - i\Omega_c e^{i\Delta_c t}\rho_{21} \quad (۵)$$

$$\dot{\rho}_{23} = i\Omega^*_p e^{-i\Delta_p t}\rho_{33} - i\Omega^*_c e^{-i\Delta_c t}\rho_{43} - i\Omega^*_c e^{-i\Delta_c t}\rho_{21} - i\Omega^*_p e^{-i\Delta_p t}\rho_{22} \quad (۶)$$

$$\dot{\rho}_{34} = i\Omega_c e^{i\Delta_c t}\rho_{14} + i\Omega_p e^{i\Delta_p t}\rho_{24} - i\Omega^*_p e^{-i\Delta_p t}\rho_{31} + i\Omega^*_c e^{-i\Delta_c t}\rho_{32} \quad (۷)$$

به منظور بررسی برهمکنش اتم-میدان در سیستم پیشنهادی، از پذیرفتاری الکتریکی مختلط میدان کاوشگر به شکل زیر استفاده خواهیم کرد:

$$\chi = \frac{2N|\mu_p|^2}{\epsilon_0\,\hbar\Omega_p}\rho_p \qquad (۸)$$

که در آن N چگالی عدد اتمی و μ_p عنصر ماتریسی گشتاور دوقطبی الکتریکی برای گذار میدان کاوش‌گر است. با محاسبه پذیرفتاری الکتریکی، ضرایب شکست گروه و فاز (به ترتیب n_g و n_r) با استفاده از معادلات زیر حاصل می‌شوند:

$$n_g = 1 + 2\pi Re(\chi) + 2\pi\omega_p Re(\frac{\partial\chi}{\partial\Delta_p}) \qquad (۹)$$

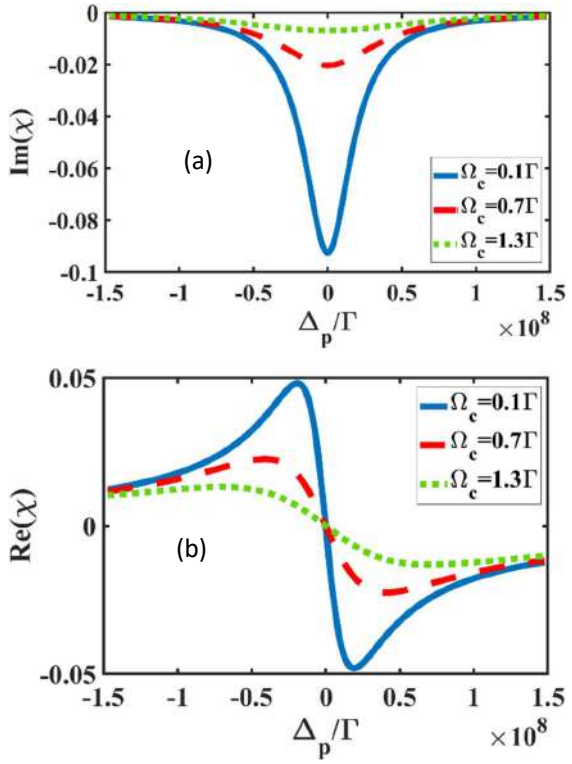
$$n_r = 1 + 2\pi Re(\chi) \qquad (۱۰)$$

که در آن ω_p فرکانس زاویه‌ای میدان کاوش‌گر می‌باشد. اکنون می‌توان پدیده کشش جانبی فوتونی را با استفاده از معادله زیر بررسی کرد:

$$\Delta x = L\frac{v}{c}\left(\frac{c}{v_{gr}} - \frac{v_{ph}}{c}\right) \qquad (۱۱)$$

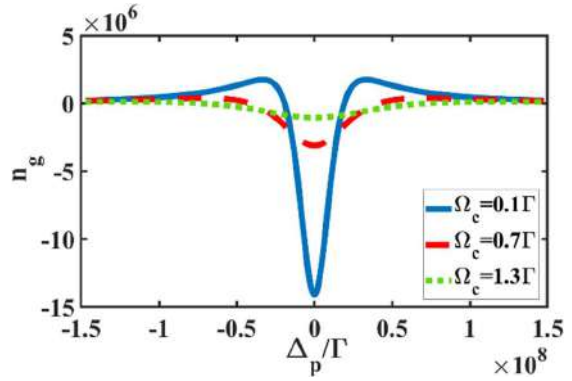
که v سرعت عرضی محیط، l طول محیط و c سرعت نور در خلا می‌باشد. معادله (۱۱) بیانگر این است که اثر کشش جانبی فوتونی وابسته به ضرایب شکست گروه و فاز می‌باشد. بنابراین فرکانس رابی میدان کنترلی به عنوان پارامتر کنترل کننده بر روی کشش فوتونی تاثیر گذاشته و امکان افزایش آن را فراهم می‌کند.

از آنجایی که پذیرفتاری الکتریکی نقش حیاتی در بررسی اثر کشش جانبی فوتونی ایفا می‌کند، بخش حقیقی (پاشندگی) و موهومی (جذب) آن برحسب نامیزانی میدان کاوش‌گر در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار منفی در نمودار جذب نشان دهنده وجود بهره و تقویت نور در سیستم به ازای فرکانس تشدید می‌باشد. کاهش قدرت میدان کنترلی به تدریج باعث ایجاد بهره شده و همزمان شیب منحنی پاشندگی افزایش می یابد. با توجه به شیب پاشندگی منفی و طبق رابطه (۹) ضریب شکست گروه امکان دارد کمتر از یک یا منفی باشد. درنتیجه سرعت گروه با ضریب شکست گروه رابطه معکوس دارد و ممکن است از سرعت نور در خلا بیشتر شده یا حتی متناسب با انتشار فراسرعت نور، منفی شود. نکته حائز اهمیت در ارتباط با پدیده کشش فوتونی، انتشار نور بدون اتلاف (جذب) یا همراه با بهره می‌باشد. بطور کلی از شکل ۲ استنباط می شود که به ازای شدت های کم میدان کنترلی ، پاشندگی نسبتا بزرگ با بهره بالا همراه است.



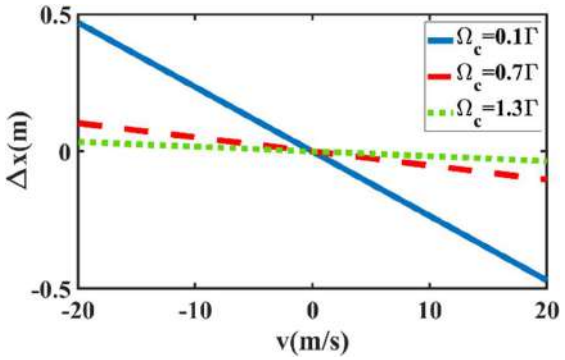
شکل ۲. طیف‌های (a) جذب و (b) پاشندگی برحسب نامیزانی کاوش‌گر

در شکل ۳ ضریب شکست گروه برحسب نامیزانی میدان کاوش‌گر رسم شده است. همان‌طور که از نتایج شکل ۲ و معادله (۹) قابل انتظار است، این شکل بیانگر ضریب شکست گروه منفی و کاهش قابل توجه مقدار آن با افزایش میدان کنترلی در فرکانس تشدید می‌باشد.



شکل ۳. ضریب شکست گروه بر حسب نامیزانی کاوش‌گر

همانطور که قبلا اشاره شد، کشش جانبی فوتونی طبق معادله (۱۱) به صورت مستقیم وابسته به ضریب شکست گروه می‌باشد. بنابراین کاهش قدرت میدان کنترلی منجر به افزایش قابل توجه کشش فوتونی می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است. هم‌چنین مطابق با شکل، حالت قطبش نور برخلاف جهت حرکت محیط می چرخد که منجر به جابجایی منفی به ازای سرعت مثبت می‌شود و بالعکس. این حالت تایید کننده انتشار فراسرعت نور است.



شکل ۴. کشش جانبی فوتونی بر حسب سرعت عرضی محیط

نتیجه‌گیری

در این مقاله محیط دی‌الکتریک متحرک، سیستم اتمی دوترازی دوگانه در نظر گرفته شد و با تاباندن باریکه‌های لیزر به آن، اثر کشش جانبی فوتونی در این سیستم بررسی شد. مطالعات ما نشان داد که افزایش Ω_c به طور قابل توجهی باعث کاهش مقدار ضریب شکست گروه منفی در فرکانس تشدید و در نتیجه کاهش قابل توجه کشش فوتونی می‌شود. هم‌چنین نور در خلاف جهت حرکت محیط کشیده می‌شود که تاییدی بر انتشار فراسرعت نور می‌باشد.

مرجع‌ها

[1] A.I. Bashir, A. Khan, B.A. Bacha, M.A. Ahmad, M.J. Amjad, A.U. Rahman, Conductivity-dependent absorption-free, gain-assisted superluminal propagation and rotary photon drag, Optical Materials, 115 (2021) 111047.

[2] A.I. Bashir, A. Zahir, N. Khan, S.S. Hayat, Controlling optical properties and drag of photon and surface plasmon polaritons in triple quantum dot molecules and dots-metal plasmonic interface via tunneling-assisted quantum coherence, Optics & Laser Technology, 149 (2022) 107915.

[3] E.S. Arroyo-Rivera, S. Vijayakumar, R.W. Boyd, Utilization of Galilean Invariance to Characterize Light-Drag in Hot Atomic Vapors, Frontiers in Optics, Optica Publishing Group, 2022, pp. JW5A. 18.

[4] A.H. Gharamaleki, A. Kevin, Lateral and rotary light-drag enhancement in a vee+ ladder configuration comprising a Rydberg state, Physica Scripta, 96 (2021) 125524.

بررسی اپتیکی خاموش‌کنندگی فلورسانس ویتامین ب۹ به وسیله داروهای شیمی‌درمانی بر پایه روش اشترن-ولمر بهبودیافته

مرضیه، پژوهنده دهبنه؛ فاطمه، احمدی نوری؛ پرویز، پروین*

دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

چکیده - سرطان یکی از بزرگترین چالش‌های بهداشت عمومی و عامل اصلی مرگ و میر در جهان است. تحویل داروی مؤثر برای حداکثر تاثیر درمان و کاهش اثرات جانبی بسیار مهم است. ویتامین ب۹ (فولات) نقش حیاتی در رشد و عملکرد سلول دارد و به عنوان حامل داروی مؤثر عمل می‌کند. همچنین داروهای شیمی‌درمانی فلورواوراسیل و اکسالی‌پلاتین نقش کلیدی در درمان سرطان دارند. این تحقیق با استفاده از روش طیف‌سنجی فلورسانس القایی لیزری (LIF) و روش اشترن- ولمر بهبودیافته تعاملات بین ویتامین ب۹ و این داروها را بررسی کرده و به بررسی رفتار اپتیکی خاموش‌کنندگی این داروها و پارامترهای مرتبط با آن می‌پردازد. بررسی بیشتر این پژوهش به توسعه روش‌های نوین درمان سرطان کمک می‌کند.

کلیدواژه- داروهای شیمی‌درمانی، ضریب فرونشانی اشترن-ولمر، طیف‌سنجی القایی لیزری، ویتامین ب۹.

Optical investigation of vitamin B9 fluorescence quenching using chemotherapeutic drugs based on modified Stern-Volmer method

Marzieh, Pajouhandeh Dehbaneh; Fatemeh, Ahmadinouri; Parviz, Parvin

Department of physics and Energy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

Abstract - Cancer is one of the greatest public health challenges and the leading cause of death worldwide. Effective drug delivery is crucial for maximizing treatment impact and minimizing side effects. Vitamin B9 (folate) plays a vital role in cell growth and function and acts as an effective drug carrier. Chemotherapeutic drugs fluorouracil and oxaliplatin play key roles in cancer treatment. This research investigates the interactions between vitamin B9 and the chemotherapeutic drugs oxaliplatin and fluorouracil by employing laser-induced fluorescence (LIF) spectroscopy and modified Stern-Volmer method. The study focuses on analyzing the optical quenching behavior of these drugs and their associated parameters. Further investigation of this research can contribute to the development of novel cancer treatment methods.

Keywords: chemodrugs, Stern-Volmer quenching coefficient, Laser intensity fluorescence spectroscopy, vitamin B9.

مقدمه

ویتامین ب۹ (فولات) به عنوان حامل دارو توانایی هدف‌گیری سلول‌های سرطانی را دارد، تضمین می‌کند که داروها به طور کارآمد به سلول‌های هدف برسند، توزیع و کارآیی داروهای شیمی‌درمانی را افزایش می‌دهد و همچنین می‌تواند اثرات جانبی را کاهش دهد [۱-۲] ویتامین ب۹ نقش حیاتی در حفظ رشد و عملکرد سلول ایفا می‌کند که برای بهبود کارآیی درمان انواع سرطان ضروری است[۳]. داروهای شیمی‌درمانی فلوروواوراسیل و اکسالی‌پلاتین از داروهای موثر در انواع رژیم‌های درمانی سرطان هستند [۴]. در این پژوهش با استفاده از روش طیف‌سنجی فلورسانس القایی لیزری، نحوه‌ی فرونشانی ویتامین ب۹ توسط داروهای شیمی‌درمانی فلوروواوراسیل و اکسالی‌پلاتین بررسی شده‌است. نتایج شامل روابط خطی و غیرخطی بودند که نشان‌دهنده‌ی پیچیدگی‌های این تعاملات است.

نظریه اشترن-ولمر

در طیف‌سنجی فلورسانس برای تحلیل چگونگی فرونشانی فلوروفور توسط خاموش‌کننده از رابطه‌ی کلی اشترن-ولمر (رابطه (۱)) استفاده می‌شود.

$$\frac{F_0}{F} - 1 \approx 1 - (1 - K_D[Q] + \frac{(K_D[Q])^2}{2!} - \cdots) \qquad (1)$$

که در این رابطه F_0 شدت فلورسانس بدون حضور خاموش‌کننده، F شدت فلورسانس در حضور خاموش‌کننده، K_Dضریب فرونشانی دینامیکی اشترن-ولمر که در حالت استاتیکی همان K_{sv} و [Q] غلظت خاموش‌کننده است [۵].

فرونشانی خطی

اگر نمودار فرونشانی یک خط مستقیم باشد، نشان دهنده‌ی فرونشانی دینامیکی یا استاتیکی است. یعنی تنها یک گونه از فلوروفور در داروهای شیمی‌درمانی وجود دارد که به طور مشابه با خاموش‌کننده تعامل می‌کند که برای محاسبه‌ی ضرایب اشترن-ولمر آن از رابطه‌ی (۲) استفاده می‌شود[۱].

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{SV}[Q] \qquad (2)$$

فرونشانی غیرخطی

اگر نمودار فرونشانی غیرخطی روبه پایین باشد، نشان دهنده‌ی وجود دو فلوروفور با دسترسی متفاوت به خاموش‌کننده است که برای به‌دست آوردن ضرایب از رابطه‌ی بهبودیافته‌ی اشترن-ولمر استفاده می‌شود[۲].

$$\frac{F_0}{F_0 - F} = \frac{1}{f_a K_S}\frac{1}{[Q]} + \frac{1}{f_a} \qquad (3)$$

که در رابطه‌ی بالا f_a، بخشی از فلورفورهای تحت تاثیر خاموش‌کننده‌ها هستند [۷-۸].

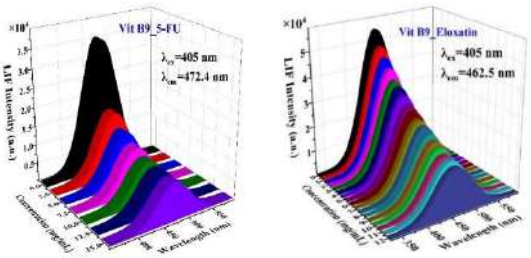
روش انجام آزمایش

در روش فلورسانس القایی لیزری (LIF)، لیزر ۴۰۵ نانومتر نمونه فلوروفور (محلول ویتامین ب۹) را تحریک کرده که نشر فلورسانس را در پی دارد. سپس با هر بار اضافه کردن غلظت مشخصی از داروی شیمی‌درمانی (اکسالی‌پلاتین یا فلوروواوراسیل به عنوان خاموش‌کننده) شدت فلورسانس فلوروفور کاهش می‌یابد که می‌توان ضرایب اشترن-ولمر ناشی از نمودار فرونشانی آن‌ها را محاسبه کرد.

نتایج و بحث

داروهای شیمی‌درمانی هر کدام به‌صورت جداگانه به عنوان خاموش‌کننده به ویتامین ب۹ (فلوروفور) با غلظت ۸ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر اضافه شدند. مطابق شکل ۱، طیف فلورسانس محلول ویتامین ب۹ با غلظت ۸ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر با اضافه کردن داروهای‌شیمی‌درمانی اکسالی‌پلاتین و فلوروواوراسیل، شدت فلورسانس فلوروفور به طور قابل توجه‌ای کاهش یافت.

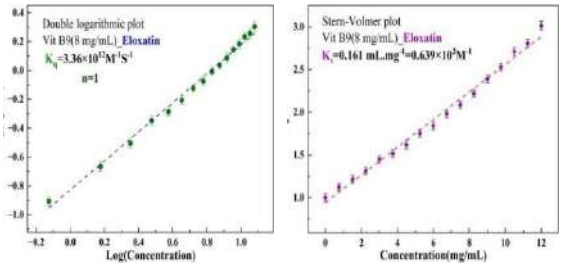
الف ب



شکل ۱: طیف فلورسانس ویتامین‌ب۹ در حضور الف) اکسالی‌پلاتین و ب) فلوروواوراسیل در غلظت‌های متفاوت.

در شکل ۲-الف، نسبت F_0/F به غلظت داروی‌شیمی‌درمانی اکسالی‌پلاتین با ویتامین ب۹ را نشان می‌دهد که به صورت خطی است و مقدار K_{sv} آن برابر با ۰/۱۶۱ میلی‌لیتر بر میلی‌گرم است. همچنین شکل ۲-ب، نمودار $Log(F_0-F/F)$ بر حسب لگاریتم غلظت رسم شد که مقدار پارامتر سرعت فرونشانی بیومولکولی (k_q) برای اکسالی‌پلاتین با ویتامین ب۹ برابر با $۳/۳۶ \times ۱۰^{۱۲}\ M^{-1}S^{-1}$ است[۳].

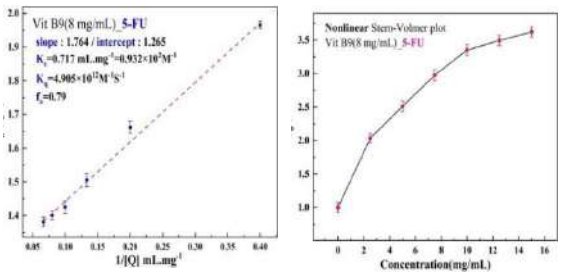
ب الف



شکل ۲: الف) نمودار فرونشانی نسبت F_0/F به غلظت ویتامین ب۹ با داروی شیمی درمانی اکسالی‌پلاتین؛ ب) نمودار نسبت $Log(F_0-F/F)$ برحسب لگاریتم غلظت ویتامین ب۹ با اکسالی‌پلاتین.

در شکل ۳-الف، نمودار فرونشانی غیرخطی (نسبت F_0/F به غلظت) داروی‌شیمی‌درمانی فلورواوراسیل با ویتامین ب۹ را نشان می‌دهد. مقدار K_{sv}، K_q و f_a محاسبه شده از رابطه‌ی بهبود یافته اشترن-ولمر به ترتیب برابر با ۰/۷۱۷ میلی‌لیتر بر میلی‌گرم، $۴/۹۰۵ \times ۱۰^{۱۲}\ M^{-1}S^{-1}$ و ۰/۷۹ است.

ب الف



شکل۳: نمودار فرونشانی غیرخطی (نسبت F_0/F به غلظت) داروی‌شیمی‌درمانی فلورواوراسیل با ویتامین ب۹.

بنابراین، با استفاده از رابطه اشترن-ولمر بهبود یافته و به وسیله پارامترهای اپتیکی تعریف شده نحوه تاثیر یک خاموش‌کننده دارویی بر فلورسانس ویتامین ب۹ را می‌توان مورد بررسی قرار داد و به مشخصه‌یابی اپتیکی آن مواد پرداخت.

نتیجه‌گیری

با توجه به رفتار خطی داروی شیمی درمانی اکسی‌پلاتین، ضریب فرونشانی بیومولکولی (k_q) به‌دست آمده برای این دارو بزرگتر از K_{diff} (یک معیاری برای کنش دینامیکی و استاتیکی است و برابر با $۱\times۱۰^{۱۰}\ M^{-1}S^{-1}$ می‌باشد) است. بنابراین فرونشانی آن از نوع استاتیکی است. به عبارت دیگر، غلظت بین ویتامین ب۹ و اکسالی‌پلاتین در هنگام کمپلکس‌سازی پایدار است که نشان دهنده‌ی یک مکانیزم فرونشانی منحصر به فرد است[۱] . از سویی دیگر، باتوجه به اینکه نمودار فرونشانی داروی فلورواوراسیل غیرخطی رو به پایین است، از معادله‌ی بهبودیافته‌ی اشترن-ولمر استفاده شد. مقدار f_a محاسبه شده برای فلوراسیل برابربا ۰/۷۹ است. در واقع ۰/۷۹ از مولکول‌های ویتامین‌ب۹ در معرض فلورواوراسیل هستند و می‌توانند توسط آن خاموش شوند [۴-۵]. انحراف منفی نمودار نشان‌دهنده‌ی وجود دو فلوروفور با دسترسی‌های متفاوت به داروی شیمی‌درمانی فلورواوراسیل است، به عبارت دیگر نشان‌دهنده‌ی وجود دو جمعیت از باقیمانده‌های ویتامین‌ب۹ است که یکی از آن‌ها به خاموش‌کننده دسترسی ندارد و باقیمانده‌های غیرقابل دسترس یا دفن‌شده، مسئول باقی‌مانده تابش فلورسانس هستند که مستقل از غلظت خاموش‌کننده است. بنابراین مکانیزم فرونشانی غالب در این ترکیب از نوع دینامیکی است [۶-۸].

مرجع‌ها

[1] J. R. Lakowicz, “Quenching of Fluorescence,” Princ. Fluoresc. Spectrosc., pp. 237–265, 1999.

[2] C. P. De Morais e Coura, A. H. Schneider, C. M. Cortez, and F. A. D. O. Cruz, “A mathematical model for nonlinear fluorescence quenching,” AIP Conf. Proc., vol. 1702, 2015.

[3] F. Ding, N. Li, B. Han, F. Liu, L. Zhang, and Y. Sun, “The binding of C.I. Acid Red 2 to human serum albumin: Determination of binding mechanism and binding site using fluorescence spectroscopy,” Dye. Pigment., vol. 83, no. 2, pp. 249–257, 2009.

[4] D. M. Jameson, “Quantum Yields and Quenching,” Introd. to Fluoresc., pp. 149–162, 2020..

[5] S. C. D. N. Lopes, C. M. Soares, A. M. Baptista, E. Goormaghtigh, B. J. C. Cabral, and M. A. R. B. Castanho, “Conformational and orientational guidance of the analgesic dipeptide kyotorphin induced by lipidic membranes: Putative correlation toward receptor

anthrylvinyl acetate by carbon tetrachloride," J. Photochem. Photobiol. A Chem., vol. 214, no. 2–3, pp. 145–151, 2010.

[8] V.T. MUTTANNAVAR, RAVEENDRA.MELAVANKI, KALPANA SHARMA, P. BHAVYA, RAVIRAJ. KUSANUR, and L. R. NAIK, "Effect of Hydrogen Bonding on Fluorescence Quenching of Quinolin-8-Ol - Analysis Using Negative Stern-Volmer Plots," Int. J. Life Sci. Pharma Res., vol. 8, no. 3, pp. 16–23, 2022.

docking," J. Phys. Chem. B, vol. 110, no. 7, pp. 3385–3394, 2006.

[6] H. S. Geethanjali, D. Nagaraja, R. M. Melavanki, and R. A. Kusanur, "Fluorescence quenching of boronic acid derivatives by aniline in alcohols - A Negative deviation from Stern-Volmer equation," J. Lumin., vol. 167, pp. 216–221, 2015.

