بیست و ششمین کنفرانس اپتیک
و فوتونیک ایران و دوازدهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

ابرجاذب پلاسمونیک مرئی بدون نیاز به لیتوگرافی بر پایه‌ی لایه‌ی نانوجزیره‌ی نقره

فاطمه حبیبی مقدم[1]، حسین مهرزاد[2]، افشان شیرکوند[3,4] ، عزالدین مهاجرانی[5]، محمد محمدی مسعودی[6]،

1, 2, 3,5. آزمایشگاه فوتونیک مواد آلی و پلیمرها، پژوهشکده‌ی لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
4 مرکز تحقیقات لیزر پزشکی جهاد علوم پزشکی تهران
6. دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
Email: f.habibimoghaddam@mail.sbu.ac.ir, h_mehrzad@sbu.ac.ir, a_shirkavand@sbu.ac.ir, e-mohajerani@sbu.ac.ir, Mo.masoudi@ut.ac.ir

چکیده – در این مقاله با بهره‌گیری از روش لایه‌نشانی تبخیرحرارتی، یک ساختار ابرجاذب بر پایه‌ی تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده، شامل فلز-دی‌الکتریک-لایه‌ی نانو جزیره‌ی فلزی طراحی و ساخته شده است. نتایج تحقیق جذب بسیار بالا با پهنای طیفی زیاد ساختار ابرجاذب را نشان می‌دهد. همچنین، حساسیت ساختار نسبت به عوامل محیطی به عنوان سنسور ضریب‌شکست بررسی شده است. از ویژگی‌های این ساختار به عنوان سنسور، تغییر رنگ قابل مشاهده با چشم هنگام تغییر ضریب‌شکست محیط اطراف است.

کلید واژه: جذب، تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده، پلاسمونیک، ابرجاذب

Lithography-free visible plasmonic super absorber based on Ag nano-island layer

Fatemeh Habibimoghaddam[1], Hossein Mehrzad[2], Afshan Shirkavand[3, 4], Ezeddin Mohajerani[5,*] **, Mohammad Mohammadimasoud[6]**

1, 2, 3, 5. POMP Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
5. MLRC, ACECR, Tehran, Iran
6. Faculty of New Sciences and Technologies, Tehran University, Tehran, Iran
*Corresponding author

Abstract- In this paper using the vapor deposition method, a super absorbing structure based on localized surface plasmon resonance (LSPR), comprised of metal/dielectric/metal nano-island (NI) layer is designed and fabricated. The results of this research demonstrate high wide-band absorption of this super absorbing structure. Also, the sensitivity of the structure as a sensor of the refractive index with respect to the surrounding medium was investigated. One of the properties of this sensor is the color change that is observable with the eye when the refractive index of the surrounding medium is changed.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

Keywords: Absorption, Localized Surface Plasmon Resonance, Plasmonic, Super absorber

مقدمه:

پلاسمونیک، به خاطر کاربردهای فراوان و همچنین خواص اپتیکی شگفت‌انگیزِ نانوساختارهای فلزی از جمله، جذب، پراکندگی، افزایش میدان‌محلی مورد توجه تحقیقات زیادی قرار گرفته‌است [۱, ۲].

پلاسمون‌های‌سطحی SPs (نوسان گروهی الکترون‌های رسانش در مرز فلز-دی‌الکتریک) معمولاً به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: پلاسمون‌های پلاریتون سطحی (پلاسمون‌های سطحی انتشاری) SPPs و پلاسمون‌های سطحی جایگزیده (پلاسمون‌های سطحی که اطراف نانوذره و در یک محل نوسان می‌کنند) LSPs. تحریک SPs توسط تابش‌الکترومغناطیسی منجر به ایجاد رزونانس پلاسمون‌سطحی SPR، و در مورد LSPs منجر به ایجاد LSPR می‌شود[۳]. LSPR به شدت به اندازه، شکل و تغییر دی‌الکتریک محیط اطراف نانوساختار بستگی دارد. این نوع وابستگی به مواد اطراف آن را برای کاربردهای حسگری مناسب می‌کند [۴, ۵].

در کاربردهای عملی، تلفات در نانوساختارهای فلزی اجتناب‌ناپذیر است. در فراماوادِ جاذب‌کامل از تلفات به عنوان یک مزیت استفاده می‌شود، و ایده‌ی اصلی آن به حداقل رساندن بازتاب از طریق انطباق امپدانس و به طور همزمان حذف ضریب‌تراگسیل با ماکزیمم‌کردن اتلاف در فراماواد است [۵].

فراماواد جاذب، اولین بار در سال ۲۰۰۸ توسط لاندی و همکاران به طور تجربی اثبات شد، و به خاطر توانایی در جذب نور مورد توجه تحقیقات وسیعی قرار گرفت. رایج‌ترین طراحی برای فراماواد جاذب بر اساس ساختار سه لایه‌ای شامل فلز-عایق-فلز MIM می‌باشد [۶].

اخیراً فراماواد جاذب پلاسمونیک به خاطر خواص جذب عالی و تنظیم‌پذیر در ناحیه‌ی مرئی به طور وسیعی در حوزه‌ی تبدیل انرژی‌خورشیدی، و سنسورهای پلاسمونیک استفاده می‌شوند و به سرعت در حال توسعه هستند [۷].

به منظور دستیابی به فرکانس‌های مرئی، نانو ذرات لایه‌ی بالایی باید اندازه‌ی کمتر از ۱۰۰nm داشته باشند. چنین ساختار ظریفی می‌تواند توسط لیتوگرافی باریکه‌ی الکترونی حاصل شود، اما با توجه به تکنولوژی‌های امروزی اندازه‌ی نمونه‌ی پایانی محدود به کمتر از ۱mm می‌شود که تولید انبوه آن را با مشکل روبرو می‌کند [۸].

ما در اینجا از روش لایه‌نشانی مستقیم فیلم جزیره‌ای فلزی برای ساخت نانوذرات استفاده کردیم، و یک ابرجاذب بدون لیتوگرافی که در فرکانس مرئی کار می‌کند را گزارش دادیم. همچنین حساسیت ساختار را نسبت به محیط دی‌الکتریک اطراف به عنوان سنسور ضریب‌شکست بررسی کردیم.

روش و نتایج آزمایشگاهی:

ابتدا سه لایه، یعنی ۱۷۰nm نقره به عنوان بازتابنده به روش تبخیر حرارتی، ۱۵nm عایق SiO_2 (به روش تبخیر با تفنگ‌الکترونی) و ۷nm نقره (به روش تبخیر حرارتی) روی زیر لایه‌ی شیشه لایه‌نشانی شد. سپس در محفظه‌ی گاز آرگون به مدت ۲ دقیقه در دمای ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس روی هات‌پلیت حرارت داده‌شد. طی این عملیاتِ‌حرارتی نانوجزیره‌های پیوسته از هم جدا شده، و نانوذره‌ها شکل می‌گیرند [۹].

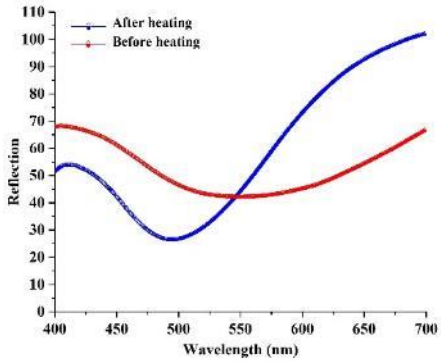
با این کار میزان جذب و حساسیت نسبت به ضریب شکست افزایش خواهد یافت. ساختار شماتیک نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه طیف بازتاب نمونه قبل و بعد از حرارت‌دهی در زاویه‌ی عمود با استفاده از فیبر بازتابی و طیف‌سنج Ocian Optic HR4000 گرفته شد. همانطور که درشکل ۲ مشخص است، طیف بازتاب نمونه بعد از حرارت‌دهی به سمت طول موج آبی جابجا شده است و پهنای طیف نیز کمتر شده است، که این امر نشان دهنده‌ی شکل‌گیری نانوجزیره‌های نقره می‌باشد.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