[7] A. B. Naik, L. R. Naik, J. S. Kadadevarmath, H. Pal, and V. J. Rao, "Fluorescence quenching of

مدل سازی جریان نوری اپسین های بهینه رسانایی بالا برای افزایش اثر تحریک اپتوژنتیک کم تهاجمی در تحریک عصبی

شبنم عندلیبی میاندوآب[۲،۱*]، نازلار قاسم زاده [۳*]

[۱] گروه مهندسی برق ، واحد تبریز ، دانشگاه آزاد اسلامی ، تبریز ، ایران

[۲] مرکز تحقیقات بیوفتونیک ، واحد تبریز ، دانشگاه آزاد اسلامی ، تبریز ، ایران

[۳] گروه مهندسی پزشکی ، واحد تبریز ، دانشگاه آزاد اسلامی ، تبریز ، ایران

چکیده- اپتوژنتیک با بکارگیری اپسین ها روشی موثر برای کنترل بیماری های نورولوژیکی است. در این مقاله ما اپسین های ChR2، ChETA ، ChRwt ، ChETA/TC و NpHR را به مدل S-BG-Th برای کنترل بیماری پارکینسون اعمال کرده و جریان های نوری ، پاسخ نرونی و فیدیلیتی اسپایکی را برای انتخاب موثرترین اپسین مورد بررسی قرار داده ایم. ChRwt جریان پیک بیشتر داشته در شدت و پالس نوری کم از قدرت جریان نوری و حساسیت نوری بالا برخوردار است و دارای اثر کم تهاجمی می باشد. نسبت به دیگر اپسین های انتخابی دینامیک سریع تر و پاسخ پایدارتری دارد و فیدیلیتی آن برای نرون های GPe و GPi به ترتیب ۷۵٪ و ۱۰۰٪ می باشد.

کلیدواژه- اپتوژنتیک، جریان نوری اپسین ،کم تهاجمی ، مدل استرایتوم عقده های قاعده ای تالاموس(S-BG-Th)

Modelling the photocurrent of high conductance optimal opsins for enhance the effect of minimally invasive optogenetic stimulation in neurostimulation

Shabnam Andalibi Miandoab[1,2*], Nazlar Ghasemzadeh[3*]

[1] Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad university, Tabriz, Iran

[2]Biophotonic Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

[3] Department of Biomedical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad university, Tabriz, Iran

sh.andalibi@iaut.ac.ir , n.ghassemzadeh@iaut.ac.ir

Abstract- Optogenetic by using opsins is an effective method to control neurological diseases. In this paper, we have applied ChR2, ChETA, ChRwt, ChETA/TC and NpHR opsins to the S-BG-Th model to control Parkinson's disease (PD) and have examined photocurrents, neuronal response and spike fidelity to select the most effective opsin. ChRwt has high peak current and in low light intensity and low light pulse, it has high photocurrent strength and high light sensitivity and has a low invasive effect. Compared to other selective opsins, it has a faster dynamic and a more stable response, and its fidelity for GPe and GPi neurons is 75% and 100%, respectively.

Keywords: Optogenetic, Opsin photocurrent, Minimal invasive, Model of Striatum Basal Ganglia Thalamus (S-BG-Th).

1. Introduction

Optogenetic is a new technique based on genetics and photostimulation of nerve cells, and has swept neuroscience by using microbial rhodopsins to control the electrical activity of target neurons by light .Furthermore, it can enable us to investigate how different types of neurons have specific roles in behaviours and pathologies and how they can serve as new therapeutic targets. This technique is used to discover the complex circuits of the brain and neurological and mental diseases such as epilepsy and Parkinson's disease (PD) [1,2]. In optogenetics, light-sensitive ion channels (opsins) are widely used as a tool in neuroscience research to excite or suppress neural activity

with high temporal and spatial resolution [3,4]. Channelrhodopsin-2 (ChR2) is the most common opsin, which is an essential tool in neuroscience, which is activated by blue light and leads to the depolarization of neurons, which the ChETA, ChRwt, and ChETA/TC are the kinds of it. Halordopsin (NpHR) is also the first photogenetic tool that is activated by yellow light and effectively inhibits neural activity. Since the response of neurons to various opsins in different stimulation conditions including frequency (f), light pulse (t_{on}), number of stimulation pulses (ns) and light stimulation intensity (A_{light}) can be different, so in this paper ,we have applied excitatory opsins of ChR2, ChETA, ChETA/TC, and ChRwt and inhibitory opsin of NpHR in three and four states to the striatum-basal ganglia-thalamus (S-BG-Th) network model to control the Parkinson's disease with different stimulation conditions ,short and long pulses, and we have examined photocurrents, neural responses ,and the spike fidelity of the neurons.

2. Methods

2.1. The model of the Striatum-Basal Ganglia-Thalamus (S-BG-Th)

We have considered a complete computational model based on the computational network model of Terman et al, [5] under the title of S-BG-Th network model, which includes all the sub-sections affected by Parkinson's disease including striatum, basal ganglia and, the thalamus and has been shown in Fig.1a. This model includes Th, GPi, GPe, and STN neurons, and have been applied constant current of I_{app} from the striatum (caudate/putamen), three and four-state optogenetic stimulation with different opsins to BG neurons and SMC input to the Th cells. Sparse connections between TH, GPi, GPe, and STN neurons in the S-BG-Th network model have been represented in Fig.1b. Membrane potential for S-BG-Th network model neurons based on Hodgkin-Huxley model has been modelled as conductance-based differential equations based on equation (1).

$$C_m \frac{dv}{dt} = -I_L - I_{Na} - I_K - I_T - I_{Ca} - I_{ahp} - I_{syn} + I_{app} + I_{opsin} \quad (1)$$

2.2. Model of three-state optogenetic

The three-state model for opsin includes open (O), closed (C) and dark transition (D) stages, which has been shown in Fig.1a, and has been defined by equations (2) and (3). Where O + D + C = 1, P is the light -dependent excitation rate for the C state to the O transition state, and G_d (G_r) is the rate constant for the transition from the O state to the D state (from the D state to the C state). The photocurrent of opsin entering the neuron membrane is calculated by equation (4). where V is the membrane potential of the neuron expressing opsin and g_{opsin} is the maximum conductance of opsin. The values of the parameters are applied from references [5-7].

$$\dot{O} = P(1 - O - D) - G_d O \quad (2)$$
$$\dot{D} = G_d O - G_r D \quad (3)$$
$$I_{opsin} = g_{opsin} V O \quad (4)$$

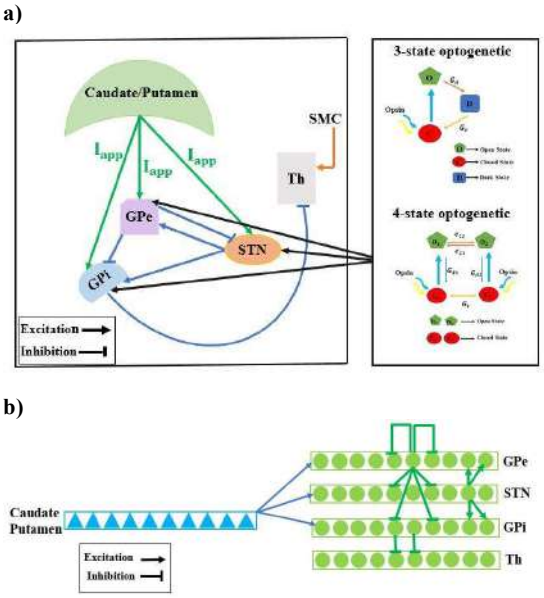


Fig.1: (a) S-BG-Th network model, (b) Sparse connections between neurons

2.3. Model of four -state optogenetic

In this case, a four-state transition is considered for opsin to follow the movement of light stimulation according to Fig.1a. There are Two open stages include O_1 and O_2 and two closed stages include C_1 and C_2. It should be noted that Open and Closed are internal transition stages. The dynamics of transitions between stages are in the form of equations (5), (6), (7), and (8):

$$\dot{O}_1 = P_1(1 - C_2 - O_1 - O_2) - (G_{d1} + e_{12})O_1 + e_{21}O_2 \quad (5)$$
$$\dot{O}_2 = P_2 S C_2 + e_{12}O_1 - (G_{d2} + e_{21})O_2 \quad (6)$$
$$\dot{C}_2 = G_{d2}O_2 - (P_2 S + G_r)C_2 \quad (7)$$
$$\dot{S} = (S_0(\theta) - S)/\tau_{opsin} \quad (8)$$

The parameters P_1 and P_2 are the maximum excitation rate of C_1, C_2 and G_{d1}, G_{d2}, are the constant transition rate for the first open state O_1 to the first closed state C_1 and from state O_2 to state C_2 respectively. While G_r is the recovery rate of the C_1 state after the light pulse is turned off. e_{21} and e_{12} are the constant rates for the transition from state O_1 to O_2 and from O_2 to O_1, respectively. Photocurrent is also calculated by equation (9), where g_{opsin} is the maximum conductance of opsin at the O_1 stage and γ is the conduction rate at the O_2 and O_1 stages [5-8].

$$I_{opsin} = g_{opsin} V(O_1 + \gamma O_2) \quad (9)$$

2.4. Characteristic of the photocurrent of the opsins

The photocurrent characteristics of opsins with specific wavelengths in response to short and long light pulses are: peak current (I_p),activation time constant(τ_{on}), and inactivation time constant(τ_{off}) which specifies fast off-kinetics (fast closing of the channel) and slow off-kinetic (slow closing of the channel). Which show the effective features of opsins, including the photocurrent strength of

opsins, light sensitivity and the effect of opsins being less invasive. In the opsins photocurrent, with the increase of I_p and low τ_{off}, the channel closes faster, the strength of photocurrent and light sensitivity, and as a result, the less invasive effect of opsins, are greater.

3. Results

3.1. Results of the opsin's photocurrents

Since the photocurrent characteristics of opsins play an important role in choosing a suitable and effective opsin, and by considering the effective characteristics of opsins, the photocurrent strength of opsins, light sensitivity, and the effect minimally invasive of opsins can be checked so, we have examined the photocurrents of the three-state model for NpHR, ChR2, ChRwt, ChETA and ChETA/TC opsins with conductivity values (g) equal to 2.4002, 0.8755, 3.687, 0.03314 and 1.899 nS/μm^{2}respectively, with short and long pulses of t_{on}=2,100ms at different light intensities of $A_{light} = 0.08 - 10\ mw/mm^2$, with a wavelength of 480 nm .We have shown an example of photocurrents for opsin ChRwt (with the highest conductivity) and ChETA (with the lowest conductivity) in Fig. 2a, b. Based on the results, with the start of radiation for both light pulses of 2 and 100ms for both opsins, the current has reached the maximum value at time of τ_{on}, then has became zero at time τ_{off} when the light has turned off.

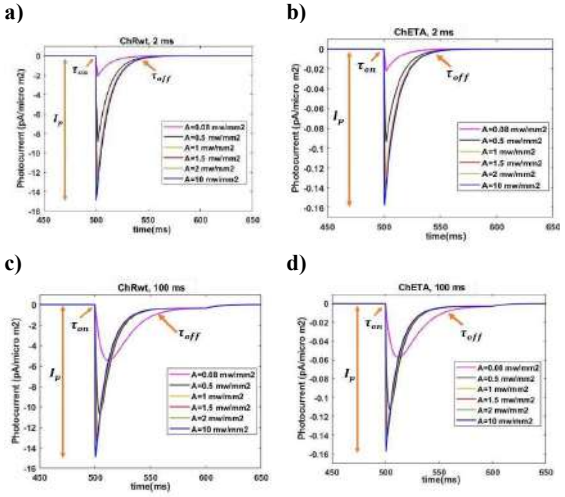


Fig.2: Photocurrents of opsins in t_{on}= 2,100 ms. a) ChRwt, b) ChETA.

In light pulse of 2ms for both ChRwt and ChETA opsins, the photocurrent has reached the maximum faster, it means that τ_{off} is lower and the channel closes faster. Due to the low τ_{off} for ChRwt compared to ChETA opsin so, in this light pulse, ChRwt has faster dynamics. In 100ms for both opsins, τ_{off} has increased and they close more slowly, in this case, ChETA is slower. On the other hand, with increasing intensity, for 2,10 mW/mm^2, the Ip for ChRwt, which has high conductivity, is higher than ChETA. Therefore, the strength of the photocurrent, the light sensitivity, and the minimally invasive effect of ChRwt are more.

3.2. Responses of the neurons of the S-BG-Th network model

Since ChRwt opsin has a higher I_p followed by high photocurrent strength and light sensitivity and has a minimal invasive effect, therefore, we have investigated the responses of the neurons of the S-BG-Th network model for the excitatory opsin of ChRwt in three -state with short light pulse of 2ms at light stimulation intensities of $A_{light} = 0.08 - 10\ mW/mm^2$. We have shown an example of the responses of the neurons to ChRwt opsin in the range of beta band for the frequency of 30 Hz, pulse number of 30 and light intensity of 10 mW/mm^2 in Fig.3. Based on the results, the response of the STN neurons to excitatory ChRwt opsin is suppressive and inhibitory, for GPe and GPi neurons is in the form of additional spikes, and these additional spikes are more for GPi than GPe, for Th neurons there is one response for each stimulation.

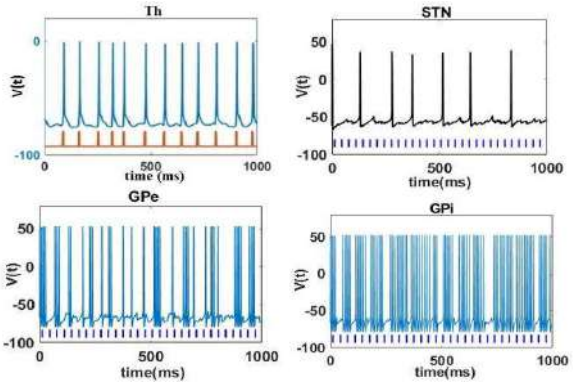


Fig.3: Responses of the STN, GPe, and GPi for f=30Hz, ns=30, A_{light}=10 mW/mm^2 , and t_{on}=2 ms.

3.3. The results of the fidelity of the neurons of the S-BG-Th model

The pathological activities of PD lead to the destruction and reduction of spike fidelity of the brain neurons. For this purpose, we have investigated the spike fidelity of the S-BG-Th network model neurons by applying excitatory opsins of ChRwt, ChETA, ChETA/TC, ChR2 and inhibitory NpHR in the beta band frequency range of 30 Hz, pulse number of 30 and light pulse of 2 ms for light intensities of A_{light}=0.08-10 mW/mm^2. Based on the results have been shown in Fig. 4a,b,and c, it can be seen that, for all three STN, GPe and GPi neurons, the curve corresponding to ChRwt opsin, which has the highest conductivity, is at the top of the graph and the curve of the ChETA opsin, with the lowest conductivity, is at the bottom of the graph.

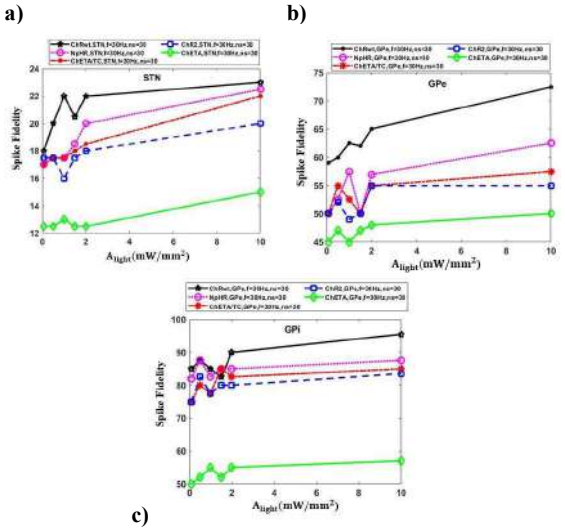


Fig.4: The fidelity of the neurons of the S-BG-Th model by applying the excitatory opsins of the ChRwt, ChR2, ChETA, ChETA/TC, and inhibitory opsins of the NpHR for the f=30Hz, ns=30, t_{on}=2ms, and A_{light}=0.08-10 Mw/mm²: a) STN, b) GPe, c) GPi.

In addition, the fidelity behaviour for all opsins is oscillatory up to an intensity of 2mW/mm^2 and then has increased steadily, so the neurons at low intensity have been able to reach the highest fidelity value. The fidelity range for STN neurons is lower (up to 24%) and for GPe it has increased up to 75% and for GPi it is more than other neurons and has reached until 100%.

4. Conclusion

By considering the effective features of opsins, it is possible to examine the strength of opsins' photocurrent, light sensitivity, and the effect of opsins' minimal invasive, and select the most effective opsin to apply to specific neurons. The pathological activities caused by neurological diseases such as PD lead to the destruction and reduction of spike fidelity of brain neurons. In addition, the response of the neurons to different opsins can be various in different stimulation conditions with different parameters. Therefore, in this paper, we have applied the excitatory opsins of ChR2, ChETA, ChRwt, ChETA/TC, and the inhibitory opsin of NpHR to the S-BG-Th network model for PD with different stimulation conditions, short and long pulses, and we have investigated the photocurrents, neuronal responses and the fidelity of neurons. Based on the results, for ChRwt opsin, which has more conductivity than other opsins, the peak current is higher and at low light intensity and light pulse, it has high photocurrent strength and light sensitivity, and so, has a low invasive effect. It can be said that, compared to other selective opsins, this opsin has faster dynamics and a more stable response, as well as higher and better spike fidelity specially for the neurons of GPe and GPi.

References

[1] Grossman N, Nikolic K, Toumazou C, Degenaar P. Modeling study of the light stimulation of a neuron cell with channelrhodopsin-2 mutants. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2011 Feb 14;58(6):1742-51.

[2] Piatkevich KD, Boyden ES. Optogenetic control of neural activity: The biophysics of microbial rhodopsins in neuroscience. Quarterly Reviews of Biophysics. 2024 Jan;57:e1.

[3] Stefanescu RA, Shivakeshavan RG, Khargonekar PP, Talathi SS. Computational modeling of channelrhodopsin-2 photocurrent characteristics in relation to neural signaling. Bulletin of mathematical biology. 2013 Nov;75:2208-40.

[4] Bedbrook CN, Yang KK, Robinson JE, Mackey ED, Gradinaru V, Arnold FH. Machine learning-guided channelrhodopsin engineering enables minimally invasive optogenetics. Nature methods. 2019 Nov;16(11):1176-84.

[5] R.W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," Bell Syst. Tech. J. Vol. 44, pp. 547–588, 1965.

[6] Ghasemzadeh N, Rahatabad FN, Haghipour S, Miandoab SA, Maghooli K. Controlling pathological activity of Parkinson basal ganglia based on excitation and inhibition optogenetic models and monophasic and biphasic electrical stimulations. J Biosci. 2023; 48:40. PMID: 37846022.

[7] Ghasemzadeh N, Rahatabad FN, Haghipour S, Miandoab SA, Maghooli K. Controlling the pathological activity of parkinsonian basal nuclei with the basal ganglia network model under light stimulation in the three-state, four-state channelrhodopsin, and three-state halorhodopsin optogenetic models. Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences. 2024 Jul 20;46(3):275-93.

[8] Ghasemzadeh N, Rahatabad FN, Haghipour S, Miandoab SA, Maghooli K. Effect of Optogenetic Stimulation Parameters on Firing Rate of Basal Ganglia Neurons in Parkinsonian State BG and RT Networks. Frontiers in Biomedical Technologies. 2024 Mar 6.

[9] Zhang H, Yu Y, Deng Z, Wang Q. Activity pattern analysis of the subthalamopallidal network under ChannelRhodopsin-2 and Halorhodopsin photocurrent control. Chaos, Solitons & Fractals. 2020 Sep 1;138:109963.

طراحی و تحلیل کوپلر شبکه‌ای موجبر سیلیکون نیترید با بهره‌وری بالا

سید سبحان حسینی حاجی‌بکنده[۱]، لیلا حاج شاه ولدی[۱]، و غلام محمد پارسانسب[۱*]

[۱]آزمایشگاه مدرات مجتمع نوری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده: در این مقاله، یک طراحی بهینه برای کوپلرهای شبکه‌ای بر پایه سیلیکون نیترید ارائه شده است که نقش اساسی در مدارهای فوتونیک برای انتقال توان کارآمد بین فیبرهای نوری و موجبرها دارند. دستیابی به بازده بالا در کوپلینگ، برای دستگاه‌های مجتمع فوتونیک که کاهش تلفات در آنها اهمیت بالایی دارد، ضروری است. طراحی ما با تنظیم دقیق دوره شبکه، ضریب شکست و زاویه برخورد، بر اساس شرط براگ، بهینه‌سازی شده تا در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به حداکثر بازده دست یابد. ساختار نهایی در زاویه برخورد ۸ درجه، بازده کوپلینگ ۴۸ درصد را محقق می‌کند. همچنین، یک ناحیه انتقال توان طراحی‌شده با بازده تقریباً ۹۷ درصد، انتقال نرم و با حداقل تلفات و پراکندگی را تضمین می‌کند و عملکرد کلی را بهبود می‌بخشد. این تحقیق بر اهمیت کنترل دقیق پارامترها در ارتقای بازده کوپلرهای شبکه‌ای و پیشبرد توسعه مدارهای مجتمع فوتونیک و با کارایی بالا تاکید دارد.

کلیدواژه: بازده کوپلینگ، سیلیکون نیترید، کوپلر شبکه‌ای، مدارهای فوتونیکی

Design and Analysis of High-Efficiency Silicon Nitride Waveguide Grating Coupler

Seyed Sobhan Hosseini Hajibekandeh[1], Leila Hajshahvaladi[1], and Gholam-Mohammad Parsanasab[1*]

[1]Integrated Photonics Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

SobhanHosseinih@gmail.com, l_hajshahvaladi@aut.ac.ir, gm_parsanasab@sbu.ac.ir

Abstract: This paper presents an optimized design for grating couplers (GCs), which are essential in photonic circuits for efficient light coupling between optical fibers and waveguides. Achieving high coupling efficiency is crucial for compact photonic devices, where minimizing losses is paramount. We proposed a Si_3N_4-based grating coupler design that employs precise tuning of the grating period, refractive index, and incident angle, guided by the Bragg condition, to maximize efficiency at a target wavelength of 1550 nm. The resulting structure achieves a high coupling efficiency of 48% at an 8-degree incident angle. A proposed designed transition taper with an efficiency of approximately 97% facilitates smooth mode transition with minimal scattering and power loss, further enhancing overall performance. This work highlights the importance of meticulous parameter control in advancing GC efficiency and supporting the development of high-performance, compact photonic circuits.

Keywords: Grating coupler, Photonic circuits, Silicon nitride, Waveguide taper

1. Introduction

Grating couplers (GCs) play a pivotal role in photonic circuits by facilitating efficient light coupling between optical fibers and waveguides. As photonic devices continue to shrink, the demand for high-performance GCs intensifies, with a strong emphasis on maximizing coupling efficiency and minimizing optical losses. High-efficiency GCs are crucial for integrated photonic systems where light transfer must be both precise and effective, enabling applications across telecommunications, data transfer, and sensing technologies. Recent advancements in GC design highlight the importance of structural and material optimizations to enhance efficiency, wavelength selectivity, and angular sensitivity. Parameters such as grating period, refractive index contrast, and coupling angle are instrumental for optimal light transfer [1-2]. By applying principles of diffraction and interference, especially through the Bragg condition (also called phase matching condition), modern GCs achieve superior performance in compact formats [3-4].

This paper presents an optimized GC design targeting a 1550 nm wavelength. Our approach involves precise control of the grating period, fill factor, refractive index, and incident angle to achieve high coupling efficiency. This work demonstrates the potential of tailored design in advancing compact, high-performance photonic devices.

2. Model and Theory

The schematic side view of a silicon nitride (Si_3N_4) waveguide grating coupler is illustrated in Figure 1.

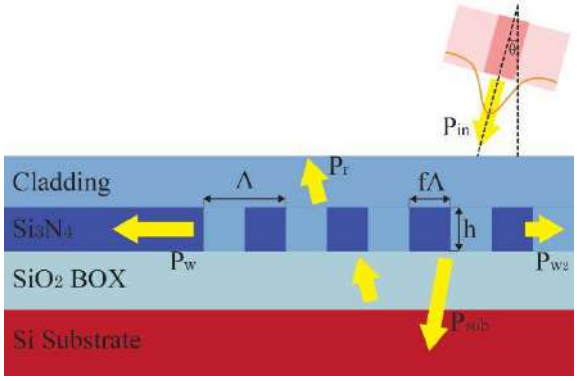


Fig. 1: Schematic diagram and loss channels in input coupling of the Si_3N_4 grating coupler.

In the grating coupler structure, precision tailoring of the grating's period, depth, and refractive index contrast enables optimal light coupling. These engineered parameters govern the wavelength selectivity, coupling efficiency, and angular sensitivity, enhancing the transition between fiber and waveguide modes. The Bragg condition defines the wavelength (λ) where diffraction is maximized. When the grating period (Λ) matches the Bragg wavelength, constructive interference occurs, boosting coupling efficiency and optimizing light transfer into the waveguide [5-6]. The Bragg condition for the guided transverse electric (TE) mode is satisfied by fulfilling the phase matching condition, given by [7-8]:

$$m\lambda = \Lambda(n_{eff} - n_c \sin\theta) \quad (1)$$

where m, n_{eff}, n_c and θ state the diffraction order (equal to 1 for most grating couplers), the effective index, the cladding index, and the incident angle, respectively. The principles outlined in the Bragg equation are visually represented in Figure 2.

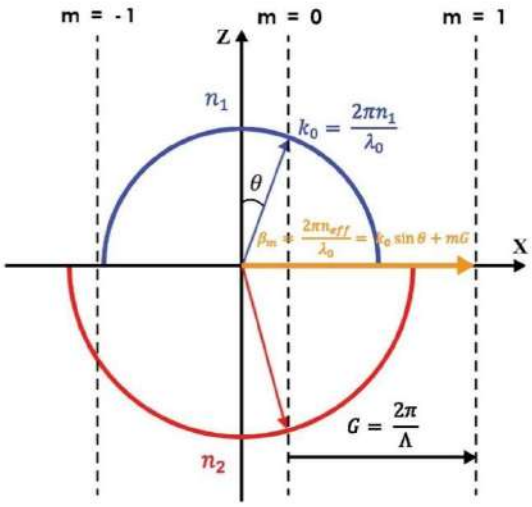


Fig. 2: Wave-vector diagram for fiber-to-chip coupling

Subwavelength gratings, with periods smaller than the wavelength, prevent standard diffraction and enable uniform light guidance. This is achieved by a thickness that blocks evanescent modes and a small period ($\Lambda \ll \lambda$) to suppress diffraction [9-10].

The effective index provides a simplified representation of complex grating structures as a singular refractive index value. This parameter, determined by the grating's material composition and geometric configuration, governs the propagation of light and plays a pivotal role in determining coupling efficiency. The approximate refractive index of this equivalent medium can be described using the first-order Rytov formula [11]:

$$n_{eff} = fn_1 + (1 - f)n_2 \quad (2)$$

where n_1, n_2 and f represent the grating material index, the gap material index, and the fill factor, respectively.

Power losses in grating couplers arise primarily from scattering, absorption, and radiation effects, as illustrated in Figure 1. Scattering is driven by surface roughness, while absorption is determined by the material's intrinsic properties.

The performance of a generic grating coupler (GC) depends on three key parameters: directionality, reflectivity, and overall coupling efficiency. Directionality measures the ratio of optical power directed upward to the fiber relative to the waveguide power (P_w). Reflectivity indicates the power reflected by the GC (P_r), which should be minimized to reduce parasitic effects, such as Fabry–Perot oscillations. Coupling efficiency is the ratio of power coupled to the fiber's fundamental mode to the waveguide power [11]. The final coupled power into the waveguide is given as [9]:

$$P_w = \eta_{CE} P_{in} = P_{in} - P_{sub} - P_r - P_{w2} \qquad (3)$$

where η_{CE} is the coupling efficiency or expressed as coupling loss in decibels (dB). Effective minimization of these loss channels is essential for maximizing coupling efficiency [12].

3. Simulation Results and Discussion

The proposed grating coupler structure is simulated using the two-dimensional finite-difference time-domain (2D FDTD) method, focusing on maximizing coupling efficiency at the operating wavelength of 1550 nm. As depicted in Figure 1, the structure consists of a silicon substrate with a refractive index of 3.48 and a buried oxide (BOX) bottom cladding layer with an index of 1.44. A Si_3N_4 waveguide is embedded within this structure, while a silicon oxide layer serves as the cladding material above the entire configuration. The refractive index of silicon nitride is set to 1.98 at the wavelength of 1550 nm. The proposed grating design includes a 2.6 µm BOX thickness, a 2.1 µm silicon oxide cladding thickness, and a grating depth of 0.55 µm, with a period of 1030 nm and a fill factor of 0.5. These parameters were iteratively tuned to align with the Bragg condition, enhancing diffraction efficiency and optimizing light coupling into the waveguide.

A transition taper was implemented to efficiently couple light from the grating structure into a 1 µm wide waveguide. The taper width, which corresponds to the input beam diameter, starts at 10.4 µm for the grating lines and extends over a length of 100 µm, as illustrated in Figure 3. Although a longer taper could have been used, efficiency gains plateaued, and a compact 100 µm taper was chosen to minimize the device footprint. This transition taper design achieved a 97.12% coupling efficiency, contributing significantly to the overall performance.

Figure 4 shows that the proposed grating configuration achieved a coupling efficiency of 48% with an incident angle of 8 degrees at the wavelength of 1550 nm. Additionally, the selected period of 1030 nm and fill factor of 0.5 demonstrated superior efficiency, minimizing losses and yielding high coupling performance. The results emphasize the impact of structural parameters tuning on the grating coupler efficiency.

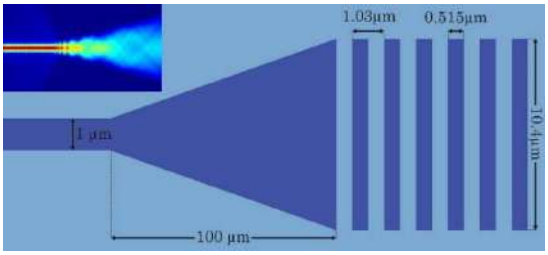


Fig. 3: Top view of the structure of the designed linear waveguide transition taper.

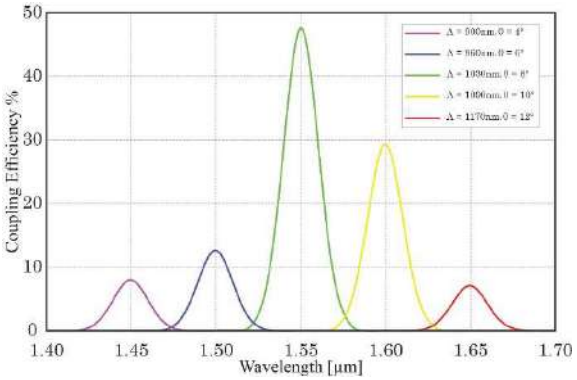


Fig. 4: Coupling efficiency of the designed grating coupler at optimal incident angle and grating period across different wavelengths.

By considering the period to 1.03 µm and the fill factor to 0.5, the design minimized scattering losses and maximized coupling at the desired angle and wavelength. The optimally designed taper, with a 10.4 µm initial width tapering over 100 µm, effectively channeled light into the 1 µm waveguide, achieving a 48% coupling efficiency from the grating structure. This taper design was critical in limiting area usage while maintaining high efficiency.

Material choices, including the silicon substrate and silicon oxide cladding, were crucial for achieving high coupling efficiency, with the refractive index contrast carefully matched to optimize light guidance within the waveguide. The 8-degree incident angle aligns well with theoretical predictions, showing that small angular

adjustments can enhance coupling in etched gratings. While the achieved 48% coupling efficiency is significant, further improvement is possible. These results affirm that precise control of grating parameters, materials, and simulation conditions can significantly enhance the grating coupler performance, supporting compact photonic circuits with high efficiency and minimal footprint.

4. Conclusion

The presented design achieved notable improvements in Si_3N_4 grating coupler efficiency by addressing key aspects of light transfer and minimizing power losses. Through a systematic approach to tuning structural parameters, we realized a GC configuration optimized for a 1550 nm wavelength, resulting in 48% coupling efficiency at an 8-degree angle. The integration of a transition taper, with a smooth transition and minimal scattering that prevents further loss through its 97.12% efficiency, provided valuable insights into the development of high-performance, compact photonic circuits.

References

[1] Nambiar, S., Sethi, P., and Selvaraja, S. K., "Grating-Assisted Fiber to Chip Coupling for SOI Photonic Circuits," Applied Sciences, vol. 8, no. 7, pp. 1142, July 2018.

[2] Nambiar, S., Muthuganesan, H., Sharma, T., and Selvaraja, S. K., "On-chip unidirectional dual-band fiber-chip grating coupler in silicon nitride," OSA Continuum, vol. 1, no. 3, pp. 864-871, Nov. 2018.

[3] Kohli, M., Chelladurai, D., Vukovic, B., Moor, D., Bisang, D., Keller, K., Messner, A., Buriakova, T., Zervas, M., Fedoryshyn, Y., Koch, U., & Leuthold, J., "C- and O-Band Dual-Polarization Fiber-to-Chip Grating Couplers for Silicon Nitride Photonics," ACS Photonics, vol. 10, no. 9, pp. 3366–3373, Aug. 2023.

[4] Zaoui, W. S., Kunze, A., Vogel, W., Berroth, M., Butschke, J., Letzkus, F., and Burghartz, J., "Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits," Optics Express, vol. 22, no. 2, pp. 1277-1286, Jan. 2014.

[5] Halir, R., Bock, P. J., Cheben, P., Ortega-Moñux, A., Alonso-Ramos, C., Schmid, J. H., Lapointe, J., Xu, D. X., Wangüemert-Pérez, J. G., Molina-Fernández, I., and Janz, S., "Waveguide sub-wavelength structures: a review of principles and applications," Laser & Photonics Reviews, vol. 9, no. 1, pp. 25-49, Jan. 2015.

[6] Mafakheri, A., Parsanasab, G.-M., Sorayaie, P., Mostajeran, S., Akbari, L., and Kolahdouz, M., "Highly Efficient DFB Laser-Assisted Grating As2S3 Chalcogenide for Integrated Photonics," Journal of Lightwave Technology, vol. 42, no. 14, pp. 4918-4923, Jul. 2024.

[7] Zhang, H., Li, C., Tu, X., Song, J., Zhou, H., Luo, X., Huang, Y., Yu, M., and Lo, G. Q., "Efficient Silicon Nitride Grating Coupler with Distributed Bragg Reflectors," Optics Express, vol. 22, no. 18, pp. 21800–21805, Sep. 2014.

[8] Li, C., Zhang, H., Yu, M., and Lo, G. Q., "CMOS-Compatible High Efficiency Double-Etched Apodized Waveguide Grating Coupler," Optics Express, vol. 21, no. 7, pp. 7868–7874, Apr. 2013.

[9] Cheng, L., Mao, S., Li, Z., Han, Y., and Fu, H. Y., "Grating Couplers on Silicon Photonics: Design Principles, Emerging Trends and Practical Issues," Micromachines, vol. 11, no. 7, pp. 666, Jul. 2020.

[10] Halir, R., Ortega-Moñux, A., Benedikovic, D., Mashanovich, G. Z., Wangüemert-Pérez, J. G., Schmid, J. H., Molina-Fernández, I., and Cheben, P., "Subwavelength-Grating Metamaterial Structures for Silicon Photonic Devices," Proceedings of the IEEE.

[11] Marchetti, R., Lacava, C., Carroll, L., Gradkowski, K., and Minzioni, P., "Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [Invited]," Photonics Research, vol. 7, no. 2, pp. 201-239, Feb. 2019.

[12] Nambiar, S., Chatterjee, A., and Selvaraja, S. K., "Comprehensive grating enabled silicon nitride fiber-chip couplers in the SNIR wavelength band," Optics Express, vol. 30, no. 3, pp. 4327-4341, Jan. 2022.

ساختار پلاسمونیکی فلز عایق فلز مبتنی بر کاواک هشت ضلعی منتظم برای سنجش باکتری و ضریب شکست

کامیار رزقی ایلخچی[۱]، محمد قنواتی[۲]، و محمد عظیم کرمی[۳]

۱و۲و۳- دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده- در این مقاله یک ساختار فلز - عایق - فلز جفت شده با تشدیدگر به شکل هشت‌ضلعی منتظم که درون آن یک جزیره هشت‌ضلعی منتظم کوچک‌تر از جنس نقره قرار دارد، به عنوان حسگر ضریب شکست پلاسمونیکی معرفی و با روش المان محدود شبیه‌سازی شده است. طیف انتقال حسگر برای متغیرهای ساختاری مختلف بررسی و با معیار حساسیت، بهینه‌ترین ساختار انتخاب شده است. حساسیت بیشینه ۴۲۵۷ nm/RIU و عدد شایستگی RIU^{-1} ۱۴/۶۲ برای ساختار بهینه‌شده به دست آمده است. حسگر پیشنهادی می‌تواند برای تشخیص باکتری بیماری‌زای موجود در آب و غذا برای کاربرد در صنایع غذایی و پزشکی استفاده شود.

کلیدواژه- سنسور پلاسمونیک، موجبر فلز - عایق - فلز، تشدید پلاسمون سطحی، تشدیدگر، زیست‌حسگر

Metal-Insulator-Metal Plasmonic Structure based on Regular Octagonal Cavity for Bacteria and Refractive Index Sensing

Kamiyar Rezghy Ilkhchy[1], Mohammad Ghanavati[2], and Mohammad Azim Karami[3]

[1,2,3]School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

[1]Kamiyar_rezghy@elec.iust.ac.ir, [2]Ghanavati_m@elec.iust.ac.ir, [3]Karami@iust.ac.ir

Abstract- This paper introduces a metal-insulator-metal (MIM) waveguide with a resonator, featuring a regular octagon geometry and an internal silver octagon island, as a refractive index (RI) sensor. The design was simulated using the Finite Element Method. Various structural parameters of the sensor's transmission spectrum were analyzed, and the optimal structure was chosen based on sensitivity. The optimized structure achieved a maximum sensitivity of 4257 nm/RIU and a figure of merit (FoM) of 14.62 per RIU. The sensor is suitable for detecting pathogenic bacteria in water and food, as well as bacterial cell organelles in the food and medical industries, within the wavelength range of 650 to 4000 nm.

Keywords: Plasmonic sensor ,Metal -Insulator-Metal Waveguide, Surface Plasmon Resonance, Pathogenic, Bacteria

1. Introduction

In MIM waveguide structures with a cavity, SPP behavior dramatically changes with alterations in geometry and materials, affecting device response [1]. Changes in the refractive index (RI) of cavity dielectric materials cause significant resonance wavelength shifts, which are crucial for RI sensors [2]. MIM waveguides, valued for their real-time detection with high sensitivity and resolution, compactness, and low cost, are ideal for medical diagnostics due to their ability to integrate with microfluids and perform label-free detection [3]. Recent studies have explored biosensing applications in MIM waveguides with various geometries, focusing on detecting infected blood plasma [4], biological analytes [5], cancer cells, malaria, blood concentration [1], and determining blood hemoglobin levels and glucose concentration [6].

This paper introduces an octagonal ring-like structure with two regular inner and outer octagons as the MIM waveguide cavity for biosensing applications. The simulations were performed using COMSOL Multiphysics version 6.2. Triangular meshing was employed, and Perfect Electric Conductor (PEC) boundary conditions were applied to the model. The structural parameters were optimized for maximum sensitivity using a parametric sweep approach to identify the values that yield maximum sensitivity. Finally, the optimized device for detecting bacteria within a specific RI range is evaluated.

2. Theory

The three-dimensional (3D) sensor design, shown in Fig.1, features an MIM waveguide with (w) a 50 nm width filled with air and a cavity filled with a dielectric (n_d = 1.36). This octagonal cavity structure includes a silver inner octagon, occupying 0.7 (k = 0.7) of the larger cavity, and is rotated by an angle φ relative to the waveguide. Fig.1 shows that silver (Ag) was selected as the plasmonic material due to its narrow FWHM, high signal-to-noise ratio, and enhanced sensitivity, making it an ideal choice [7, 8]. The relative permittivity for silver, modeled with the Drude-Lorentz approach, is discussed in our latest research [1]. The resonance wavelength (R_w) is determined using standing wave resonance theory, expressed as $N.R_w = L_{eff}.\mathscr{R}(n_{eff})$. Here, $\mathscr{R}(n_{eff})$ is the real part of effective RI, L_{eff} is the resonator's effective length, and N is the resonance order.

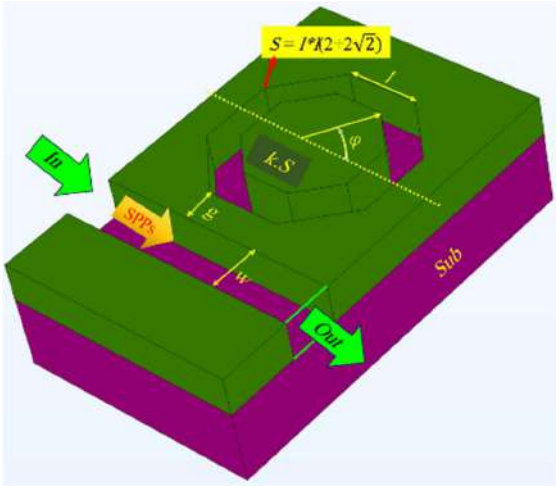


Fig.1: 3D schematic of the MIM waveguide with regular octagon cavities.

If the input light power is S1 and the output light power is S2, the transmission characteristic T=S2/S1 and extinction ratio (ER) is defined by logarithm of T. RI sensitivity (S) is computed as the ratio of altrations in R_w to changes in n_d ($S = \Delta R_w / \Delta n_d$). Using the quality factor (QF = R_w /FWHM) and the figure of merit (FoM = S/FWHM), the sensor's performance is evaluated and compared, where FWHM denotes the full width at half maximum of the resonance peak [6].

3. Simulation results and application

3.1. Simulation results and discussion

In Fig.2-a, to achieve the optimal structural parameters of the sensor, the transmission spectrum was plotted by varying the internal regular octagon scale factor (k) from 0.1 to 0.9 in 0.2 increments, with n_d = 1.36 and 1.37, and φ from 0° to 45° in 9-degree steps. As k increases, the resonance peaks red-shift due to changes in the internal octagon area and L_{eff}[1]. For k = 0.1 to 0.7 , the transmission characteristics remain constant for each φ, but at k = 0.9 , distinct transmission characteristics appear. At k = 0.9 , resonance peaks red-shift from 0° to 18° and blue-shift from 27° to 45°. Additionally, with k = 0.9 , the transmission spectra for φ values symmetric around 22.5° are identical. For example, the spectra at 0° and 45° match each other. Fig.2-b shows that S is highest at the first peak for all variations and increases with k. At k = 0.9 , S increases with φ from 0° to 18° and decreases from 27° to 45°, with a maximum sensitivity of 3900 nm/RIU at φ = 18° and 27.

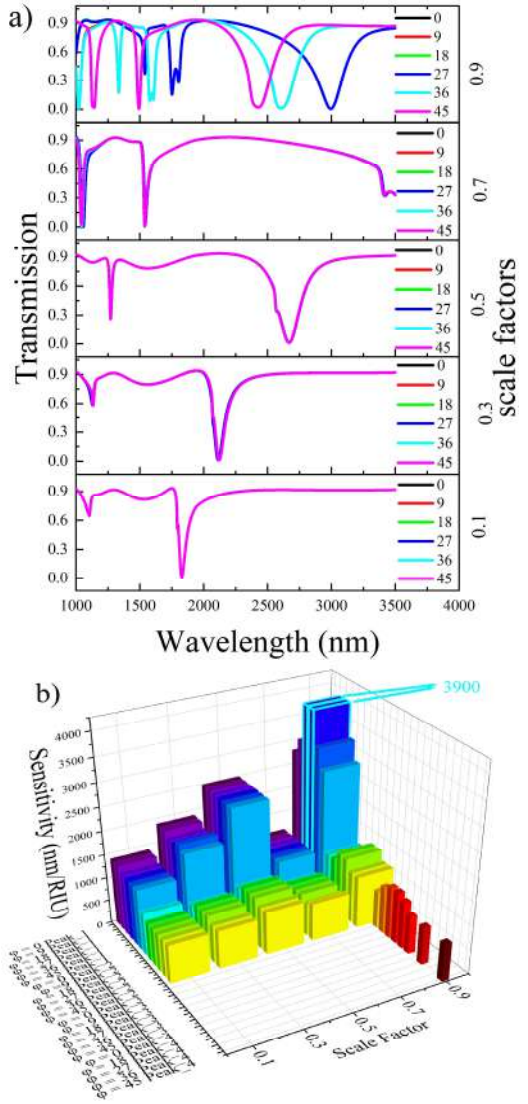


Fig.2: (a) Transmission for all sweeps (b) comparative sensitivity for all sweeps and every peaks .

Based on the observed symmetry in T and S for φ values symmetric around 22.5°, it is predicted that the structural parameter of the distance between the inner and outer octagons plays a role in the sensor's S. As this distance decreases, the S increases. Therefore, the S is calculated at the smallest distance between the two octagons, which occurs at k = 0.9 and φ = 22.5°. Fig.3-a illustrates the relationship between R_W and n_d changes across the first to seventh peaks. It reveals that this relationship is linear, with each line's slope representing the peak's S. Fig.3-b shows the calculated performance parameters such as FWHM, FoM and QF for each peak, alongside R_W, for the optimized structure. The highest S obtained was 4257 nm/RIU for the first peak, with a FoM of 14.62 1/RIU and a QF of 10.54. The highest QF and FoM were achieved for the third peak, with a S of 1158 nm/RIU, a FoM of 44.53 1/RIU and a QF of 60.11.

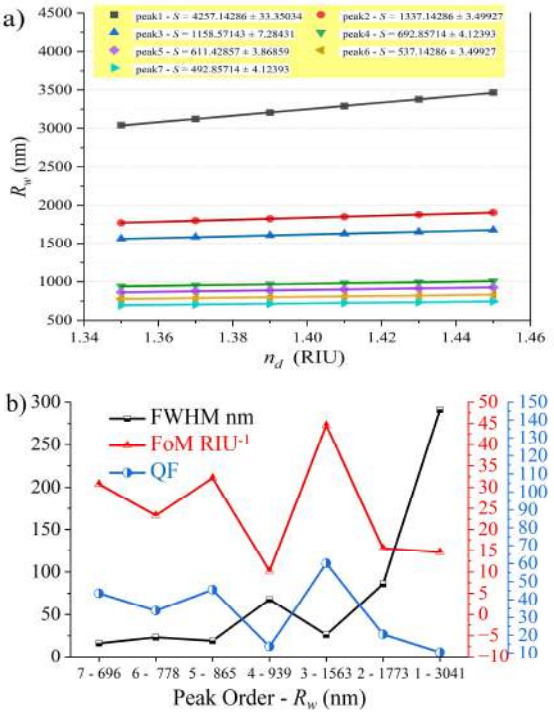


Fig. 3: (a) The fitting line of Rw as a function of the RI for the optimized structure at k = 0.9 and φ = 22.5° . (b) FWHM, FoM, and QF for all resonance peaks, including their peak order and Rw, for the optimized structure.

3.2. Application

Methods for measuring the RI of bacteria and their cellular components are detailed in [9].

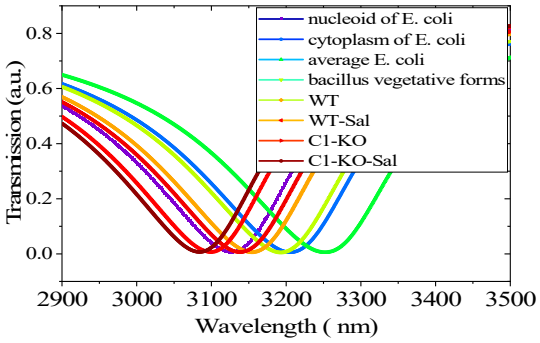


Fig.4: Transmission for different bacteria.