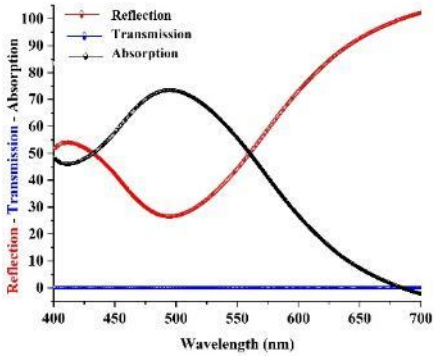
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

همچنین طیف جذب، بازتاب، و عبور ساختار ابرجاذب بعد از حرارت‌دهی در شکل ۳ نشان داده شده است، که جذب بالایی را، در حدود ۷۵٪، نشان می‌دهد. برای مطالعه‌ی وابستگی موقعیت طیفی این جذب به محیط پیرامون روی سطح نمونه با حلال استون مرطوب شد. همانگونه که در شکل ۴ پیداست پیک جذب ساختار به سمت طول موج قرمز جابجا شده و پهن‌تر شده است، طوری که منجر به تغییر رنگ قابل مشاهده با چشم می‌شود.

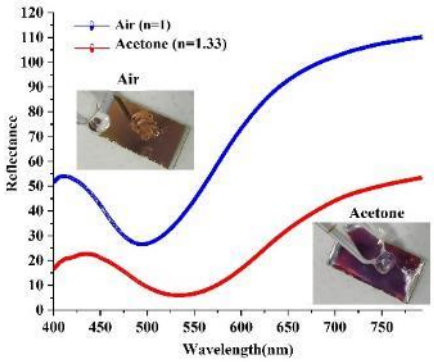
شکل ۱: ساختار شماتیک نمونه.



شکل ۲: طیف بازتاب ساختار قبل و بعد از حرارت‌دهی.



شکل ۳: طیف جذب، بازتاب، عبور ساختار ابرجاذب.



شکل ۴: طیف بازتاب ابرجاذب قبل و بعد از ریختن استون.

شبیه‌سازی و بحث:

در نانوساختارهای پلاسمونیک فلزی به عنوان ابرجاذب، لازم است ضریب‌تراگسیل (T) و ضریب‌بازتاب (R) را همزمان حذف کرد. از آنجایی که عبور به خاطر حضور بازتابنده‌ی فلزی کاملاً حذف می‌شود، جذب ساختار (A)به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$A = 1 - R \qquad (۱)$$

بنابراین برای افزایش جذب باید بازتاب مینیمم شود. برای یک ابرجاذب پلاسمونیک ضرایب‌بازتاب فرنل برای قطبش s به شکل ذیل است:

$$r_s = \frac{z_{eff}\cos\theta_i - z_0\cos\theta_t}{z_{eff}\cos\theta_i + z_0\cos\theta_t} \qquad (۲)$$

که θ_i و θ_t زاویه‌ی فرودی و بازتابی موج‌الکترومغناطیسی نسبت به عمود بر سطح است، و $z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ امپدانس‌محیط (یعنی هوا) است، در حالی‌که z_{eff} امپدانس‌مؤثر ابرجاذب پلاسمونیک است. برای فرود عمودی که $\theta_i = \theta_t = 0$، معادله‌ی فوق نشان می‌دهد که اگر $z_{eff} = z_0$ شود، آنگاه بازتاب حذف خواهد شد. به خصوص برای تابش عمود هر محیطی که امپدانس خلاء $z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ را داشته باشد، در خلاء بدون بازتاب خواهد بود [۱۰].

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

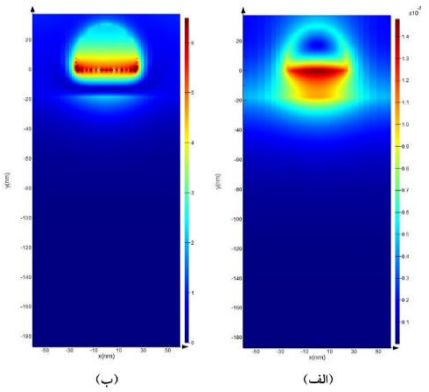
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

لایه‌ی دی‌الکتریک موجود در ابرجاذب به عنوان یک نانو-کاواک عمل می‌کند و به منظور افزایش انرژی‌الکترومغناطیسی استفاده می‌شود [۴].