RI of E. coli bacteria is 1.401 for the average, 1.371 for the nucleoid, and 1.390 for the cytoplasm, whereas for the Bacillus family, it ranges from 1.400 to 1.387. Certain bacterial infections alter the RI of body tissues, providing a basis for diagnosis. For instance, healthy WT and C1-KO cells, which are macrophages derived from bone marrow, initially have refractive indices of 1.3777 and 1.3740.Upon 15 minutes of exposure to Salmonella enterica serovar Typhimurium, their average refractive

indices decrease to 1.3641 and 1.3606, respectively [10]. Fig.4 illustrates the R_W variations of the first peak in the proposed structure for Bacillus and E. coli bacterial cells, the nucleoid and cytoplasm of E. coli cells, as well as healthy and Salmonella-infected WT and C1-KO cells. The proposed sensor's S to changes in the refractive index allow for the potential differentiation of various bacterial species based on their unique optical signatures.

4. Conclusion

A regular octagonal ring-shaped cavity MIM waveguide was optimized to achieve maximum S. Observations showed that the primary influencing factor was the distance between the inner and outer octagons, and the optimal angle created the smallest distance. The final structure achieved a sensitivity of 4257 nm/RIU and a FoM of 14.62 1/RIU. Table I provides a comparison of this sensor's sensitivity with that of recently developed simulated sensors. As shown, the sensitivity of our work surpasses that of all referenced sensors in Table I. The RI range for bacterial detection was discussed, presenting the proposed sensor as a relatively high-sensitivity option for detecting bacteria.

Table I. Comparison of S between this work and previous similar works.

Ref.	basic structure	Maximum S (nm/RIU)
[5]	square	700
[4]	rectangular	900
[11]	disk	1242.86
[1]	hexagonal	1147.22
[12]	H-shaped	1960
This work	octagonal	4257

References

[1] M. Ghanavati, F. Emami, and M. A. Karami, "Metal-insulator-metal plasmonic sensor utilizing grating-defect waveguide and cavities for temperature sensing and biological applications," Physica Scripta, vol. 99, no. 10, p. 105523, 2024.

[2] R. Rahad, A. Rakib, M. A. Haque, S. S. Sharar, and R. H. Sagor, "Plasmonic refractive index sensing in the early diagnosis of diabetes, anemia, and cancer: an exploration of biological biomarkers," Results in Physics, vol. 49, p. 106478, 2023.

[3] M. A. Butt, "Review of Innovative Cavity Designs in Metal–Insulator-Metal Waveguide-Based Plasmonic Sensors," Plasmonics, pp. 1-20, 2024.

[4] M. A. Butt, "Numerical assessment of a metal-insulator-metal waveguide-based plasmonic sensor system for the recognition of tuberculosis in blood plasma," Micromachines, vol. 14, no. 4, p. 729, 2023.

[5] N. L. Kazanskiy, S. N. Khonina, M. A. Butt, A. Kaźmierczak, and R. Piramidowicz, "A numerical investigation of a plasmonic sensor based on a metal-insulator-metal waveguide for simultaneous detection of biological analytes and ambient temperature," Nanomaterials, vol. 11, no. 10, p. 2551, 2021.

[6] Z. Majidi, M. Ghanavati, and M. A. Karami, "Multi-resonance plasmonic refractive index sensor based on maze-shaped resonators for biological applications," Journal of Optics, vol. 26, no. 9, p. 095002, 2024.

[7] M. Butt, S. Khonina, and N. Kazanskiy, "Plasmonics: A necessity in the field of sensing-a review," Fiber and Integrated Optics, vol. 40, no. 1, pp. 14-47, 2021.

[8] N. Kazanskiy, S. Khonina, and M. A. Butt, "Plasmonic sensors based on Metal-insulator-metal waveguides for refractive index sensing applications: A brief review," Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures, vol. 117, p. 113798, 2020.

[9] Y. P. Liu, "Refractive Index Distribution of Single Cell and Bacterium Usingan Optical Diffraction Tomography System," Université Paris-Est, 2016.

[10] A. E. Ekpenyong, S. M. Man, S. Achouri, C. E. Bryant, J. Guck, and K. J. Chalut, "Bacterial infection of macrophages induces decrease in refractive index," Journal of biophotonics, vol. 6, no. 5, pp. 393-397, 2013.

[11] M. Ghanavati and M.-A. Karami, "Plasmonic Refractive Index Sensor Using a Metal-Insulator-Metal Waveguide with a Disk-Shaped Cavity and Silver Nanorod Defects," in 2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2024: IEEE, pp. 1-5.

[12] R. Rahad, A. Ali, M. K. H. Pias, M. Farabi, M. A. Islam, and A. A. Fahim, "Plasmonic Metal-Insulator-Metal (MIM) Refractive Index Sensor for Glucose Level Monitoring," Plasmonics, pp. 1-10, 2024.

ساخت و بررسی پایداری نوری-مکانیکی سلول خورشیدی منعطف بر پایه پروسکایت دوکاتیونه و سه هالیدی

طاهره اشجاری[۱]، مریم عالی دائی[۱]، وحید احمدی[۱*]، و فرزانه عربپور[۱و۲]

۱ دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده - در حال حاضر با توجه به علاقه روز افزون به افزاره‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر پوشیدنی، تقاضا برای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر در حال گسترش است. زیرا لایه پروسکایت به دلیل قابلیت ساخت در دمای پایین و انعطاف‌پذیری ذاتی می‌تواند در ساخت افزاره‌های انعطاف‌پذیر بکار رود. در این مقاله، سلول خورشیدی پروسکایتی منعطف بر پایه لایه جاذب پروسکایت دو کاتیونه و سه هالیدی، با ساختار n-i-p ساخته می‌شود. این سلول خورشیدی، بازده تبدیل انرژی ۱۵/۵۲٪ را نشان می‌دهد. بررسی پایداری نوری این افزاره، با قرارگیری افزاره‌ی کپسوله نشده در معرض تابش مستقیم نور شبیه‌سازی شده خورشیدی AM 1.5 انجام می‌شود. این سلول، بعد از گذشت ۶۰ دقیقه، ۳۴٪ از بازدهی اولیه خود را حفظ می‌کند. همچنین بررسی پایداری مکانیکی این افزاره نشان می‌دهد، تحت چندین بار خمش افزاره با شعاع خمش ۱۰ میلی‌متر بازده تبدیل انرژی افزاره بدون تغییر باقی می‌ماند.

کلیدواژه- سلول خورشیدی پروسکایتی منعطف ، پایداری مکانیکی، پایداری نوری، بازده تبدیل انرژی، لایه‌نشانی چرخشی.

Fabrication and Characterization of Optical- Mechanical Stability of Flexible Solar Cells Based on Two-Cation and Three-Halide Perovskite Absorber Layer

Tahere Ashjari[1], Maryam Alidaei[1], Vahid Ahmadi[1*], Farzaneh Arabpour Roghabadi[1,2]

1 Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2 Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

t.ashjari72@gmail.com, m.alidaee@gmail.com , v_ahmadi@modares.ac.ir *, arabpour@modares.ac.ir

Abstract- Due to the increasing interest in flexible wearable electronic devices, the demand for perovskite solar cells is expanding. Because it can be used to fabricate flexible devices, in this article, a flexible perovskite solar cell (F-PSC) is fabricated based on two-cation and three-halide perovskite absorber layers with an n-i-p structure. This solar cell showed a power conversion efficiency (PCE) of 15.52%. The optical stability of F-PSC is investigated by exposing the unencapsulated device under simulated 1sun illumination. This cell maintains 34% of its initial PCE after 60 minutes. Also, the investigation of the mechanical stability of this device shows that under several bending times with a bending radius of 10 mm, the PCE of the fabricated F-PSC remains unchanged.

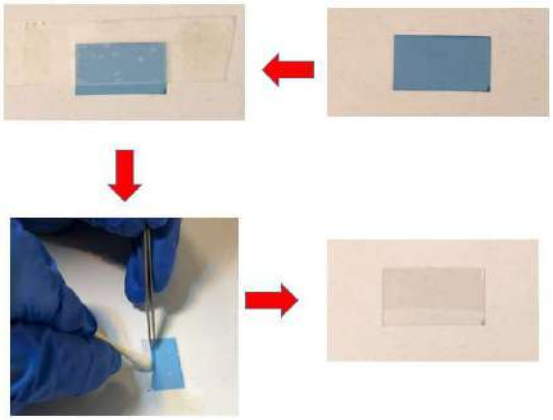
Keywords: Flexible perovskite solar cell, mechanical stability, light stability, power conversion efficiency, spin-coating

مقدمه

پروسکایت‌های هیبریدی آلی-معدنی، به دلیل ترکیب منحصر به فرد، خواص نوری و الکترونیکی و همچنین فرایند ساخت نسبتاً ساده، در انواع مختلف ادوات اپتوالکترونیکی به کار می‌روند [1]. امروزه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی منعطف (F-PSCs) به دلیل قابلیت کاربرد در مصارف مختلف در الکترونیک انعطاف‌پذیر و فتوولتائیک پوشیدنی، کاربرد در سقف و پنجره‌های ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [2]. در سال ۲۰۱۳، کومار و همکاران، سلول‌های خورشیدی منعطف دارای لایه جاذب پروسکایتی $CH_3NH_3PbI_3$ با روش محلول در دمای پایین ساختند که به راندمان تبدیل توان (PCE) ٪۲/۶۲ دست یافت [3]. استراتژی‌های مختلفی برای افزایش PCE و پایداری مکانیکی فوتوولتائیک‌های انعطاف‌پذیر از جمله اصلاح یا جایگزینی لایه‌های کاربردی (مانند بسترها، الکترودها، لایه‌های انتقال و لایه‌های پروسکایت) [5]، و بهینه‌سازی فصل مشترک و معماری کلی افزاره به کار گرفته شده‌اند [4]. در این مقاله، سلول خورشیدی پروسکایتی منعطف، ساخته و مشخصه‌یابی شده است. لایه جاذب پروسکایت دوکاتیونه و سه‌هالیدی MAFAPbIBrCl لایه‌نشانی شده به روش تک‌مرحله‌ای موجب پایداری افزاره می‌شود. همچنین پایداری مکانیکی افزاره منعطف تحت خمش با شعاع‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی

ابتدا زیرلایه‌های PET/ITO با مقاومت سطحی ۶۰/sq Ω خریداری شده از شرکت سیگما با ابعاد ۲۵×۱۴ mm^2 برش داده می‌شوند. سپس به منظور اتصال‌گیری از الکترود طلا و جلوگیری از اتصال کوتاه شدن افزاره، بخشی از ITO از روی PET برداشته می‌شود. شکل ۱ مراحل زدایش ITO از بستر لایه‌های PET/ITO را نشان می‌دهد. به این منظور، به جز یک ناحیه به طول ۲۵ mm و عرض حدوداً ۳ mm، بقیه نواحی زیرلایه با چسب کالک پوشانده می‌شود. سپس با گوش پاک‌کن حاوی اتانول، ITO از روی زیرلایه PET برداشته می‌شود. پس از طی فرآیند شستشوی زیرلایه‌ها و خشک سازی با گان نیتروژن، زیرلایه‌ها به محفظه‌ی دستگاه DRIE منتقل شده و به مدت ۵ دقیقه در معرض پلاسمای اکسیژن با توان ۱۰۰W قرار می‌گیرند.



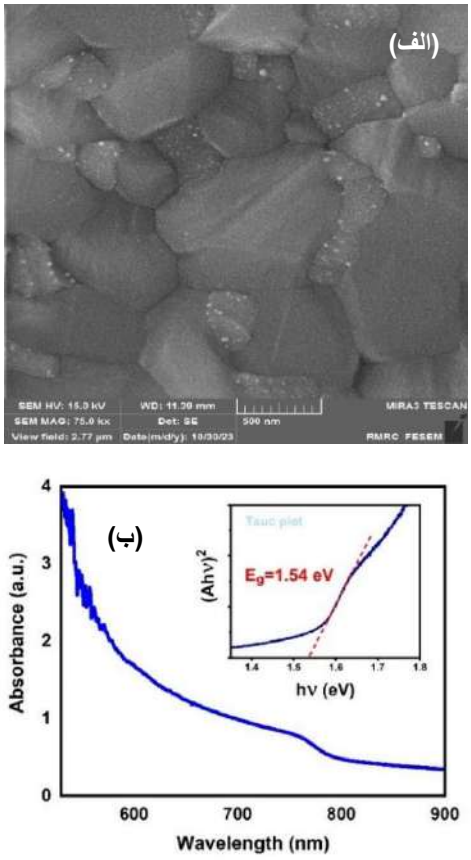
شکل ۱: مراحل زدایش ITO از بستر PET/ITO

دستگاه DRIE منتقل شده و به مدت ۵ دقیقه در معرض پلاسمای اکسیژن با توان ۱۰۰W قرار می‌گیرند. سپس SnO_2 سنتز شده به روش هیدروترمال با غلظت ۲۰mg/ml به روش چرخشی، با سرعت ۴۰۰۰ rpm به مدت ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی شده و بسترها به مدت ۳۰ دقیقه با دمای ۱۵۰°C حرارت داده می‌شوند. به منظور افزایش آبدوستی سطح لایه SnO_2، لایه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در معرض UV اوزن قرار می‌گیرند. برای لایه‌نشانی پروسکایت دوکاتیونه و سه‌هالیدی MAFAPbIBrCl، محلول پروسکایت از PbI_2 (۱/۵۳ M)، (۰/۰۱۲۲ M) $MAPbBr_3$، FAI (۱/۴ M) و MACl (۰/۵ M) آماده می‌شود. سپس این محلول بر روی زیرلایه ریخته شده و با سرعت۱۰۰۰ rpm به مدت ۱۰ ثانیه و بلافاصله با سرعت ۵۰۰۰ rpm به مدت ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی می‌شود. لازم به ذکر است که در ۱۰ ثانیه پایانی چرخش ۶۰۰ µl کلروبنزن بر روی زیرلایه ریخته می‌شود. پس از پاکسازی ناحیه روبروی اچ با اتانول خشک، لایه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۰۰°C حرارت داده می‌شوند. پس از لایه‌نشانی پروسکایت، یک لایه P3HT با غلظت ۱۵ میلی‌گرم برمیلی‌لیتر با سرعت ۵۰۰۰rpm به مدت ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی می‌شود. ناحیه روبروی ناحیه اچ شده، با استونیتریل پاک شده و یک لایه طلا به ضخامت ۷۰nm به روش بخار فیزیکی PVD لایه‌نشانی می‌شود.

مشخصه‌یابی لایه پروسکایت دوکاتیونه و سه‌هالیدی

در شکل ۲ تصاویر FESEM، طیف جذب و نمودار تائوک لایه پروسکایت دو کاتیونه و سه هالیدی و نشان داده شده است. همانطور که در تصویر FESEM مشاهده می‌شود لایه

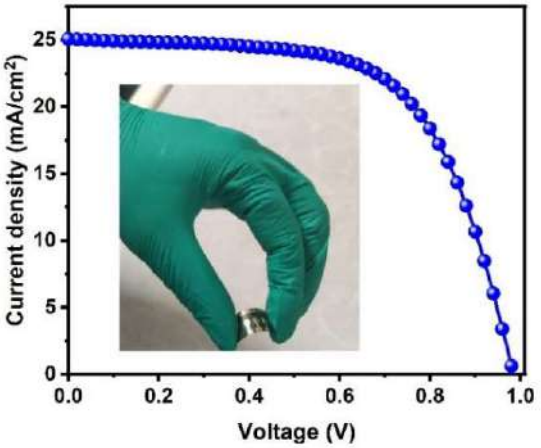
پروسکایت لایه نشانی شده به روش تک‌مرحله‌ای و بهینه شده با ضدحلال کلروبنزن، دارای سطح یکنواخت بوده و فاقد حفرات سوزنی است. همچنین دارای دانه‌های پروسکایت با اندازه بین ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ nm است. متوسط اندازه دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌مایزر ۶۰۰ nm بدست آمد. اندازه دانه بزرگ، منجر به کاهش مرزدانه‌های پروسکایت و بهبود کارآیی لایه پروسکایتی بـه عنـوان لایـه جـاذب سلول خورشـیدی می‌شود.



شکل ۲: الف) تصاویر FESEM، ب) منحنی جذب و نمودار تائوک پروسکایت‌های MAFAPbBrCl لایه‌نشانی شده به روش تک‌مرحله‌ای

مشخصه‌یابی افزاره F-PSC

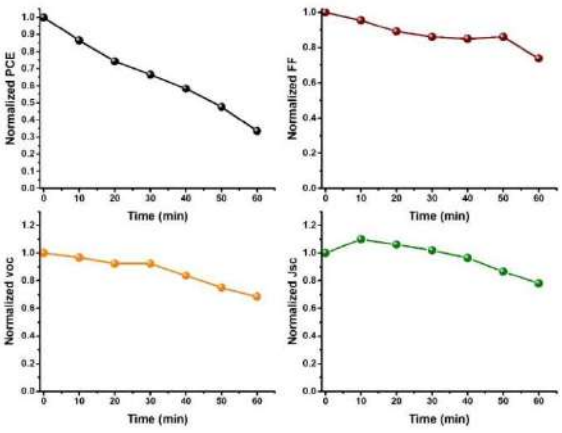
منحنی J-V سلول خورشیدی منعطف در شکل ۳ نشان داده شده است. این سلول، مشخصه‌های فتوولتائیک PCE، فاکتور پرشدگی FF، ولتاژ مدار باز V_{oc} و جریان اتصال کوتاه J_{sc} به ترتیب ۱۵/۵۲٪، ۰/۶۳، ۰/۹۹ V و ۲۵/۰۶ mA/cm² را نشان داد.



شکل ۳: منحنی J-V سلول خورشیدی پروسکایتی منعطف با ساختار PET/ITO/SnO₂/MAFAPbIBrCl/P3HT/Au

بررسی پایداری نوری افزاره F-PSC

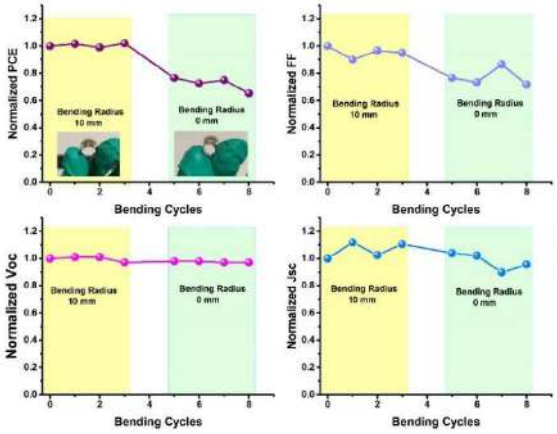
به منظور بررسی پایداری نوری، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف منعطف ساخته شده بدون کپسوله در معرض تابش مستقیم نور شبیه‌سازی شده خورشیدی AM 1.5 قرار گرفتند. سپس نمودار I-V این افزاره‌ها تا ۶۰ دقیقه، در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای ثبت شد. شکل ۴ نمودارهای افت PCE، FF، V_{oc} و J_{sc} این سلول خورشیدی را در مدت زمان ۶۰ دقیقه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد این سلول، بعد از گذشت ۶۰ دقیقه، ۳۴٪ از بازدهی اولیه خود را حفظ کرده است.



شکل ۴: نمودارهای افت PCE، FF، V_{oc} و J_{sc} سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف منعطف، در برابر تابش پیوسته نور شبیه‌سازی شده خورشید AM 1.5

بررسی پایداری مکانیکی افزاره F-PSC

یکی از ویژگی‌های مهم سلول‌های خورشیدی پروسکایتی منعطف، قابلیت خم شدن آن‌ها است. اما هنگامیکه افزاره خورشیدی تحت خمش قرار می‌گیرد، تنش اعمال شده به لایه پروسکایت و سایر لایه‌های سلول خورشیدی، منجر به افت عملکرد آن می‌شود. لذا پایداری سلول خورشیدی منعطف تحت خمش از اهمیت بالایی برخوردار است. در این‌کار برای بررسی پایداری سلول خورشیدی، در ابتدا افزاره، تحت خمش با شعاع ۱۰ mm قرار داده شده و نمودار I-V آن ثبت شد (شکل ۵).



شکل ۵: نمودارهای افت PCE، FF، V_{oc} و J_{sc} سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف منعطف، در برابر خمش با شعاع‌های ۱۰ و تحت خمش کامل (۰mm)

نتایج نشان داد با چندین بار خمش با شعاع ۱۰ mm، PCE سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف منعطف تغییر نمی‌کند. اما هنگامیکه افزاره، تحت خمش کامل قرار گرفت (یعنی تا حدی خم شد که دو لبه ی افزاره به هم رسید)، با چندین بار خمش، بازده افزاره به ۳۵٪ مقدار اولیه رسید (شکل ۵).

نتیجه‌گیری

تصاویر FESEM لایه پروسکایت MAFAPbIBrCl تهیه شده به روش تک‌مرحله‌ای، بهبودیافته با ضدحلال کلروبنزن نشان داد این لایه بدون حفرات سوزنی بوده و پوشیده از دانه‌های بزرگ پروسکایت با متوسط ابعاد ۶۰۰ nm است. طیف جذب لایه پروسکایت، نشان دهنده تشکیل لایه پروسکایت با جذب بالا و گاف انرژی ۱/۵۴ eV است. سلول خورشیدی n-i-p ساخته شده با این لایه جاذب باکیفیت، بازده ۱۵/۵۲٪ نشان داد. همچنین بررسی پایداری نوری و مکانیکی این افزاره نشان داد، پس از گذشت ۶۰ دقیقه از قرارگیری افزاره F-PSC تحت تابش پیوسته نور شبیه‌سازی شده خورشید AM 1.5، ۳۴٪ بازده اولیه حفظ شده است. همچنین افزاره با خم شدن تحت شعاع خمش ۱۰mm و تحت خمش کامل به ترتیب ۱۰۰٪ و ۳۵٪ از بازده اولیه خود را حفظ کرد.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۰۱۳۵۵ انجام شده است.

مرجع‌ها

[1] K. S. Srivishnu, P. R. Markapudi, S. Sundaram, and L. Giribabu, “Semitransparent Perovskite Solar Cells for Building Integrated Photovoltaics: Recent Advances,” Energies, vol. 16, no. 2, 2023.

[2] R. Tian, S. Zhou, Y. Meng, C. Liu, and Z. Ge, “Material and Device Design of Flexible Perovskite Solar Cells for Next-Generation Power Supplies,” Adv. Mater., vol. 2311473, 2024.

[3] M. H. Kumar, N. Yantara, S. Dharani, M. Graetzel, P. P. Boix, and N. Mathews, “Flexible, low-temperature, solution processed ZnO-based perovskite solid state solar cells,” Chem. Commun., vol. 49, no. 94, pp. 11089–11091, 2013.

[4] D. Yang, R. Yang, S. Priya, and S. (Frank) Liu, “Recent Advances in Flexible Perovskite Solar Cells: Fabrication and Applications,” Angew. Chemie - Int. Ed., vol. 58, no. 14, pp. 4466–4483, 2019.

[5] Z. Dai et al., “Dual-Interface-Reinforced Flexible Perovskite Solar Cells for Enhanced Performance and echanical Reliability,” Adv. Mater., vol. 34, no. 47, 2022.

اصلاح سطح سولفید روی توسط پلاسمای غیرحرارتی برای افزایش کارایی الکترود ذخیره انرژی

مهدیه محمدی[1و*]، علی لطیفی[1]، ساعدجعفری[1]

[1] گروه فیزیک ، دانشکده علوم ، دانشگاه گیلان ، رشت

چکیده - امروزه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، به صورت خاص ابرخازن‌ها، نقش مهمی در توسعه فناوری‌های نوین ایفا می‌کنند. در این تحقیق، نانوذرات روی-سولفید با استفاده از روش یک مرحله‌ای پلاسمای غیرحرارتی (بادستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک) در فشار اتمسفر، که بر بستر فوم نیکل نهشت داده‌شده بودند، اصلاح شد. به منظور بررسی خواص الکتروشیمیایی الکترودهای تهیه‌شده، آزمون‌های ولتامتری چرخه‌ای (CV) و شارژ-دشارژ گالوانواستاتیک (GCD) به‌کار برده‌شدند. نتایج به‌دست آمده از آنالیز شارژ-دشارژ گالوانواستاتیک، ظرفیت ویژه بالا برابر با 325.5 F/g را در چگالی جریان 1 A/g نشان داد. به‌علاوه، با توجه به منحنی‌های ولتامتری چرخه‌ای، عملکرد الکتروشیمیایی مناسب الکترودها تایید شدند. از این رو، این پژوهش می‌تواند در توسعه الکترودهای نوین ابرخازنی، بر پایه سنتز پلاسمایی مفید باشد.

کلیدواژه- ابرخازن، اصلاح سطح توسط پلاسما، پلاسما غیرحرارتی، تخیله سد دی‌الکتریک، سولفید روی

Non-thermal plasma surface modification of zinc sulfide to enhance the efficiency of energy storage electrodes

Mahdiyeh Mohammadi[1*], Ali Latifi[1], Saed Jafari[1]

[1] Department of Physics, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht

* mahdiyeh79m@gmail.com

Abstract- Nowadays, energy storage systems, particularly supercapacitors, are essential for advancing modern technologies. In this study, zinc-sulfide nanoparticles were successfully deposited on nickel foam and modified using a single-step non-thermal plasma technique (utilizing a dielectric barrier discharge) at atmospheric pressure. To assess the electrochemical properties of the fabricated electrodes, cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic charge-discharge (GCD) tests were conducted. The galvanostatic charge-discharge analysis revealed a high specific capacitance of 325.5 F/g at a current density of 1 A/g. Additionally, the cyclic voltammetry curves verified the satisfactory electrochemical performance of the electrodes. Consequently, this research could aid in developing innovative supercapacitor electrodes through plasma synthesis.

Keywords: Dielectric barrier discharge, Non-thermal plasma, Plasma surface modification, Supercapacitor, Zinc sulfide.

مقدمه

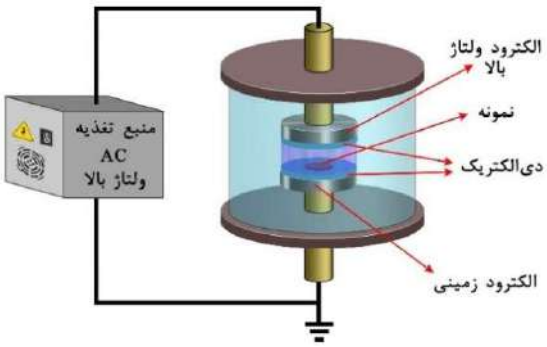
اصلاح سطح با پلاسما یک روش مؤثر برای تغییر خواص سطحی مواد، ازجمله خواص الکتریکی، شیمیایی، بیولوژیکی و مکانیکی به‌شمار می‌رود [۱]. رادیکال‌های آزاد موجود در محیط پلاسما، با عامل‌های سطحی مواد مختلف واکنش می‌دهند و منجر به تغییر شیمی سطح می‌شوند. به‌علاوه، گونه‌های پر انرژی در محیط پلاسما با برخورد با سطح ماده هدف می‌تواند مورفولوژی سطحی را تغییر دهد [۲]. در سال های اخیر، به واسطه ویژگی‌های منحصر به فرد پلاسما، لایه‌نشانی و اصلاح سطح به روش پلاسما بسیار مورد توجه بوده‌است [۳].

ذخیره‌سازی انرژی یکی از مهم‌ترین چالش‌های دنیای امروز است. افزایش تقاضا برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پایدار، نیاز به مواد پیشرفته برای الکترودهای ابرخازن‌ها را بیشتر کرده‌است. ابرخازن‌ها به دلیل سرعت شارژ بالا، عمر طولانی و ایمنی، به عنوان جایگزینی برای باتری‌ها در دستگاه‌های الکترونیکی قابل‌حمل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. این مطالعه به بررسی سنتز سریع نانوذرات سولفید-روی (ZnS) با استفاده از پلاسما سرد می‌پردازد. نانوذرات ZnS یک ماده امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف از جمله کاتالیز، فتوولتائیک و سنجش گاز است. با این‌حال، نانوذرات ZnS محدودیت‌هایی در خواص سطحی از خود نشان می‌دهد [۵].

به منظور اصلاح سطح نانوذات ZnS، دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) به‌کار برده شده‌است. پلاسمای DBD یک فناوری پلاسمای غیرحرارتی است که می‌تواند برای اصلاح خواص سطحی نانوذرات استفاده شود [۶]. الکترودهای سولفید-روی ساخته‌شده با این روش، بهبود عملکرد الکتروشیمیایی و ویژگی‌هایی از جمله ظرفیت ویژه بالا و پایداری چرخه‌ای مناسب را نشان می‌دهد. این روش، با بهره بردن از مزایای پلاسما سرد، راهی امیدوارکننده برای توسعه الکترودهای ابرخازن با کارایی بالا ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک در فشار اتمسفر و جریان هوا، برای اصلاح سطح الکترودهای ابرخازنی بر پایه نانوذرات ZnS استفاده شد. شمای کلی دستگاه در شکل (۱) آورده شده‌است.



شکل ۱: دستگاه پلاسمایی تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)

به منظور ساخت الکترودهای ابرخازن، از بستر فوم نیکل با ابعاد 1×1 cm استفاده شد. برای از بین بردن اکسیدهای فلزی و شست‌وشوی فوم نیکل، زیرلایه‌ها ابتدا به مدت ۱۰ دقیقه در محلول 37 wt.% HCL در دستگاه التراسونیک قرار داده‌شدند. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با استفاده از مخلوط اتانول و آب مقطر تمیز شدند. در مرحله بعد، بسترهای فوم نیکل در محلول 10 wt.% از نانوذرات روی-سولفید غوطه ور شد سپس در دستگاه DBD بر روی الکترود پایینی قرار گرفت. برای تهیه محلول ZnS از دی‌متیل فرمامید (DMF) به عنوان حلال استفاده شد.

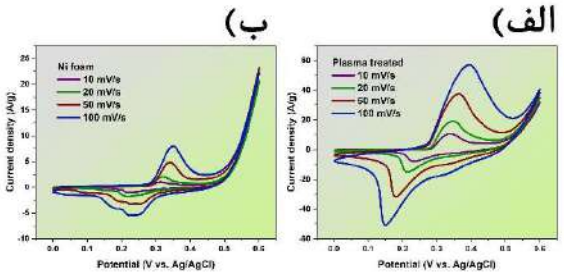
برای اصلاح سطح نانوذرات ZnS، ولتاژ منبع تغذیه برابر با 10 kV و فرکانس آن برابر با 20 kHz در نظر گرفته‌شد. نمونه‌ها به مدت ۱۵دقیقه در معرض پلاسما قرار گرفتند و فاصله الکترودهای پلاسما برابر به 2 cm تنظیم شد. پس از اعمال پلاسما، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در کوره هوا قرار گرفتند. دمای نهایی کوره برابر با 500 °C و نرخ دمایی آن 5 °C/min بود.

برای مطالعه الکترودهای ساخته‌شده، عملکرد الکتروشیمیایی آن‌ها با استفاده از آزمون‌های ولتامتری چرخه‌ای (CV) و شارژ-دشارژ گالوانوستاتیک (GCD) ارزیابی شدند. برای این منظور، الکترود سنتزشده به‌عنوان الکترود کار، در یک سامانه سه الکترودی متشکل از الکترود شمارنده (از جنس پلاتین)، و الکترود مرجع (Ag/AgCl)، به‌کار برده‌شد. همچنین، در این آزمون از محلول 4 M KOH به عنوان الکترولیت استفاده شد. ظرفیت ویژه (C_S) الکترودها از رابطه (۱) محاسبه شد [۷]:

$$C_S = \frac{I\,\Delta t}{m\,\Delta V} \qquad (۱)$$

بحث و نتایج

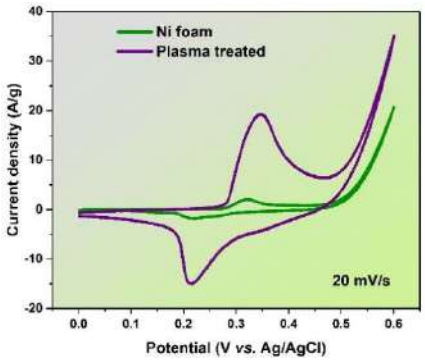
به‌منظور بررسی عملکرد الکتروشیمیایی الکترودهای اصلاح‌شده با پلاسما، آزمون‌های ولتامتری چرخه‌ای (CV) و شارژ-دشارژ گالوانواستاتیک (GCD) از نمونه‌ها گرفته‌شد. در شکل ۲ (الف) منحنی‌های CV فوم نیکل خالص و در شکل ۲ (ب) منحنی‌های CV الکترود اصلاح‌شده با پلاسما در محلول 4 M KOH برای نرخ‌های روبش متفاوت آورده شده‌است.



شکل ۲: منحنی‌های CV الکترودهای الف) فوم نیکل خالص و ب) روی-سولفید اصلاح‌شده با پلاسما، در سرعت‌های روبش مختلف.

همان‌طور که در شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود، افزایش نرخ روبش، منجر به افزایش سطح زیر نمودار منحنی‌ها و افزایش جریان متناظر الکترود می‌شود. این امر برگشت‌پذیری مناسب نمونه‌ها را نشان می‌دهد. به علاوه مشاهده می‌شود که پروفایل‌های CV حتی در سرعت‌های روبش بالا تا حد زیادی ثابت می‌ماند که نشان‌دهنده ظرفیت خازنی بالا و پایداری الکتروشیمیایی عالی الکترود سنتزشده است.

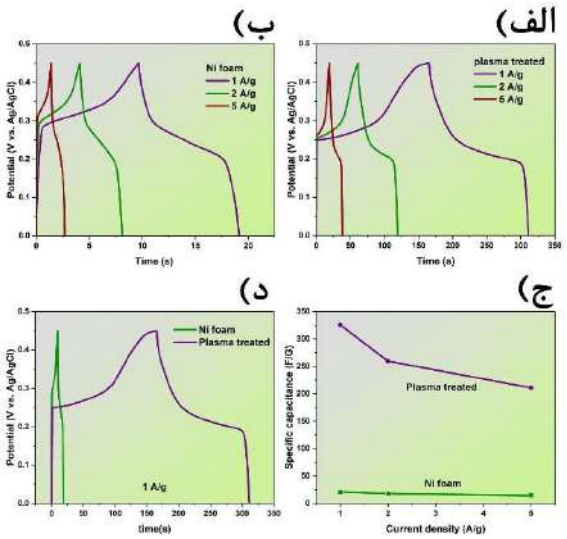
شکل ۳ مربوط به نمودار مقایسه‌ای CV برای الکترود فوم خالص و الکترود اصلاح‌شده با پلاسما در سرعت روبش 20 mV/s، در بازه پتانسیل صفر تا ۰.۶ V است. همانطور که از شکل پیداست، سطح زیر نمودار الکترود اصلاح‌شده با پلاسما بیشتر از سطح زیر نمودار فوم نیکل خالص است. از این‌رو، این نتیجه حاصل می‌شود که الکترود اصلاح‌شده با پلاسما ظرفیت خازنی بالایی را ارائه می‌دهد.



شکل ۳: نمودار مقایسه‌ای CV الکترود فوم نیکل خالص و الکترود روی-سولفید اصلاح‌شده با پلاسما در سرعت روبش 20 mV/s در الکترولیت 4 M KOH.

برای ارزیابی دقیق‌تر الکترود ساخته‌شده و محاسبه ظرفیت خازنی، آزمون GCD در چگالی جریان‌های مختلف انجام شد (شکل ۴ (الف) و (ب) را ببینید). همانطور که مشاهده می‌شود، تمام منحنی‌های GCD برگشت‌پذیری خوبی را نشان می‌دهند. همچنین، با توجه به شکل منحنی‌های GCD ماهیت شبه‌خازنی الکترودها قابل مشاهده است که تطابق خوبی با منحنی‌های CV دارد. به‌علاوه، منحنی‌های GCD، حتی در چگالی جریان بالا 5 A/g، شکل مثلثی خود را حفظ کردند که نشان‌دهنده مناسب بودن الکترود ساخته‌شده برای سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی است که نیاز به شارژ و دشارژ سریع دارند.

ظرفیت ویژه الکترودها در چگالی‌های جریان مختلف ۱، ۲ و ۵ A/g محاسبه شد که در شکل ۴ (ج) نشان‌داده شده‌است. مقادیر ظرفیت ویژه برای الکترود روی-سولفید سنتزشده با پلاسما برای چگالی‌های جریان ۱، ۲ و ۵ A/g به ترتیب ۳۲۵.۵، ۲۵۹.۵ و ۲۱۱ F/g به‌دست آمد؛ در حالی که این مقادیر برای فوم نیکل خالص به ترتیب ۲۰.۹، ۱۷.۷، ۱۴.۴ F/g بود. نمودار GCD برای دو الکترود اصلاح‌شده با پلاسما و فوم نیکل خالص در شکل ۴ (د) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که زمان دشارژ در الکترود روی-سولفید اصلاح‌شده با پلاسما بسیار بالاتر از الکترود فوم نیکل است که نشان‌دهنده ظرفیت خازنی بالا الکترود ساخته‌شده است. این افزایش ظرفیت می‌تواند به‌واسطه حضور عامل‌های شیمیایی فعال پلاسمایی در فرایند اصلاح روی-سولفید نهشت‌شده بر بستر الکترود فوم نیکل باشد.



شکل ۴: منحنی‌های GCD الکترودهای الف) فوم نیکل خالص و ب) روی-سولفید اصلاح‌شده با پلاسما، در چگالی های جریان‌مختلف، ج) ظرفیت ویژه الکترودها بر حسب چگالی‌های جریان، و د) نمودار مقایسه‌ای GCD الکترود فوم نیکل خالص و الکترود روی-سولفید اصلاح‌شده با پلاسما در چگالی جریان 1 A/g.

نتیجه‌گیری

دراین پژوهش با به‌کاربردن پلاسمای غیرحرارتی فشار اتمسفری DBD موفق به اصلاح سطح نانوذرات ZnS نهشت‌شده بر بستر فوم نیکل شدیم. استفاده ازاین روش منجر به بهبود قابل‌توجه خواص الکتروشیمیایی فوم نیکل شد که نشان‌دهنده پتانسیل بالا آن برای کاربرد در دستگاه‌های ذخیره انرژی است. الکترودهای فوم نیکل حاوی ZnS اصلاح‌شده با پلاسما، در بررسی منحنی ولتامتری چرخه‌ای CV ظرفیت خازنی بالاتری نسبت به نمونه فوم نیکل خالص بدون اعمال پلاسما داشتند. به‌علاوه، با توجه به نمودار GCD، ظرفیت ویژه بالا برابر با 325.5 F/g برای الکترود روی-سولفید اصلاح‌شده با پلاسما به‌دست آمد. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان داد که روش اصلاح سطح پلاسمایی، یک روش ساده و سریع برای افزایش عملکرد الکتروشیمیایی الکترودهای ذخیره انرژی است.

مرجع‌ها

[1] Bhatt, S., Pulpytel, J., & Arefi-Khonsari, F. (2015). Low and atmospheric plasma polymerisation of nanocoatings for bio-applications. Surface Innovations, 3(2), 63-83.

[2] Das, P., Ojah, N., Kandimalla, R., Mohan, K., Gogoi, D., Dolui, S. K., & Choudhury, A. J. (2018). Surface modification of electrospun PVA/chitosan nanofibers by dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure and studies of their mechanical properties and biocompatibility. International journal of biological macromolecules, 114, 1026-1032.

[3] Attri, P., Sarinont, T., Kim, M., Amano, T., Koga, K., Cho, A. E., ... & Shiratani, M. (2015). Influence of ionic liquid and ionic salt on protein against the reactive species generated using dielectric barrier discharge plasma. Scientific reports, 5(1), 17781.

[4] Karimzadeh, Z., Shokri, B., & Morsali, A. (2023). The cold plasma synthesis of hierarchical MOF-based nanocomposites with improved electrochemical properties for energy storage devices. Applied Physics Letters, 123(10).

[5] Sonawane, H., Deore, J., Rajshri, S., & Chavan, P. (2023). Synthesis of ZnS nanomaterials and their applications via green approaches: an overview. BioNanoScience, 13(2), 879-890.

[6] Karimzadeh, Z., Shokri, B., & Morsali, A. (2023). Rapid cold plasma synthesis of cobalt metal–organic framework/reduced graphene oxide nanocomposites for use as supercapacitor electrodes. Scientific Reports, 13(1), 15156.

[7] Boota, M., & Gogotsi, Y. (2019). MXene—conducting polymer asymmetric pseudocapacitors. Advanced Energy Materials, 9(7), 1802917.

پنهان‌سازی صوتی به کمک مواد پنتامود برای کاربردهای زیر آب

فاطمه احمدزاده[۱]، علی بهرامی[۱] و منصور زارع‌منش[۱]

۱. آزمایشگاه تحقیقاتی الکترونیک نوری و نانوفوتونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده - در این مقاله، یک رویکرد جدید برای دستیابی به پنهان‌سازی صوتی زیر آب با استفاده از مواد پنتامود دو بعدی ارائه شده است. پوشش پیشنهادی متشکل از یک شبکه مربعی از جنس آلومینیوم و با ثابت شبکه ۱۰ میلیمتر است که در پس زمینه هوا تشکیل شده و در آب غوطه‌ور شده است. برای دستیابی به پوشش مؤثر، تطبیق امپدانس در هندسه کلی ساختار اعمال شد. از طریق شبیه‌سازی با روش المان محدود برای محدوده فرکانس ۱ تا ۱۲ کیلوهرتز پنهان‌سازی به دست آمده است.

کلیدواژه– پنهان‌سازی صوتی، ساختار باند فونونی، ساختار شبه‌آب، مواد پنتامود.

Acoustic Cloaking using Pentamode Materials for Underwater Applications

Fatemeh Ahmadzadeh, Ali Bahrami, and Mansour Zaremanesh

Optoelectronics and Nanophotonics Research Lab. (ONRL), Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

fa_ahmadzadeh98@sut.ac.ir

Abstract- This paper presents a novel approach to achieving underwater acoustic cloaking using two-dimensional pentamode materials. The proposed cloak consists of a square lattice made of aluminum, with a lattice constant of 10 millimeters, which is embedded in air and submerged in water. To achieve effective cloaking, impedance matching was applied to the overall geometry of the structure. Cloaking was achieved through finite element method simulations over the frequency range of 1 to 12 kHz.

Keywords: Acoustic cloaking, Phononic band structure, Water-like structure, Pentamode materials.

مقدمه

نامرئی‌سازی به این معناست که حضور یک شی در خارج از پوشش اعوجاج قابل توجهی از تشعشع فرودی کاوشگر ایجاد نکند و تشخیص را از اندازه‌گیری‌های اطراف خود جسم نیز غیرممکن سازد. از منظر مهندسی، مفهوم پوشش صوتی در حفظ استراتژیک زیردریایی‌ها، یعنی پنهان‌سازی آن در هنگام کار در زیر آب، کاربرد طبیعی پیدا می‌کند. در واقع، از آنجایی که نور در آب‌های شور و کثیف مسافت‌های زیادی را نمی‌تواند طی کند، ثابت شد که حرکت در زیر آب یک استراتژی پنهان‌سازی مهم است.

ایده اولیه پوشش‌های صوتی از یافته‌های الکترومغناطیس ناشی می‌شود و با توجه به هم ارزی معادله موج صوتی و معادله مودهای الکتریکی و مغناطیسی عرضی، در ابتدا تبدیل الزامات مربوط به گذردهی دی الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی که از طراحی پوشش‌های نوری ناشی می‌شود، به الزامات مربوط به ماژول حجمی و چگالی جرم، که بر انتشار امواج طولی در سیالات نظارت می‌کند، است. با استفاده از نظریه تبدیل مختصات در این روش، مشخص می‌شود که خواص اینرسی ناهمسانگرد مورد نیاز است. به همین دلیل، نوریس [۱] بعدها این نوع پوشش‌های صوتی را پوشش‌های اینرسی نامید. نوریس همچنین اشاره کرد که توزیع خواص موادی که پوشش را برای یک هندسه مشخص می‌کند، منحصر به فرد نیست. در واقع، ناهمسانگردی مورد نیاز برای تبدیل‌های غیرمنسجم را می‌توان نه تنها با فرض سیال با جرم اینرسی کششی، بلکه با استفاده از جامداتی با خواص الاستیک ناهمسانگرد به نام مواد پنتامود به دست آورد [۱]. این یک تعمیم مفهومی از سیالاتی است که ابتدا توسط میلتون و چرکایف [۲] معرفی شد. با فرض یک تانسور الاستیسیته با پنج مقدار از شش مقدار ویژه صفر، معادله ساختاری نشان می‌دهد که تنها یک حالت تنش می‌تواند در جامد ایجاد شود.

پنهان‌سازی به کمک مواد پنتامود بیشتر مبتنی بر ساختارهای لانه زنبوری با تیتانیوم که یک فلز گرانبهاست انجام شده است [۳، ۴]. در این مقاله، پس از طراحی یک ساختار شبه‌آب، ساختاری با ویژگی‌های مشابه آب، به کمک مواد پنتامود از جنس آلومینیوم با ثابت شبکه ۱۰ میلی‌متر ویژگی شبه سیال بودن ساختار به دست می‌آید. سپس با طراحی یک ساختار تدریجی سعی در ایجاد یک ناحیه پنهان‌ساز داریم. نتایج به دست آمده پنهان سازی را برای بازه فرکانسی ۱ تا ۱۲ کیلوهرتز به کمک روش اجزا محدود تایید می‌کند.

خصوصیات فرامواد پنتامود

پنتامود مورد بررسی در این کار نوعی ساختار متخلخل دوره‌ای است که قرار است معادل یک محیط همگن باشد که رفتار موجی آن شبیه آب است. برای امواج الاستیک منتشر شده در یک ساختار متخلخل تناوبی، محیط مؤثر را می‌توان با تانسور الاستیسیته C^{eff} به صورت زیر مشخص کرد [۵]:

$$\mathbf{C}^{eff} = \begin{bmatrix} k_x^{eff} & k_{xy}^{eff} & 0 \\ k_{xy}^{eff} & k_y^{eff} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy}^{eff} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن k_x^{eff} و k_y^{eff} به ترتیب ماژول‌های طولی الاستیک مؤثر در جهت‌های اصلی x و y هستند. G_{xy}^{eff} ماژول کوپل مؤثر در این دو جهت اصلی را نشان می‌دهد و نشان دهنده ماژول برشی مؤثر است. بازیابی تانسور الاستیک مؤثر با استفاده از روابط پاشندگی در محدوده طول موج بلند [۵]:

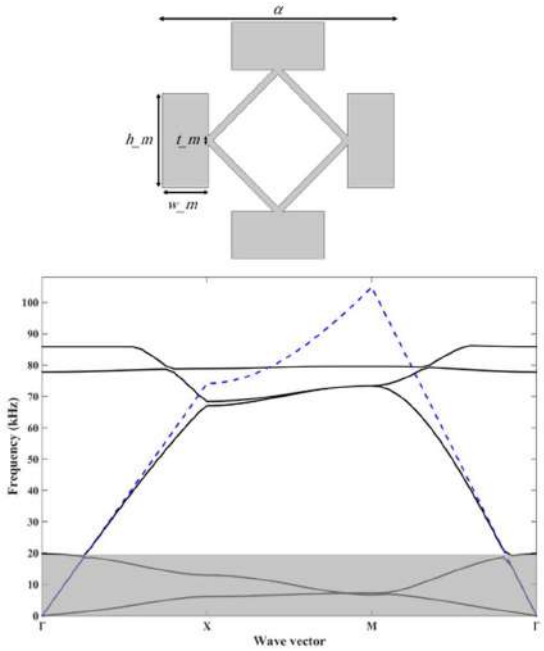
(۲)

$$c_{Lx} = \sqrt{\frac{k_x^{eff}}{\rho^{eff}}}, \quad c_{Tx} = \sqrt{\frac{G_{xy}^{eff}}{\rho^{eff}}},$$
$$c_{Ly} = \sqrt{\frac{k_y^{eff}}{\rho^{eff}}} \quad c_{Ty} = \sqrt{\frac{G_{xy}^{eff}}{\rho^{eff}}},$$
$$c_{L45} = \frac{1}{4\rho^{eff}}\left[k_x^{eff} + k_y^{eff} + 2G_{xy}^{eff} + \sqrt{\left(k_x^{eff} - k_y^{eff}\right)^2 + 4\left(k_{xy}^{eff} + G_{xy}^{eff}\right)^2}\right],$$
$$c_{T45} = \frac{1}{4\rho^{eff}}\left[k_x^{eff} + k_y^{eff} + 2G_{xy}^{eff} - \sqrt{\left(k_x^{eff} - k_y^{eff}\right)^2 + 4\left(k_{xy}^{eff} + G_{xy}^{eff}\right)^2}\right],$$

معادله فوق نشان می‌دهد که ماژول‌های طولی و عرضی به ترتیب توسط سرعت موج طولی و عرضی در راستای جهت-های اصلی تعیین می‌شوند و ماژول کوپل با سرعت موج طولی و عرضی در امتداد جهت‌های اصلی و جهت ۴۵ درجه تعیین می‌شود. چگالی جرم مؤثر پنتامود مستقیماً با $\rho^{eff} = \rho_0\gamma_s$ تعریف می‌شود، که ρ_0 چگالی جرمی جامد و γ_s نشان دهنده نرخ اشغال جامد در سلول واحد است [۵].