جفت‌شدگی نور فرودی با SPPs لایه‌ی فلزی زیری و LSPR نانوجزیره، ممکن است در جایگزیدگی نور در ساختار نقش داشته باشد [۶].

به منظور آشکارکردن دلیل فیزیکی جذب در ساختار، با استفاده از نرم‌افزار FDTD توزیع میدانهای‌الکترومغناطیسی در شکل ۶ در طول موج پیک جذب بررسی شد.

همانطور که در شکل مشخص است، میدان‌الکتریکی در لایه‌های فلزی و میدان‌مغناطیسی در لایه‌ی دی‌الکتریک متمرکز شده است، که نشان می‌دهد یک رزونانس مغناطیسی قوی مسئول این جذب بالاست [۱۱].



شکل ۶: توزیع (الف) میدان‌مغناطیسی، (ب) میدان‌الکتریکی در ابرجاذب.

نتیجه‌گیری:

در این مقاله ابرجاذب پلاسمونیک بر پایه‌ی LSPR طراحی و ساخته شد. از ویژگی‌های این ساختار جذب بسیار بالا و حساسیت زیاد نسبت به تغییرات ضریب‌شکست است. تغییر رنگ قابل مشاهده با چشم هنگام تغییر ضریب‌شکست محیط اطراف، پتانسیل زیاد این ساختار برای عملکرد سنسور، حتی در محیط غیر آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

از آقایان محمودی و رستمی به خاطر زحمات فراوان و لایه‌نشانی کمال تشکر را داریم.

مرجع‌ها:

[1] J. A. Jenkins *et al.*, "Blue-shifted narrow localized surface plasmon resonance from dipole coupling in gold nanoparticle random arrays," *Phys. Chem*, vol. 118, no. 45, pp. 26276-26283, 2014.

[2] Y. Zhao *et al.*, "Light-driven tunable dual-band plasmonic absorber using liquid-crystal-coated asymmetric nanodisk array," *Applied Physics*, vol. 100, no. 5, p. 053119, 2012.

[3] K. A. Willets and R. P. J. A. R. P. C. Van Duyne, "Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing," *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 58, pp. 267-297, 2007.

[4] A. A. Jamali and B. J. P. Witzigmann, "Plasmonic perfect absorbers for biosensing applications," *Plasmonics*, vol. 9, no. 6, pp. 1265-1270, 2014.

[5] N. Liu, M. Mesch, T. Weiss, M. Hentschel, and H. J. N. l. Giessen, "Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor," *Nano Lett*, vol. 10, no. 7, pp. 2342-2348, 2010.

[6] K. Q. Le and J. J. J. B. Bai, "Enhanced absorption efficiency of ultrathin metamaterial solar absorbers by plasmonic Fano resonance," *OSA*, vol. 32, no. 4, pp. 595-600, 2015.

[7] Y. Li, B. An, S. Jiang, J. Gao, Y. Chen, and S. J. O. e. Pan, "Plasmonic induced triple-band absorber for sensor application," *OSA*, vol. 23, no. 13, pp. 17607-17612, 2015.

[8] M. Yan, J. Dai, and M. J. J. o. O. Qiu, "Lithography-free broadband visible light absorber based on a mono-layer of gold nanoparticles," *Journal of Optics*, vol. 16, no. 2, p. 025002, 2014.

[9] H. Sun, M. Yu, G. Wang, X. Sun, and J. J. T. J. o. P. C. C. Lian, "Temperature-dependent morphology evolution and surface plasmon absorption of ultrathin gold island films," *The Journal of Physical*, vol. 116, no. 16, pp. 9000-9008, 2012.

[10] Y. Zhang *et al.*, "Vapor-deposited amorphous metamaterials as visible near-perfect absorbers with random non-prefabricated metal nanoparticles," *Scientific Reports*, vol. 4, p. 4850, 2014.

[11] K. Du, Q. Li, W. Zhang, Y. Yang, and M. J. I. P. J. Qiu, "Wavelength and thermal distribution selectable microbolometers based on metamaterial absorbers," *IEEE Photonics Journal* vol. 7, no. 3, pp. 1-8, 2015.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]