روش طراحی

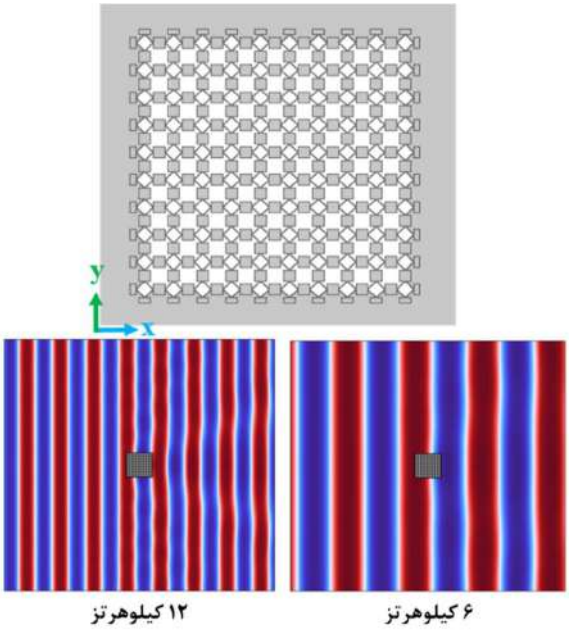
با الهام از ساختارهای لانه‌زنبوری، یک سلول واحد مربعی از جنس آلومینیوم طراحی شده است که ثابت شبکه آن a=10mm و $t_m = 0.04a$، $h_m = 2w_m = 0.4a$ است. این سلول در شکل ۱ به همراه نمودار پاشندگی آن (خطوط سیاه) نشان داده شده است. همچنین، خطوط آبی خط‌چین، پاشندگی آب را نمایش می‌دهند. برای آنکه ساختار رفتار مشابه آب داشته باشد، لازم است دو باند با هم منطبق شوند که این ناحیه در نمودار پاشندگی شکل ۱ با سایه طوسی رنگ مشخص شده است. در واقع، در این ناحیه تنها مدهای طولی قابلیت انتشار در ساختار را دارند.



شکل ۱: نمایی از سلول واحد پنتامود (بالا) و نمودار پاشندگی آن که با خطوط سیاه نمایش داده شده است (پایین)

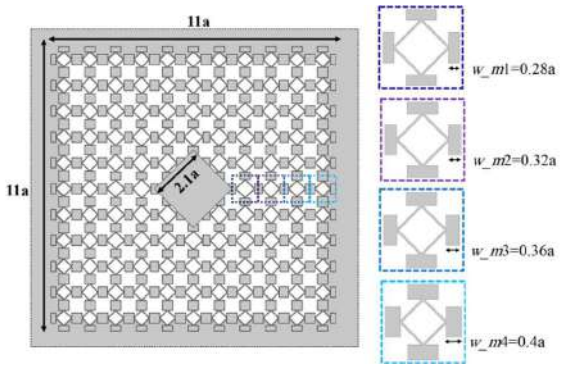
نتایج و بحث

برای ارزیابی رفتار شبه‌آب سلول واحد طراحی‌شده در بخش قبل، نتایج شبیه‌سازی ساختار شامل ۱۰ سلول واحد در ۱۰ سلول واحد با استفاده از نرم‌افزار کامسول در شکل ۲ برای دو فرکانس ۶ و ۱۲ کیلوهرتز نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدهای طولی در ساختار غالب هستند و امواج صوتی بدون اعوجاج تا انتهای ساختار انتشار می‌یابند.



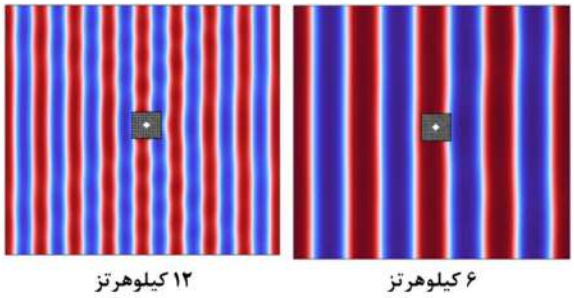
شکل ۲: ساختار شبه‌آب سلول واحد پنتامود طراحی‌شده (بالا)، و نتایج شبیه‌سازی برای دو فرکانس ۶ و ۱۲ کیلوهرتز (پایین)

پس از اطمینان از شبه‌آب بودن ساختار، اکنون به طراحی و شبیه‌سازی یک پنهان‌ساز صوتی می‌پردازیم. ساختار پیشنهادی در شکل ۳ نمایش داده شده و برای هدایت بهتر امواج در اطراف ناحیه پنهان‌ساز، از ساختارهای تدریجی بهره گرفته‌ایم. در این راستا، پارامتر w_m به صورت تدریجی تغییر می‌کند، به طوری که با نزدیک شدن به مرکز ساختار، مقدار w_m کاهش می‌یابد. ناحیه پنهان‌ساز نیز به شکل مربعی با ضلعی برابر با 2.1a شده است.



شکل ۳: نمایی از ساختار پنهان‌ساز صوتی پیشنهادی که با استفاده از مواد پنتامود و ساختارهای تدریجی طراحی شده است

نتایج شبیه‌سازی برای دو فرکانس ۶ و ۱۲ کیلوهرتز در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۲ کیلوهرتز، شی به‌طور مؤثری پنهان شده و اعوجاجی در امواج صوتی منتشر شده مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی ساختار پنهان‌ساز برای دو فرکانس ۶ و ۱۲ کیلوهرتز

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک پنهان‌ساز صوتی مبتنی بر مواد پنتامود طراحی و شبیه‌سازی شده است. استفاده از آلومینیوم به‌عنوان ماده پایه، نسبت به تیتانیوم، گزینه‌ای اقتصادی‌تر برای کاربردهای عملی به‌حساب می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده قابلیت مؤثر پنهان‌سازی در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۲ کیلوهرتز است.

مرجع‌ها

[1] A. N. Norris, “Acoustic cloaking theory”, Proc. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci., Vol. 464, No. 2097, pp. 2411-2434, 2008.

[2] G. W. Milton, A. V. Cherkaev, “Which elasticity tensors are realizable” J. Eng. Mater. Technol., Vol. 117, pp.483-493, 1995.

[3] Z. Luo, Q. Zhou, P. Guo, “Microstructure design and performance optimization of constant modulus pentamode materials acoustic cloak” Cryst., Vol. 12, No. 11, p.1572, 2022.

[4] M. Zaremanesh, A. Bahrami, “Two-dimensional honeycomb lattice structure for underwater acoustic cloaking using pentamode materials”, Phys. Scr., Vol. 99, No. 1, p.015946, 2023.

[5] Dong, Hao-Wen, et al. “Customized broadband pentamode metamaterials by topology optimization” J. Mech. Phys. Solids, Vol. 152, p. 104407, 2021.

تاثیر زاویه تابش روی حساسیت حسگر ضریب شکست مبتنی بر بلور فوتونی پلاسمای سرد

زهرا گلوانی[۱*]، محمدکوهی [۱]، علی واحدی[۱]، سیما ضیغمی[۱]، صمد سبحانیان[۲]

[۱]گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، ایران

چکیده – در این مقاله ، یک حسگر ضریب شکست مبتنی بر بلور فوتونی پلاسمای سرد مغناطیده برای تشخیص دقیق و سریع آلاینده های گازی طراحی و شبیه سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش ماتریس انتقال نشان می‌دهد که تغییر پارامترهای ساختاری مانند زاویه تابش تأثیر بسزایی بر عملکرد حسگر دارد. افزایش زاویه تابشی از ۰ تا ۷۵ درجه منجر به افزایش حساسیت از ۲/۸۴ تا ۳۵/۴۰ GHz/RIU گردید. حسگر پیشنهادی قادر به تشخیص تغییرات کوچک ضریب شکست بوده و در کاربردهایی نظیر نظارت بر کیفیت هوا و تشخیص گازهای مضر، می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه- حسگر ضریب شکست، بلور فوتونی، پلاسمای سرد مغناطیده، ماتریس انتقال، باند ممنوعه فوتونی

The effect of Incident Angle on the Sensitivity of a Refractive index Sensor Based on Cold Plasma Photonic Crystal

Zahra Galavani [1], Mohammad Kouhi [1*], Ali Vahedi[1], Sima Zeighami [1], Samad Sobhanian[2]

[1]Department of Physics, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran.

[2] Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

kouhi@iaut.ac.ir

Abstract- In this paper, a refractive index sensor based on magnetized cold plasma photonic crystal is designed and simulated for accurate and fast detection of gaseous pollutants. The simulation results using the transfer matrix method show that changing the structural parameters such as the incident angle has a significant impact on the sensor performance. Increasing the incident angle from 0 to 75 degrees increases the sensitivity from 2.84 to 35.40 GHz/RIU. The proposed sensor is able to detect small changes in the refractive index and can be used in some applications such as air quality monitoring and harmful gases detection.

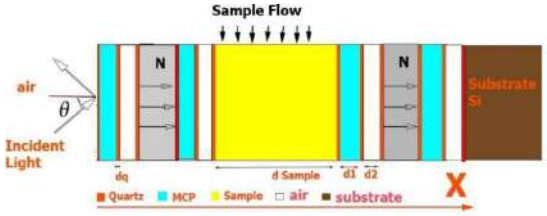
Keywords: Refractive index sensor, Photonic crystal, Magnetized cold plasma, Transfer matrix, Photonic bandgap

مقدمه

اخیراً، حسگرهای ضریب شکست بر مبنای بلور فوتونی به دلیل حساسیت بالا و کاربردشان در زمینه های مختلف مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در حسگرهای نوری، شدت نور عبوری و یا انعکاسی به طول موج، زاویه تابش نور، مشخصات بلور فوتونی، دما، فشار و ضریب شکست نمونه حساس است. وجود مدهای نقص در داخل باند ممنوعه بلورهای فوتونی دارای نقص و جابجایی آنها در اثر تغییرات ضریب شکست، امکان شناسایی سریع نمونه ها را فراهم می سازد. این نوع از حسگرها به علت داشتن دامنه کارایی گسترده و روش‌های ساخت آسان و کم‌هزینه، اهمیت تحقیقاتی و کاربردی زیادی پیدا کرده‌اند [۱]. دردهه اخیر، بلورهای فوتونی با ساختار فلز، نیمه هادی، ابررسانا، فراماده، و غیره توسط محققان بسیاری طراحی و مورد بررسی قرار گرفته اند [۲, ۳]. اخیراً پلاسمای سرد مغناطیده (MCP) به دلیل داشتن خواص نوری، الکتریکی و مکانیکی منحصر به فرد در طراحی ساختار بلورهای فوتونی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۴]. پلاسمای سرد مغناطیده، یک ماده منحصر به فرد است که خواص فیزیکی آن مثل گذردهی الکتریکی را می توان به طور مناسب با عوامل مختلف مانند میدان مغناطیسی خارجی کنترل کرد [۵]. با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی به پلاسما، فرکانس سیکلوترونی با دو قطبش راستگرد (RHP) و چپگرد (LHP) بسته به جهت میدان مغناطیسی بوجود می آید [۴, ۵]. با تغییر پارامترهای مختلفی مانند چگالی الکترون، میدان مغناطیسی، فرکانس برخورد می توان به طور موثر ضریب شکست مواد MCP را تنظیم کرد. با توجه به این ویژگی، ماده MCP می‌تواند جایگزین مناسبی برای فلزات و مواد دی الکتریک معمولی در مطالعه و ساخت بلور فوتونی باشد. در اکثر پژوهش های انجام یافته در این زمینه [۴-۷] نقش ظرف نگه دارنده پلاسما نادیده گرفته شده است. با توجه به اینکه وجود ظرف نگه دارنده پلاسما هم از نظر قابلیت ساخت عملی بلور فوتونی پلاسمایی و هم از نظر تاثیر اپتیکی روی باند ممنوعه بلور فوتونی حائز اهمیت است، لذا در این تحقیق ساختار بلور فوتونی پلاسمایی طوری تعمیم داده شده است که نقش ظرف کوارتز نگه دارنده پلاسما در محاسبات پارامترهای کارآیی حسگر منظور گردد. جابجایی مد نقص به دلیل تغییر ضریب شکست نمونه اساس فیزیکی کارکرد حسگر است. از روش ماتریس انتقال طیف نور عبوری حسگر محاسبه و تاثیر زاویه تابش روی حساسیت آن بررسی شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش زاویه ی تابش حساسیت حسگر افزایش می یابد.

طراحی ساختار حسگر

شکل ۱ ساختار حسگر پیشنهادی را نشان می‌دهد. بلور فوتونی طراحی شده شامل لایه های متناوب (کوارتز/ پلاسمای سرد مغناطیده/ کوارتز/ هوا) است، که در دو طرف لایه نقص (نمونه) چهار بار تکرار شده است. ضخامت لایه های کوارتز، پلاسما، هوا و لایه ی نمونه به ترتیب ۱، ۱۰، ۱۰و ۱۲۰ میلی متر انتخاب شده اند. کل بلور فوتونی روی زیر لایه سیلیسیم با ضریب شکست ۱/۴۶ قرار دارد. چگالی الکترونی پلاسما 8×10^{17} 1/ m^3 بوده و فرکانس برخورد الکترونها با ذرات خنثی 1.25 MHz در نظر گرفته شده است. میدان مغناطیسی ۰/۴۵ تسلا به لایه های پلاسما اعمال می‌شود. تغییر ضریب شکست نمونه منجر به جابجایی مد نقص در باند ممنوعه بلور فوتونی خواهد شد.



شکل ۱: ساختار هندسی حسگر پیشنهادی.

روش محاسبات

شبیه سازی با استفاده از روش ماتریس انتقال انجام شده است که برای محاسبه طیف عبوری و بازتابی ساختارهای چند لایه ای مناسب است. پارامترهای کلیدی شامل چگالی الکترونی پلاسما، فرکانس برخورد، میدان مغناطیسی و ضخامت لایه ها به منظور بهینه سازی عملکرد حسگر مورد بررسی قرار گرفتند. ماتریس انتقال برای لایه‌ی j ام به صورت زیر است[۵]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\beta_j & -\frac{i}{q_j}\sin\beta_j \\ -iq_j\sin\beta_j & \cos\beta_j \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که ضخامت(d_j)، ضریب شکست (n_j) و زاویه تابش(θ_j) لایه‌ی j ام از طریق معادلات زیر در این ماتریس وارد محاسبات می شوند:

$$\beta_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda}\cos(\theta_j)$$
$$q_j = n_j\cos(\theta_j) \quad (۲)$$

پس از محاسبه ماتریس انتقال هر لایه و ضرب آنها می توان ماتریس انتقال را برای کل ساختار بلور فوتونی بدست آورد:

$$M = \prod_j M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

ضریب عبور از ساختار حسگر بصورت زیر محاسبه می شود:

$$T = \left(\frac{q_s}{q_i}\right)^2 \left|\frac{2q_i}{(m_{11}+q_s m_{12})q_i+(m_{21}+q_s m_{22})}\right|^2 \quad (۴)$$

q_s و q_i ضرایب مربوط به زیرلایه (سیلیسیم) و ناحیه ی تابش نور (هوا) بوده و از معادله (۲) محاسبه می شوند.

ثابت دی الکتریک پلاسمای سرد مغناطیده برخوردی توسط رابطه زیر محاسبه می شود[۵]:

$$\varepsilon_p(\omega) = 1 - \left[\frac{\omega_p^2}{\omega^2\left[1-\frac{i\gamma}{\omega}\pm\frac{\omega_c}{\omega}\right]}\right] \quad (۵)$$

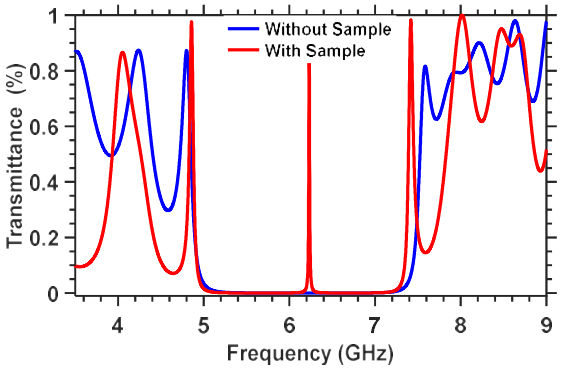
که در آن γ فرکانس برخورد است. همچنین، فرکانس پلاسما (ω_p) و فرکانس سیکلوترونی (ω_c) عبارتند از:

$$\omega_p = \sqrt{\left(\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0}\right)}$$
$$\omega_c = \frac{eB}{m_e} \quad (۶)$$

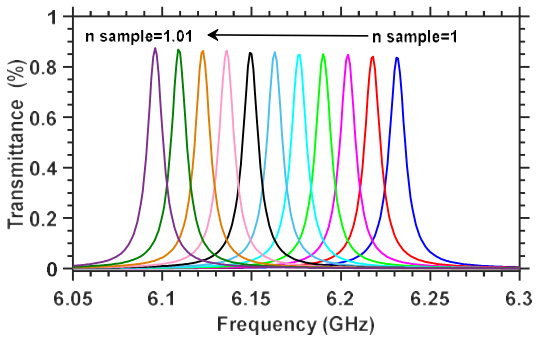
کمیت های B، m_e و n_e به ترتیب میدان مغناطیسی اعمالی بر پلاسما، جرم و بار الکترون هستند.

نتایج

محاسبات شبیه سازی حسگر پیشنهادی را یک بار بدون لایه نقص (نمونه) و بار دوم با لایه نقص انجام دادیم. شکل ۲ طیف عبور برای دو حالت بدون لایه ی نقص و بالایه ی نقص را نشان می دهد. در این شکل زاویه ی تابش ۶۰ درجه انتخاب شده و ضریب شکست لایه ی نقص یک در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ باند ممنوعه فوتونی در محدوده ۴/۸ تا ۷/۴ گیگاهرتز ملاحظه می شود. با حضور نمونه یک مد نقص در داخل باند ممنوعه فوتونی ظاهر می شود. نسبت اندازه جابجایی این مد نقص به مقدار تغییر ضریب شکست نمونه به عنوان حساسیت حسگر تعریف می شود.



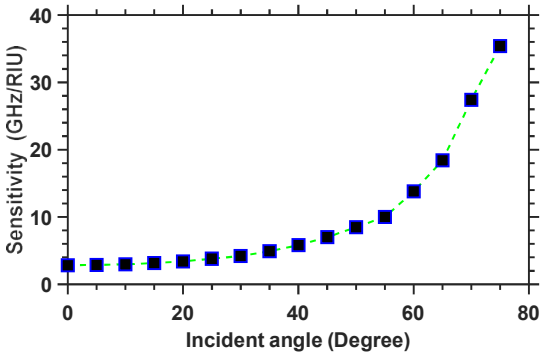
شکل ۲: منحنی طیف عبور برای حسگر پیشنهادی.



شکل ۳: طیف عبور به ازای ضرایب شکست مختلف نمونه.

ضریب شکست نمونه در بازه های ۰/۰۰۱ از ۱ تا ۱/۰۱ تغییر داده شد و طیف عبوری محاسبه گردید. شکل ۳ طیف عبوری را در محدوده مد نقص برای زاویه ی تابش ۶۰ درجه نشان می دهد. همانطوریکه از این شکل دیده می‌شود، با افزایش ضریب شکست پیک منحنی های مد نقص به سمت فرکانسهای کمتر جابجا می شوند و شدت پیک ها به مقدار ناچیزی افزایش می یابد.

حساسیت حسگر پیشنهادی در زاویه های مختلف تابشی محاسبه و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش زاویه تابش، حساسیت افزایش می‌یابد. در زاویه های کوچک آهنگ افزایش حساسیت کند بوده اما در زاویه های بزرگتر افزایش حساسیت قابل توجه است. به عنوان مثال وقتی زاویه ی تابش از ۰ تا ۳۰ درجه افزایش می یابد، حساسیت از 2.84 تا 4.20 GHz/RIU افزایش یافته است. درحالیکه برای افزایش زاویه ی تابش از ۳۰ تا ۶۰ درجه حساسیت حدود 10 GHz/RIU افزایش می یابد.



شکل ۴: نمودار تغییرات حساسیت حسگر برحسب زاویه ی تابش

کاهش زاویه ی فاز β و ضریب q با فزایش زاویه ی تابش مطابق معادله (۲)، علت افزایش حساسیت حسگر با افزایش زاویه ی تابش است.

نتیجه گیری

یک حسگر ضریب شکست مبتنی بر بلور فوتونی پلاسمای سرد مغناطیده معرفی شد. روش ماتریس انتقال برای محاسبه طیف عبوری ساختار حسگر مورد استفاده قرار گرفت. تاثیر تغییر زاویه ی تابش روی حساسیت حسگر مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می دهند با افزایش زاویه ی تابش حساسیت حسگر افزایش می یابد. در شرایط بهینه حساسیت 35.40 GHz/RIU بدست آمد. حسگر پیشنهادی توانایی تشخیص تغییرات ضریب شکست به اندازه ۰/۰۰۱ را دارد.

مرجع ها

[1] Z.A. Zaky, A. Sharma, S. Alamri, A.H. Aly, Theoretical evaluation of the refractive index sensing capability using the coupling of Tamm–Fano resonance in one-dimensional photonic crystals, Applied Nanoscience, Vol. 11, PP. 2261-2270, 2021.

[2] Q. Wang, X. Wang, L. Zhang, Y. Wang, W. Qiao, X. Han, X. Cai, W. Yu, Tunable defect modes of one-dimensional photonic crystals containing a Dirac semimetal-based metamaterial defect layer, Applied optics, Vol. 58, No. 1, PP. 94-101, 2019.

[3] A. Aghajamali, Transmittance properties in a magnetized cold plasma–superconductor periodic multilayer, Applied Optics, Vol. 55, No.23, PP. 6336-6340, 2016.

[4] Z.A. Zaky, A. Panda, P.D. Pukhrambam, A.H. Aly, The impact of magnetized cold plasma and its various properties in sensing applications, Scientific Reports, Vol. 12, No. 1, P. 3754, 2022.

[5] Z.A. Zaky, H.A. Amer, B. Suthar, A.H. Aly, Gas sensing applications using magnetized cold plasma multilayers, Optical and Quantum Electronics, Vol. 54, No. 4, P. 217, 2022.

[6] A. Kumar, N. Kumar, K.B. Thapa, Tunable broadband reflector and narrowband filter of a dielectric and magnetized cold plasma photonic crystal, The European Physical Journal Plus, Vol. 133, PP. 1-8, 2018.

[7] F.-P. Wu, J.-T. Zhang, H.-F. Zhang, Theoretical proposal of a sensor based on the comb-shaped coherent absorption realized by the magnetized plasma photonic crystals, Current Applied Physics, Vol. 56, PP. 16-23, 2023.

ساخت و مشخصه یابی سلول خورشیدی پروسکایتی با الکترود نیمه شفاف طلا

شادمهر باقری[۱]، مریم عالی دائی[۱]، وحید احمدی[۱*]، فرزانه عربپور[۱و۲]

[۱] دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده - با گرایش روز افزون به افزاره‌های الکترونیکی نیمه‌شفاف، تقاضا برای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف (ST-PSC) در حال افزایش است. در این مقاله، افزاره‌های ST-PSC با ساختار n-i-p شامل الکترودهای نیمه‌شفاف طلا با ضخامت‌های مختلف ساخته شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند. این سلول‌ها با هدف بهبود شفافیت، به‌خصوص برای کاربردهایی مانند پنجره ساختمان طراحی می‌شوند. هرچندکاهش ضخامت لایه طلا از ۷۰ به ۱۷ نانومتر، منجر به کاهش بازده ST-PSC به ترتیب از ۱۵/۳۱٪ به ۱۳/۷۲٪ شده ولی در مقابل، میزان عبور نور، بیش از ۵ برابر می‌شود. بنابراین کاهش ضخامت لایه طلا، راهکاری مؤثر برای افزایش شفافیت افزاره‌های ST-PSC است.

کلیدواژه- سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه شفاف، الکترود طلا، بازده تبدیل انرژی، لایه‌نشانی چرخشی

Fabrication and characterization of of perovskite solar cell with semi-transparent gold electrode

Shadmehr Bagheri[1], Maryam Alidaei[1], Vahid Ahmadi[1*], Farzaneh Arabpour[1,2]

[1] Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[2] Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

arabpour@modares.ac.ir و* shamehrbagheri@gmail.com, m.alidaee@gmail.com, v_ahmadi@modares.ac.ir

Abstract- Due to great interest in semi-transparent electronic devices, the demand for semi-transparent perovskite solar cells (ST-PSC) is increasing. In this article, ST-PSC devices with n-i-p structure including semi-transparent gold electrodes with different thicknesses are fabricated and analyzed. These cells are designed with the aim of improving transparency, especially for applications such as building windows. Although reducing the thickness of the gold layer from 70 to 17 nm has led to a decrease in ST-PSC efficiency from 15.31% to 13.72%, respectively, the passage of light increases more than 5 times. Therefore, reducing the thickness of the gold layer is an effective solution to increase the transparency of ST-PSC devices.

Keywords: semi transparent perovskite solar cell, gold electrode, power conversion efficiency, spin-coating

مقدمه

داشتن پنجره نوری شفاف در محدوده نور مرئی برای تولید الکتریسیته، مدت‌هاست یک رؤیا بوده است و انتظار می‌رود با ظهور سلول‌های خورشیدی پروسکایتی لایه نازک به واقعیت تبدیل شود. افزاره‌های ST-PSC با بازده بالا، نیاز به اتصال پشتی شفاف دارند. برای ساخت یک سلول خورشیدی پروسکایتی کاملاً نیمه‌شفاف، به اتصال شفاف نیاز است. این را می‌توان با تکنیک‌ها و مواد مختلفی مانند ساختارهای دوبعدی، اکسیدهای رسانای شفاف (TCOs)، نانولوله‌های (NWs) فلزی، الکترود گرافن و غیره به دست آورد [۱, ۲]. استفاده از الکترود طلا با ضخامت کم، یکی از راهکارهای افزایش شفافیت سلول خورشیدی است. در بیشتر سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، از یک لایه فلزی نسبتاً ضخیم (حدود ۱۰۰ nm) به‌عنوان اتصال پشتی استفاده می‌شود که به

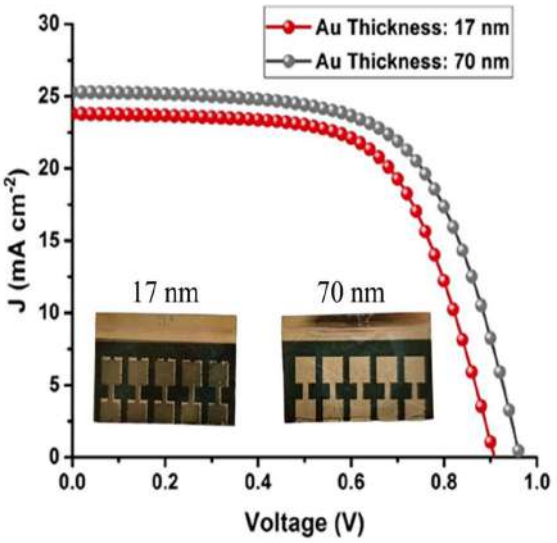
دلیل ضریب شکست بالا، مانع از عبور نور از آن می‌شود [۳]. در این تحقیق، برای دستیابی به ساختار نیم شفاف، افزاره‌های ST-PSC باساختار Glass/ITO/SnO_2/FAMAPbIBrCl/Spiro/Au شامل طلا با دو ضخامت ۷۰ nm و ۱۷ nm ساخته می‌شوند.

روش ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی

در گام نخست زیرلایه‌های Glass/ITO با مقاومت سطحی Ω /sq ۶۰ خریداری شده از شرکت سیگما با ابعاد mm^2 ۲۵×۱۴ برش داده می‌شوند. سپس به منظور اتصال‌گیری از الکترود طلا و جلوگیری از اتصال کوتاه شدن افزاره، بخشی از ITO از روی زیر لایه برداشته می‌شود. به این منظور، به جز یک ناحیه به طول ۲۵mm و عرض حدوداً ۳ mm، بقیه نواحی زیرلایه با چسب کالک پوشانده می‌شود. سپس با گوش پاک‌کن حاوی اتانول، ITO از روی زیرلایه برداشته می‌شود. پس از طی فرآیند شستشوی زیرلایه‌ها و خشکسازی با گان نیتروژن، زیرلایه‌ها به محفظه‌ی دستگاه DRIE منتقل شده و به مدت ۵ دقیقه در معرض پلاسمای اکسیژن با توان ۱۰۰W قرار می‌گیرند. سپس SnO_2 سنتز شده به روش هیدروترمال با غلظت ۲۰mg/ml به روش چرخشی، با سرعت ۴۰۰۰ rev/min به مدت ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی شده و بسترها به مدت ۳۰ دقیقه با دمای ۱۵۰°C حرارت داده می‌شوند. آماده‌سازی زیرلایه برای بهبود چسبندگی لایه‌های بعدی، لایه‌های اکسید قلع (SnO_2) به مدت ۱۵ دقیقه در معرض UV-Ozone قرار گرفتند. در ادامه، محلول پروسکایت دوکاتیونه و سه هالیدی MAFAPbIBrCl به روش چرخشی بر روی SnO_2 لایه‌نشانی شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. سپس یک لایه اسپایرو با غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر به روش لایه‌نشانی چرخشی بر روی لایه پروسکایت لایه‌نشانی شد. در نهایت، لایه طلا به ضخامت‌های ۷۰ نانومتر و ۱۷ نانومتر به روش تبخیر فیزیکی (PVD)بر روی لایه Spiro لایه نشانی شد.

مشخصه‌یابی سلول خورشیدی پروسکایتی

نمودار J-V و داده های مستخرج از این نمودار مربوط به این دو افزاره به ترتیب در در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: منحنی J-V سلول خورشیدی پروسکایتی منعطف با ساختار Glass/ITO/SnO_2/MAFAPbIBrCl/Spiro/ Au

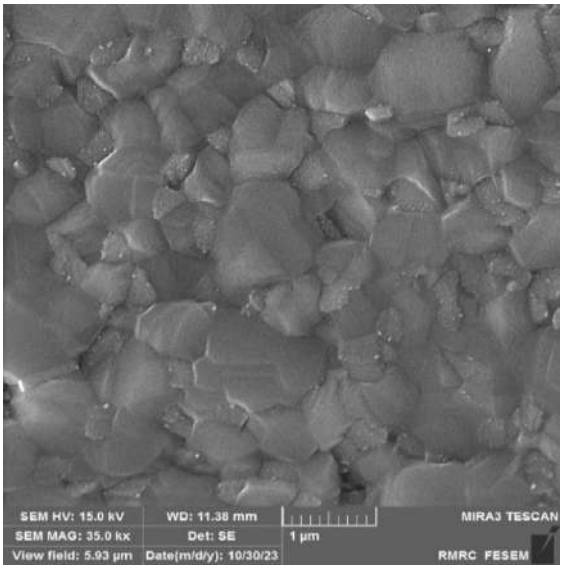
جدول ۱ داده‌های فتوولتائیک مستخرج از منحنی‌های J-V

Device	PCE (%)	FF	V_{OC} (V)	J_{SC} ($mA.cm^{-2}$)
Au (70 nm)	15.31	0.62	0.97	25.28
Au (17 nm)	13.72	0.63	0.91	23.78

نتایج نشان می‌دهد با کاهش ضخامت طلا از ۷۰ به ۱۷ nm ولتاژ مدار باز افزاره از ۰/۹۷ به ۰/۹۱ V کاهش می‌یابد. این می‌تواند به دلیل کاهش اتصال موثر لایه انتقال‌دهنده حفره Spiro با لایه طلا باشد. در گزارش‌ها معمولاً از لایه‌نشانی یک لایه نازک از موادی مانند LiF یا MoO_3 بر روی HTL جهت رفع این مشکل استفاده می‌شود.

همچنین با کاهش ضخامت طلا، جریان اتصال کوتاه افزاره از ۲۵/۲۸ به $mAcm^{-2}$ ۲۳/۷۸ کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه ضخامت لایه رسانا، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است، کاهش J_{sc} بدیهی است. اما از این جهت که هدف از این کار، دستیابی به الکترود نیمه‌شفاف جهت کاربرد در سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه‌شفاف است، کاهش ۵/۹٪ بازده، در قبال افزایش قابل ملاحظه شفافیت الکترود پشتی ناچیز به نظر می‌رسد.

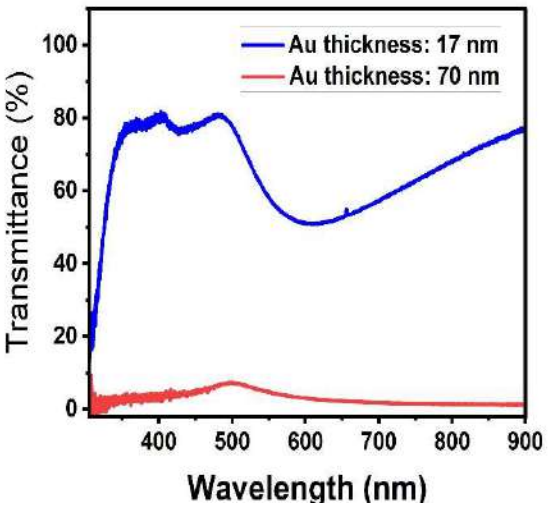
شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) از سطح لایه پروسکایت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لایه پروسکایت که با استفاده از روش لایه‌نشانی چرخشی و بهینه‌سازی با ضد حلال کلروبنزن تهیه شده است، دارای مورفولوژی یکنواخت و بدون حفره های سوزنی است. اندازه دانه‌های پروسکایت در محدوده ۱۱۰۰-۲۰۰ نانومتر قرار دارد که با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌مایزر اندازه‌گیری شده است. اندازه دانه‌های بزرگ‌تر، منجر به کاهش تعداد مرزدانه‌ها و در نتیجه کاهش تلفات بازترکیب حامل‌های بار می‌شود [۴].



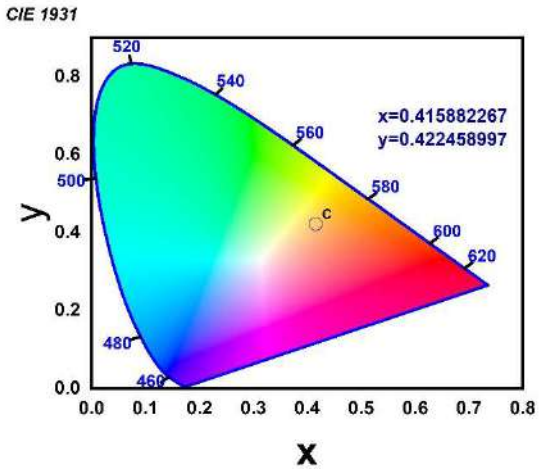
شکل ۲: تصاویر FESEM پروسکایت MAFAPbBrCl لایه‌نشانی شده به روش تک‌مرحله‌ای

مقایسه طیف عبور نور UV-Vis لایه‌های طلا با ضخامت‌های ۷۰ و ۱۷ nm(شکل ۳) نشان می‌دهد افزایش ضخامت طلا از ۱۷nm به ۷۰ nm به طور قابل توجهی عبور نور و در نتیجه شفافیت افزاره را کاهش می‌دهد. این امر به این دلیل است که طلا با ضخامت بالاتر، تمایل بیشتری به بازتاب نور دارد و عبور کمتری از خود نشان می‌دهد.

طیف رنگ پذیری CIE سلول خورشیدی ST-PSC در شکل ۴ نشان داده شده است کاهش ضخامت طلا منجر به رنگ خنثی (نزدیک به وسط طیف CIE) می‌شود [5].



شکل ۳: طیف عبور نور UV-Vis لایه‌های طلا با ضخامت‌های ۷۰ و ۱۷ nm



شکل ۴: طیف رنگ پذیری CIE سلول خورشیدی نیمه شفاف پروسکایتی شامل الکترود طلا با ضخامت ۱۷ nm

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های دستیابی به سلول‌های خورشیدی نیمه‌شفاف، کاهش ضخامت لایه طلا است. لذا در اینجا افزاره‌های ST-PSC با دو ضخامت ۷۰ nm و ۱۷ nm طلا، ساخته شدند. طیف عبور لایه طلا با ضخامت‌های ۷۰ nm و ۱۷ nm نشان می دهد که میزان عبور نور UV-Vis از حدود ۱۰٪ به ۸۰٪ افزایش یافته است. طیف CIE سلول خورشیدی ST-PSC نشان داد کاهش ضخامت طلا منجر به رنگ خنثی (نزدیک به وسط طیف CIE)

می‌شود. با کاهش ضخامت طلا ۷۰ به nm ۱۷ در سلول‌های خورشیدی n-i-p ساخته شده، ولتاژ مدار باز افزاره از ۰/۹۷ به V ۰/۹۱ کاهش می‌یابد. این می‌تواند به دلیل کاهش اتصال موثر لایه انتقال‌دهنده حفره Spiro با لایه طلا باشد. همچنین کاهش ضخامت طلا به ۱۷nm منجر به افزایش شفافیت افزاره و کاهش J_{sc} شده که منجر به افت عملکرد سلول خورشیدی پروسکایتی می‌گردد. اما کاهش ۵/۹٪ بازده، در قبال افزایش قابل ملاحظه شفافیت الکترود پشتی ناچیز به نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

این اثر برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۰۱۳۵۵ تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) انجام شده است.

مرجع‌ها

[۱] Y. Xu et al., "Recent progress of electrode materials for flexible perovskite solar cells," Nano-Micro Letters, vol. 14, no. 1, p. 117, 2022.

[۲] G. Giuliano, A. Bonasera, G. Arrabito, and B. Pignataro, "Semitransparent Perovskite Solar Cells for Building Integration and Tandem Photovoltaics: Design Strategies and Challenges," Solar RRL, vol. 5, no. 12, p. 2100702, 2021,.

[۳] M. Alidaei, V. Ahmadi, S. M. Mousavi, and F. A. Roghabadi, "Stability improvement of perovskite solar cell using photoswitchable and moisture resistant dual-function interfacial layer," Journal of Alloys and Compounds, vol. 903, p. 16389.

[۴] F. Wang et al., "Revealing Size-Dependency of Ionic Liquid to Assist Perovskite Film Formation Mechanism for Efficient and Durable Perovskite Solar Cells," Small Methods, vol. 8, no. 2, p. 2300210, 2024.

[۵] J. Bing, L. G. Caro, H. P .Talathi, N. L. Chang, D. R. Mckenzie, and A. W. Ho-Baillie, "Perovskite solar cells for building integrated photovoltaics—glazing applications," Joule, vol. 6, no. 7, pp. 1446-1474, 2022.

طراحی زیست‌حسگر بلور فوتونیکی برای تشخیص باکتری عامل سیاه‌زخم

سمیه رستمیان[۱]، مهدی سویزی[۱]* و مریم علیان‌نژادی[۱]

[۱] گروه اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده - آب آشامیدنی و نظارت بر حضور باکتری‌های خاص در آن از جمله باکتری عامل سیاه‌زخم برای سلامت جامعه جهانی بسیار مهم است. بنابراین، این مقاله حسگر بلور فوتونیکی یک بعدی مبتنی بر لایه‌های نانوکامپوزیت نقره را برای تشخیص و حسگری این باکتری پیشنهاد و مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مدهای نقص این ساختار پیشنهادی می‌توانند برای تشخیص باکتری باسیلوس آنتراسیس در آب مورد بهربرداری قرار گیرند. با این وجود، حساسیت حسگری و ضریب کیفیت ساختار برای این مدها متفاوت است و با تغییر طول موج مد نقص تغییر می‌کنند. همچنین، بین کمیت‌های عملکردی ساختار و میزان باکتری موجود در آب ارتباطی وجود دارد و حساسیت میانگین ساختار زیست‌حسگر در تشخیص باکتری تقریبا ۹۰۰ نانومتر بر واحد ضریب شکست می‌باشد که نشان می‌دهد این حسگر گزینه مناسبی در تشخیص آب آلوده به باکتری مولد سیاه‌زخم است.

کلیدواژه - بلور فوتونیکی یک بعدی، تشخیص آب آلوده، حسگر نوری، زیست حسگر، سلامت جهانی.

Design of a Photonic Crystal Biosensor for the Detection of Anthrax-Causing Bacteria

Somayyeh Rostamian[1], Sovizi, Mahdi*[1], and Aliannezhadi, Maryam[1]

Faculty of Physics, Semnan University, PO Box: 35195-363, Semnan, Iran

s_rostamyan842@semnan.ac.ir , msovizi@semnana.ac.ir , m_aliannezhadi@semnan.ac.ir

Abstract- The drinking water monitoring for specific bacterial contaminants, including those responsible for anthrax, is paramount to the health and safety of the global community. This study proposes and examines a one-dimensional photonic crystal sensor including silver nanocomposite layers to detect and sense Bacillus anthracis bacteria in water. The results indicate that the defect modes of the proposed sensor structure can be exploited to identify Bacillus anthracis in water. However, the sensitivity and quality factor of the sensor are different for these defect modes and they change by the wavelength of the defect modes. Additionally, a correlation exists between the functional parameters of the structure and the concentration of bacteria in the water. Notably, the average sensitivity of the biosensor in detecting bacterial presence is approximately 900 nm/RIU, indicating the proposed can be a promising candidate for detecting water contaminated with anthrax-causing bacteria.

Keywords: Contaminated water detection, Global health, One-dimensional photonic crystal, Optical sensor, biosensor.

مقدمه

سیاه‌زخم بیماری عفونی جدی‌ای است که هم انسان و هم حیوانات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این بیماری از طریق باکتری باسیلوس آنتراسیس منتقل می‌شود و زمانی که در منابع آبی وجود داشته باشد، تهدید قابل توجهی برای سلامت عمومی است [۱, ۲]. فرد می‌تواند از طریق نوشیدن یا تماس با آب آلوده در معرض این بیماری قرار گیرد. به طور کلی، باسیلوس آنتراسیس به دلیل دوام در محیط و قابلیت انتشار گسترده در زمره عوامل بالقوه بیوتروریسم طبقه‌بندی می‌شود و نظارت بر منابع آب برای این پاتوژن برای امنیت ملی و امنیت عمومی ضروری است. علاوه‌براین، بررسی روند تغییرات این باکتری و تشخیص زود هنگام آن می‌تواند به سلامت جهانی کمک کند. وجود این باکتری در آب در صورت عدم تشخیص به موقع و اقدام برای تصفیه آب می‌تواند شیوع این بیماری را در جامعه با ورود مستقیم یا استفاده از منابع آب آلوده برای دامپروری تهدید کند و با نظارت بر آب می‌توان به جلوگیری از شیوع این بیماری و نیز پیامدهای اقتصادی، بهداشتی و آسیب‌های جدی به بخش کشاورزی و دامپزشکی کمک کرد. اهمیت این موضوع به حدی است که کشورها چارچوب‌های خاصی دارند که بر حضور پاتوژن‌های خاص در آب آشامیدنی نظارتی دارند [۳].

روش‌های متداول فعلی برای بررسی آب دارای محدودیت‌های جدی در بخش سرعت بررسی و نیز حساسیت می‌باشند. از طرفی بلورهای فوتونی با ویژگی‌های نوری استثنایی که دارند، امکان کوک‌کردن بازه عملکردی حسگر را در ناحیه دلخواه فراهم می‌کند و انقلابی در حوزه حسگرهای نوری ایجاد کرده‌اند [۴, ۵]. در این راستا، بلورهای فوتونیکی دو بعدی برای تشخیص آب آلوده به باکتری مطرح و مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶, ۷]. همچنین، حسگر زیستی بلور فوتونیکی حلقوی برای تشخیص باکتری باسیلوس آنتراسیس پیشنهاد و به حساسیت ۴۷۲/۸ nm/nmol/L دست یافتند [۸].

چالش‌های کنونی مرتبط با آلودگی آب به دلیل خطرات جدی برای سلامت انسان و تنوع زیستی نیاز به تحقیقات جدی و ارائه راهکار مناسب دارد. بنابراین، در این مقاله حسگر بلور فوتونی یک بعدی مبتنی بر نانوکامپوزیت نقره برای تشخیص سلامت آب با انگیزه غلبه بر این محدودیت‌ها و تشخیص فوری و افزایش حساسیت حسگری پیشنهاد و مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که حسگر پیشنهادی می‌تواند به خوبی هدف مورد نظر را تامین نماید.

مبانی نظری

در شکل ۱ ساختار پیشنهادی نشان داده شده است. این ساختار شامل یک بلور فوتونیکی یک بعدی و یک لایه نقص است که از دو طرف توسط دو لایه نانوکامپوزیت نقره-سیلیکا احاطه شده است. فرض شده است ماده حسگری حجم لایه نقص را پر کرده است. در این پژوهش از مدل ماتریسی برای محاسبه بازتاب و عبور موج تکفام با قطبش الکتریکی عرضی از لایه‌های نازک اپتیکی استفاده شده است که به طور مختصر بیان خواهد شد. در تمامی محاسبات پاشندگی مواد به کار رفته در ساخت بلور فوتونیکی منظور شده است و ضرایب شکست لایه‌های نانوکامپوزیت و آنالیت (آب آلوده به عامل سیاه‌زخم) از مدل ماکسول-گارنت محاسبه شده است.

در مدل به کار رفته ماتریس انتقال هر لایه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \cos\delta_i & -\dfrac{i\sin\delta_i}{p_i} \\ -ip_i\sin\delta_i & \cos\delta_i \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} p_i = n_i\cos\theta_i \\ \delta_i = k_i d_i \cos\theta_i \end{matrix} \qquad (۱)$$

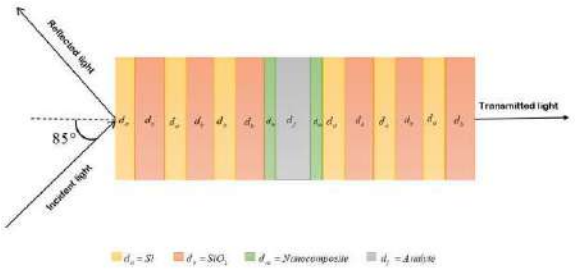
که n_i ضریب شکست لایه شماره i، θ_i زاویه پرتو نسبت به خط عمود بر سطح، d_i ضخامت لایه و k_i اندازه بردار موج است. ماتریس انتقال کل ساختار از حاصل ضرب ماتریس تک‌تک لایه‌ها محاسبه می‌شود. سپس ضرایب عبور و انعکاس از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R = S'_{0x} / S_{0x}, \quad T = S_{tx} / S_{0x} \qquad (۲)$$

کمیت‌های S_{0x}، S'_{0x} و S_{tx} مولفه‌های بردار پوئینتیگ در جهت عمود بر لایه‌ها به ترتیب مربوط به موج تابشی، موج انعکاسی و موج عبوری هستند. پس از محاسبه طیف عبور، مشخصه‌های مدهای نقص که مدهای تشدیدی در بازه ممنوعه فوتونیکی هستند به طور کامل محاسبه شده است و با استفاده از این مشخصه‌ها قادریم کمیت‌های زیر را محاسبه کنیم:

$$S = \frac{\delta\lambda_r}{\delta n}, \quad Q = \frac{\lambda_r}{FWHM} \qquad (۳)$$

که S حساسیت، Q ضریب کیفیت، λ_r طول موج مد نقص، n ضریب شکست لایه نقص و FWHM تمام پهنا در نصف ارتفاع بیشینه مربوط به قله تشدید هستند.

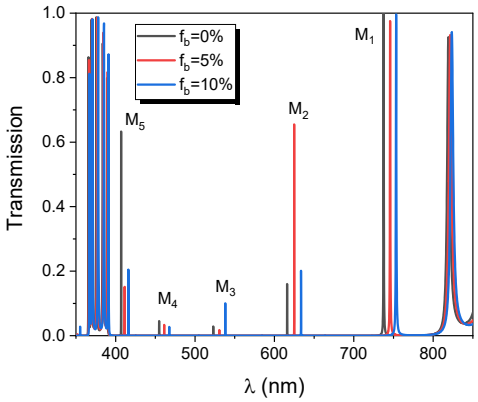


شکل ۱- ساختار حسگر زیستی پیشنهادی مبتنی بر بلور فوتونیکی یک بعدی حاوی دو لایه نانوکامپوزیت نقره.

نتایج و دستاوردها

طیف‌های عبور حسگر بلور فوتونیکی مبتنی بر لایه نانوکامپوزیت نقره به ازای زاویه فرود ۸۵ درجه، ضخامت‌های لایه‌های سیلیکون و سیلیکا ۳۴/۱ و ۹۴/۲ نانومتر و ضخامت لایه نقص برابر با ۱۳ برابر دوره تناوب به ازای شرایط آب سالم و آب حاوی باکتری در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید، حسگر دارای نوار ممنوعه فوتونیکی وسیع در بازه ۳۹۰ تا ۸۰۰ نانومتر است و مدهای نقص مختلف در این ناحیه ظاهر شده است که با M1 تا M5 در شکل نامگذاری شده است. مقایسه مدهای نقص مربوط به آب سالم و آب‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد باکتری عامل سیاه‌زخم نشان می‌دهد که حضور باکتری موجب انتقال به قرمز در طول موج مد نقص می‌شود و بنابراین این مدها قابلیت بهره‌برداری در فرایند حسگری را دارند.

حساسیت و ضریب کیفیت (Q) دو کمیت عملکردی مهم برای حسگرهای نوری می‌باشند که برای مدهای مختلف در شکل ۲ متفاوت می‌باشند. مشخصه‌های مدهای مختلف حسگر پیشنهادی به ازای حضور ۵٪ باکتری عامل سیاه‌زخم در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید، بکارگیری مدهای M_1 تا M_5 باعث تغییر حساسیت و ضریب Q می‌شود (جدول ۱). با توجه به این مطلب که بیشترین ضریب حساسیت و ضریب Q قابل قبول در مد M_2 به دست می‌آید، بنابراین بهره‌برداری از مد M_2 برای حسگری این باکتری مناسب‌تر است و بررسی‌های بعدی بر روی این مد انجام خواهد شد.

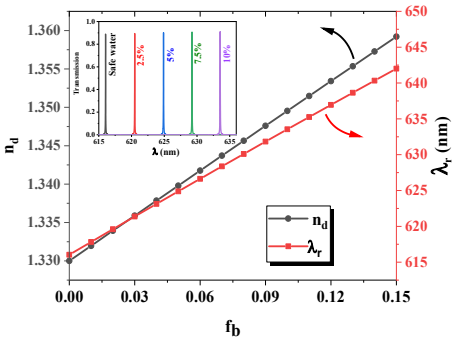


شکل ۲- طیف عبوری از حسگر زیستی در بازه نوار ممنوعه فوتونیکی به ازای مقادیر مختلف درصد حضور باکتری در آب. مدهای نقص در داخل نوار ممنوعه فوتونیکی مشخص شده‌اند.

جدول ۱: مشخصه‌های عملکردی حسگر نوری در تشخیص باکتری مولد سیاه‌زخم در آب به ازای حضور ۵ درصد باکتری در آب.

مد	$\lambda_r(nm)$	$\frac{S}{nm/RIU}$	$FWHM$	Q
M_5	۴۱۱/۴	۴۶۹/۰۱	۰/۰۵۹۵	۶۹۱۳/۴
M_4	۴۶۱/۱	۶۴۸/۸۳	۰/۰۷۵۴	۶۱۱۵/۹
M_3	۵۳۰/۷	۷۷۵/۶۴	۰/۰۱۳۶	۳۹۰۱۱/۹
M_2	۶۲۴/۹	۸۹۶/۰۳	۰/۰۳۹۳	۱۵۹۰۰/۵
M_1	۷۴۵/۸	۸۰۴/۴۹	۰/۶۰۴	۱۲۳۴/۷

در شکل ۳ نمودار ضریب شکست آنالیت و طول موج تشدید مد M2 به ازای درصدهای مختلف حضور باکتری در آب ارائه شده است. همچنین، برای وضوح بیشتر، طیف عبور این مد نیز به ازای درصدهای مختلف حضور باکتری در داخل شکل ۳ آورده شده است. نتایج موید افزایش ضریب شکست و نیز انتقال به قرمز طول موج M2 با افزایش میزان باکتری باسیلوس آنتراسیس می‌شود.

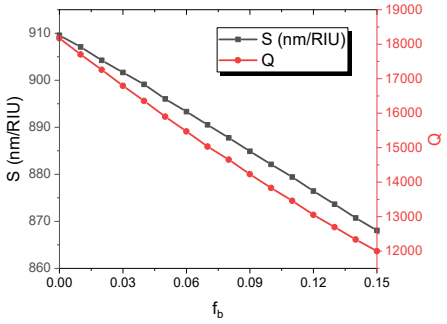


شکل ۳- ضریب شکست لایه نقص و طول موج تشدید بر حسب افزایش درصد حضور باکتری در آب.

بررسی حساسیت و ضریب کیفیت ساختار به ازای مقادیر مختلف باکتری باسیلوس آنتراسیس تا ۱۵ درصد در شکل ۴ نشان می‌دهد که حساسیت و ضریب کیفیت حسگر به ازای مد M2 با افزایش میزان حضور باکتری کاهش می‌یابد و به ترتیب از ۹۱۰ تا ۸۶۸ nm/RIU و از ۱۸۱۷۲ تا ۱۲۰۰۰ تغییر می‌کند با این وجود این مقادیر همچنان مقادیر مناسبی برای زیست‌حسگری می‌باشند.

نتیجه‌گیری

تشخیص به موقع باسیلوس آنتراسیس در آب برای حفاظت از سلامت عمومی، اطمینان از ایمنی محیط زیست، رعایت مقررات، جلوگیری از شیوع بیماری و رسیدگی به نگرانی‌های امنیت زیستی ضروری است. چرا که این باکتری عاملِ سیاه‌زخم است و حضور آن در آب می‌تواند آسیب‌های جدی‌ای بر سلامت انسان‌ها، مشکلات اقتصادی در بخش کشاورزی و دامپزشکی و... به دنبال داشته باشد. نتایج موید قابلیت بکارگیری ساختار پیشنهادی در تشخیص آب آلوده به باکتری سیاه‌زخم است و بررسی مد با بیشترین حساسیت در بازه آب سالم تا ۱۵ درصد باکتری باسیلوس آنتراسیس نشان می‌دهد که حساسیت میانگین حسگر پیشنهادی در بازه مورد بررسی برابر با ۸۹۹/۱ نانومتر بر واحد ضریب شکست است.



شکل ۴- حساسیت و ضریب کیفیت حسگر زیستی بر حسب افزایش درصد حضور باکتری در آب. حساسیت میانگین در بازه مورد بررسی برابر با ۸۹۹/۱ نانومتر بر واحد ضریب شکست است.

مرجع‌ها

[1] M. Ortatatli, E. Saatci, Z. Kilic, and L. Kenar, "Development of an amperometric biosensor for the detection of Bacillus anthracis spores," Diagnostic Microbiology and Infectious Disease, vol. 110, no. 3, p. 116473, 2024.

[2] M. Pohanka, "Biosensors and Bioassays for the Medical Detection of Bacillus Anthracis and Diagnosis of Anthrax," Current Medicinal Chemistry, 2024.

[3] F. Kebaili, A. Harhouz, and A. Hocini, "Modeling and Simulation of Photonic Crystal Sensor for Drinking Water Quality Monitoring," Progress in Electromagnetics Research C, vol. 140, 2024.

[4] A. Hocini, R. Moukhtari, D. Khedrouche, A. Kahlouche, and M. Zamani, "Magneto-photonic crystal microcavities based on magnetic nanoparticles embedded in Silica matrix," Optics Communications, vol. 384, pp. 111-117, 2017.

[5] M. Sovizi and M. Aliannezhadi, "Highly sensitive asymmetric and symmetric cancer sensors with ultra-high-quality factor and resolution power," Scientific Reports, vol. 13, no. 1, p. 12251, 2023.

[6] R. B. Gowda, T. Vilas, G. Komal, V. Badageri, P. Sharan, and C. Rodriguez, "Bacterial detection in contaminated water using a photonic crystal sensor," in 2023 International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES), 2023: IEEE, pp. 1-5.

[7] D. Gowdhami and V. Balaji, "Design of a 2D Photonic Crystal Bacterial Biosensor," in 2023 IEEE Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP), 2023: IEEE, pp. 1-3.

[8] S. Gandhi and S. K. Awasthi, "Detection of wide variety of pathogens by using one-dimensional biosensor based on annular photonic crystal," Materials Today: Proceedings, 2023.

بهبود کیفیت تصاویر تاریک مبتنی بر یادگیری عمیق

رضا محمدی، حانیه تقی زاده شیویاری، زهرا کشمیر، خسرو معدنی پور*

دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

آزمایشگاه اندازه گیری اپتیکی،دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده - تصویربرداری در شرایط نور کم چالش‌های قابل توجهی در زمینه‌های مختلف از جمله ناوبری وسایل نقلیه خودران ، نظارت و عکاسی به همراه دارد. روشهای سنتی تقویت تصویر، اغلب با تقویت نویز و از دست دادن جزئیات همراه است. در این مقاله یک روش مبتنی بر یادگیری عمیق با استفاده از معماری شبکه خودرمزگذار U-شکل،برای بهبود تصاویر تاریک معرفی می‌شود. مدل پیشنهادی، روشنایی و وضوح تصویر را بهبود می‌بخشد. ارزیابی‌های تجربی که انجام شده است برتری مدل را نسبت به روش‌های معمول نظیر تصحیح گاما نشان می‌دهد و پتانسیل آن را برای کاربردهای واقعی برجسته می‌کند.

کلیدواژه: پردازش تصویر، شبکه خودرمزگذار، هوش مصنوعی، یادگیری عمیق

Enhancement of Dark Images Based on Deep Learning

Reza Mohammadi, Hanieh Taghizadeh Shyvyari, Zahra Keshmir, Khosro Madanipour*

Department of Physics, Amirkabir University of Technology

Optical Measurement Laboratory, Amirkabir University of Technology

rezamoh360@aut.ac.ir, haniehtaghizadeh@aut.ac.ir, zahrakeshmir@aut.ac.ir ,madanipour@aut.ac.ir

Abstract - Imaging in low-light conditions poses significant challenges in various fields, including autonomous vehicle navigation, surveillance, and photography. Traditional image enhancement methods, often come with noise amplification and loss of details. In this paper, a deep learning-based method using a U-shaped autoencoder network architecture is introduced to enhance dark images. The proposed model improves the brightness and clarity of images. Experimental evaluations demonstrate the superiority of the model compared to conventional methods such as gamma correction, highlighting its potential for real-world applications.

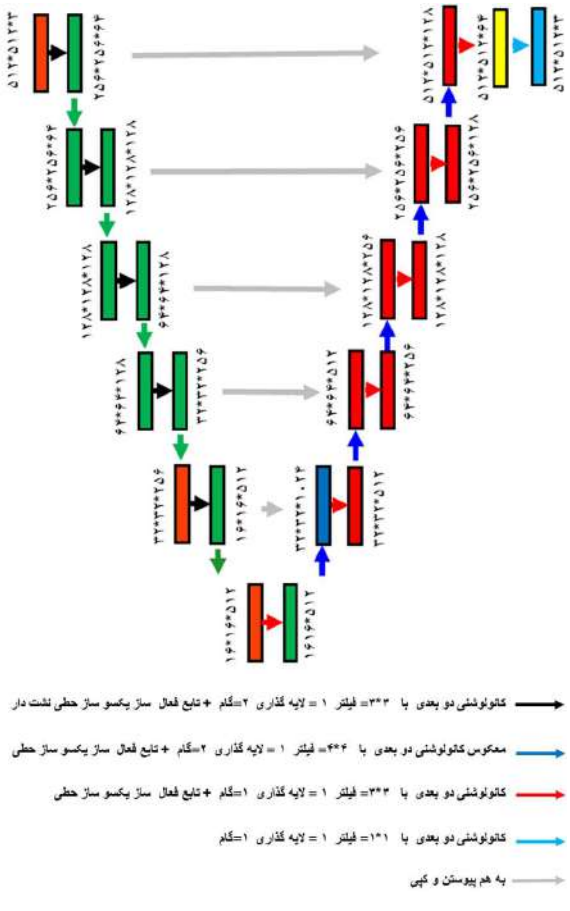
Keywors: Image processing, Autoencoder, Artificial intelligence,Deep learning

مقدمه

تصویربرداری در شرایط کم نور یک چالش قابل توجه در زمینه‌های مختلف فناوری و علمی است. وسایل نقلیه خودران، سیستم‌های نظارتی و عکاسی ،تحت تأثیر کیفیت پایین تصاویر در محیط‌های کم نوری که شدت روشنایی پایین است و باعث کاهش کیفیت و جزئیات تصاویر دیجیتال می شود قرار می‌گیرند می توان از تکنیک‌های بهبود تصویر سنتی مانند تصحیح گاما که روشنایی تصویر را با اعمال یک تبدیل غیرخطی تنظیم می‌کند این فرآیند شامل بالا بردن مقدار شدت هر پیکسل به توان یک مقدار گاما انجام می‌شود که نواحی تاریک را روشن‌تر و نواحی روشن را تیره‌تر می‌کند و در نتیجه کیفیت بصری کلی تصویر را بهبود می‌بخشد استفاده کرد اما اغلب در حل پیچیدگی‌های تصاویر تاریک ناموفق می‌مانند[۱]. این روش‌ها باعث تشدید نویز می‌شوند و جزئیات تصویر را حفظ نمی‌کنند. در نتیجه، نیاز روزافزونی به تکنیک‌های پیشرفته‌تر و قابل اطمینان تر برای بهبود کیفیت تصاویر کم نور وجود دارد. ظهور یادگیری عمیق راه‌های جدیدی را برای مقابله با این چالش‌ها گشوده است. به‌ویژه، شبکه‌های عصبی کانولوشنی و شبکه های خودرمزگذار ،به دلیل توانایی آن‌ها در یادگیری الگوهای پیچیده و نگاشت‌ها از مجموعه داده‌های بزرگ، در وظایف مختلف پردازش تصویر بسیار موفق عمل کرده‌اند[۲]. در این مقاله یک مدل خودرمزگذار U-شکل برای بهبود کیفیت تصاویری که در شرایط کم‌نور ثبت شده‌اند، ارائه گردیده است[۲-۴]. این روش یک راه‌حل قوی برای بهبود تصاویر تاریک است که منجر به افزایش کارایی و قابلیت اطمینان نتایج می‌شود. همچنین روش تصحیح گاما که روشی کلاسیکی است بر روی تصاویر اعمال شده و نتایج با خروجی های مدل یادگیری عمیق مقایسه گردیده است.

مدل خودرمزگذار U – شکل

مدل خودرمزگذار یوشکل یک مدل بدون نظارت است که برای بهبود تصاویر کم‌نور طراحی شده است، در شکل ۱ قابل مشاهده است. قسمت رمزگذار با معماری خود لایه های فشرده ساز را به نفع لایه‌های کانولوشنی با گام ۲ در رمزگذار حذف می‌کند. رمزگذار از لایه‌های کانولوشنی با اندازه فیلتر ۳، گام ۲ و لایه گذاریه ۱ و از تابع فعال‌ساز یکسوساز خطی نشت دار استفاده می‌کند. قسمت رمزگشا از لایه‌های کانولوشنی معکوس استفاده می‌کند که همان گام و لایه گذاری را حفظ می‌کند اما با اندازه فیلتر ۴ و از تابع فعال‌ساز یکسوساز خطی برای بازسازی تصویر ورودی استفاده می‌کند. اتصالات پرش بین لایه‌های متناظر رمزگذار و رمزگشا ادغام می‌شوند تا ویژگی‌های وضوح بالا حفظ شوند و اطمینان حاصل شود. این مدل به شکلی طراحی شده که اندازه خروجی با اندازه ورودی یکسان باشد. در نهایت این معماری برای حفظ و بهبود پایداری فرایندهای استخراج و بازسازی ویژگی‌ها طراحی شده است که به‌طور خاص برای بهبود کیفیت تصاویر ثبت شده در شرایط کم‌نور مناسب است.



شکل۱- معماری رمزگذار خودرمزگذار یوشکل

فرآیند آموزش و اعتبار سنجی

این مدل طبق چارچوب pytorch پیاده‌سازی شده است که می‌توان از انعطاف‌پذیری قدرت آن برای یادگیری عمیق بهره برد. از

مجموعه داده LOL[1]، متشکل از ۴۸۵ دیتا اموزش و۱۵ دیتا ازمون مورد استفاده در کار وی و همکارانش[۵] برای فرآیند آموزش و ازمون مدل استفاده شد که شامل تصاویر کم نور و جفت شده با تصاویر پرنور متناظرشان است. این مجموعه داده شامل طیف وسیعی از صحنه‌های ثبت شده در شرایط مختلف نوری است و از این رو، پایداری و قابلیت تعمیم مدل را در محیط‌های مختلف تضمین می‌کند.

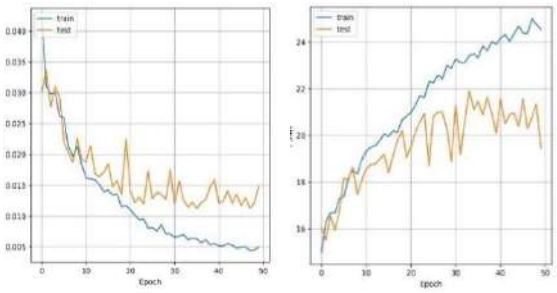
آموزش مدل شامل استفاده از یک سیستم مجهز به یک کارت گرافیک NVIDIA GTX 1050 و فرایند اموزش ۲ ساعت و ۲۰ دقیقه بوده است. اندازه دسته ۱ و نرخ یادگیری۰،۰۰۰۱تنظیم گردید تا سرعت همگرایی و پایداری فرآیند آموزش را متعادل کند.

در فرآیند آموزش از تابع هزینه میانگین مربعات خطا (MSE)[2] استفاده شده است که MSE های بین مقادیر پیش‌بینی شده I و واقعی پیکسل‌ها تصاویر K را اندازه‌گیری می‌کند. این تابع هزینه با استفاده از بهینه‌ساز Adam بهینه‌سازی شده است [۶].

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{mn}\sum_{j=0}^{n-1}\sum_{i=0}^{m-1}[I(i,j)-k(i,j)] \quad (1)$$

$$\mathrm{PSNR} = 20\log_{10}(255) - 10\log_{10}(\mathrm{MSE}) \quad (2)$$

برای ارزیابی عملکرد مدل، ازMSE و قله سیگنال به نویز (PSNR)[3] به عنوان معیار استفاده شده است و مقدار انها بر روی تمام دیتا ست که معادل یک Epoch است و در تصویر ۲ قابل مشاهده است رسم شده است . قله PSNR معیاری پرکاربرد است که کیفیت تصاویر بازسازی شده را با با تصاویر معیار مقایسه می‌کند. مقادیر بالاتر PSNR نشان‌دهنده کیفیت بهتر بازیابی تصاویر است. مدل ما به حداکثر PSNR حدود ۲۲ دست یافت که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در کیفیت تصویر است.



الف ب

شکل ۲ -الف نموداری مقدار خطای میانگین مربعات از مجموعه داده های آموزشی و آزمایشی در هر epoch و ب نمودار پیک سیگنال به نویز مجموعه داده های آموزشی و آزمایشی در هر epoch.

نتایج آموزش و آزمایش، که در شکل ۲ نشان داده شده است، توانایی مدل را در بهبود مؤثر تصاویر کم نور نشان می‌دهد. این عملکرد تأثیرگذاری تنظیمات آموزشی ما و پایداری خودرمزگذار یوشکل را در بهبود دید و جزئیات تصویر در شرایط کم نور را تصدیق می‌کند.

کار ها ونتایج تجربی

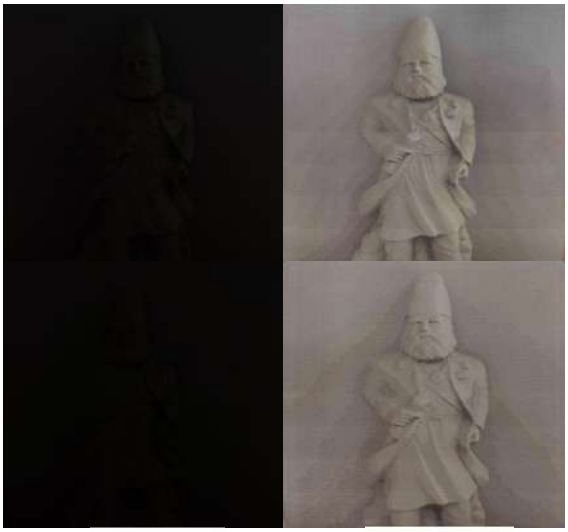
در بخش تجربی این کار، مدل خودرمزگذار یوشکل بر روی مجموعه‌ای از تصاویر کم نور مجسمه امیرکبیر،اعمال گردید. مدل به طور مؤثری شرایط نورپردازی در این تصاویر را بهبود بخشید و جزئیاتی را آشکار کرد که قبلاً به دلیل نورپردازی ضعیف پنهان بودند.

با تجزیه و تحلیل تصویر حاصل در شکل ۳، واضح است که مدل ویژگی‌های با وضوح بالا را حفظ کرده و در عین حال دید را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده است و روش تصحیح گاما که یک روش کلاسیک برای بهبود روشنایی تصاویر است، برای مقایسه مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۴ قابل مشاهده است.

1 LOw-Light

2 Mean Squared Error

3 Peak Signal to Noise Ratio



الف ب

شکل ۳- الف تصاویر در شرایط کم نور تصاویر ب تصاویری بهبود یافته با مدل رمزگذار -Uشکل



الف ب

شکل ۴- الف تصاویر در شرایط کم نور و ب تصاویر بهبود یافته با روش تصحیح گاما.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل خودرمزگذار برای بهبود تصاویر تاریک معرفی شد که چالش‌های تصویربرداری در شرایط کم نور را برطرف می‌کند. این مدل بهبود قابل توجهی در روشنایی و وضوح تصویر به دست آورد. همچنین با استفاده از یک مجموعه داده متنوع‌تر و با کیفیت‌تر، نتایج می‌توانند بهبود بیشتری بیابند، زیرا مدل بر روی طیف وسیعی ازسناریوها و شرایط نورپردازی آموزش داده خواهد شد و منجر به عملکرد بهتری خواهد شد.

مراجع

[1] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, Digital Image Processing, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall(2006).

[2] Hinton, Geoffrey E., and Ruslan R. Salakhutdinov. "Reducing the dimensionality of data with neural networks." science 313, no. 5786 (2006): 504-507.

[3] Wu, Jianxin. "Introduction to convolutional neural networks." National Key Lab for Novel Software Technology. Nanjing University. China 5, no. 23 (2017): 495.

[4] Ronneberger, Olaf, Philipp Fischer, and Thomas Brox. "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation." In Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18, pp. 234-241. Springer International Publishing, 2015.

[5] Wei, Chen, Wenjing Wang, Wenhan Yang, and Jiaying Liu. "Deep retinex decomposition for low-light enhancement." arXiv preprint arXiv:1808.04560 (2018).

[6] Kingma, Diederik P. "Adam: A method for stochastic optimization." arXiv preprint arXiv:1412.6980 (2014).