

طراحی و شبیه سازی فیلتر پلاسمونیک چند لایه مبتنی بر آرایه ای از نانوذرات نقره جاسازی شده در لایه ژرمانیوم در طول موج مخابراتی

سیده زینب ابراهیمی، آیدین امینی، سعید گل محمدی

دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز

چکیده- در این مقاله عملکرد آرایه متناوبی از نانوذرات کروی از جنس نقره، تحت عنوان فیلتر پلاسمونیک ارائه شده است. هدف طراحی و شبیه سازی باشد. در ساختار ارائه شده، آرایه نانوذرات در بستری از جنس نانوساختار پیشنهادی به عنوان فیلتر تنظیم پذیر نوری برای کاربردهای مخابراتی می ژرمانیوم قرار داده شده است. هدف از این ترکیب مواد افزایش شدت میدان محلی در حد فاصل آرایه های نانوذرات و لایه ی پوششی ژرمانیوم بوده که به نوبه خود افزایش چشمگیری را در اندازه میدان جایگزیده توسط این آرایه را به دنبال خواهد داشت. تابش نور در محدوده ی مادون قرمز منجر به تحریک پلاسمون های سطحی موضعی در نانوذرات شده و با هیبریداسیون بین ذرات، فرکانس رزونانس این امواج سطحی به پنجره مخابراتی انتقال یافته است. تزویج نور به این امواج سطحی موضعی باعث حبس شدن نور بصورت میدان محلی در حدفاصل بین نانوذرات شده و عملکرد فیلتری را در پنجره (استفاده شده FDTD مخابراتی بهبود می بخشد. به منظور مدل سازی و بررسی عملکرد ساختار ارائه شده از روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان) است. در این بررسی، تاثیر ابعاد لایه ها و نانوذرات بر کیفیت حبس میدان محلی و طیف فیلترینگ، مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلید واژه : فیلتر پلاسمونیک، طول موج مخابراتی، نانو ذرات نقره، ژرمانیوم.

Designing and simulating of plasmonic multilayer filters based on Ag nanoparticles arrays embedded in Ge layer on communication wavelength

Seyyede Zainab Ebrahimi, Aydin Amini and Saeed Golmohammadi

School of engineering emerging technologies, University of Tabriz

Abstract- In this paper, a periodic array of Silver spherical-nanoparticles is considered to act as a tunable plasmonic filter in telecommunication window, in which, the array is embedded by a layer of Germanium and set on the silicon dioxide substrate. The purpose of this material configuration is to increase the local fiend between adjacent nanoparticle and Ge layer which in turn increases the absorption of optical fields by nanoparticles in array. Illumination at infrared region excites localized surface plasmons (LSPRs) of silver nanoparticles and due to the hybridization between these nanoparticles in array, the resonance frequency LSPRs red-shifts to telecommunication window. Coupling between LSPRs and incident field leads to confining optical field at the gap distance between nanoparticles and improves the quality of filtering at telecommunication window in the terms of optical absorption at the wavelength of interest. Finite difference time domain (FDTD) method have been used to both calculate filtering spectra and local field between adjacent nanoparticles. Also, the effect of size parameters of nanoparticles on quality of optical confinement and filtering spectra have been studied.

Keywords: plasmonic filter, communication wavelength, Ag nanoparticles, Ge

۱- مقدمه

از فیلترهای نوری در سیستم های تصویربرداری رنگی و طیفی برای جداسازی نور طول موج های مختلف استفاده می شود [1]. فیلترهای نوری معمولی با استفاده از تکنیک لایه های نازک ساخته می شوند. همچنین این فیلترها مشکلاتی چون: ابعاد بزرگ و توان مصرفی بالا حین فرآیند ساخت دارند. بنابراین اخیراً به جای فیلترهای معمولی، فیلترهای چند لایه پلاسمونیکی بدلیل مزایایی همانند ابعاد کوچک، تلورانس نسبتاً کم زاویه ی فرودی و توانایی هدایت مؤثر نور مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. همچنین برای این فیلترهای ابعاد کوچک کاربردهای بسیاری مانند، انتخاب پهنای باند گسترده، باند باریک، باند میان گذر و باند کناری را ذکر نمود [1].

در ادامه به خلاصه ای از کارهای انجام شده در این زمینه اشاره خواهیم نمود.

کارتیک کومار و همکارانش آرایه های مختلفی از نانودیسک های فلزی نقره و طلا بر روی یک سطح بازتابنده قرار دادند تا بتوانند با استفاده از آن ساختار تصویری رنگی در حد پراش نوری چاپ کنند [2]. چندی بعد، گوانگ یوان و همکارانش نیز با استفاده از آرایه ای از نانومیله های نقره، فیلترهای رنگی بازتابنده طراحی کردند که با تغییر هندسه آرایه ها، طول موج فیلتر حاصل نیز متغیر بود [3]. فیلترهایی با خواص بازتابنده گی مطلوب در طول موج طیف مرئی برای آرایه ای از نانوذرات هسته-پوسته دار نقره وسیلیکا جاسازی شده درون ماتریکس پلیمری هم در مقاله [4] توسط چیا وی هسو و همکارانش ساخته شد.

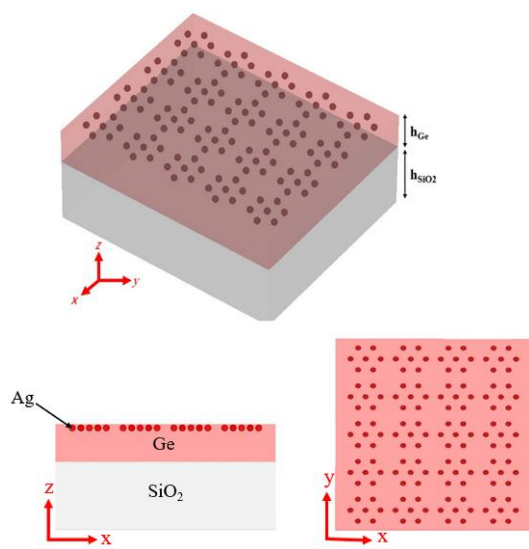
در مقاله ی [5] خواص فیلترینگ برای شبکه ای از نانوذرات فلزی با مقطع بیضوی که بر روی لایه ای از ITO لایه نشانی شده و کل ساختار داخل ماده ی سیلیکا جاسازی شده در بازه ی مرئی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ساختار طوری طراحی شده است تا قله بازتاب با حداقل تلفات جذب و حداکثر میانگین سطح گذار به-دست آید.

در این مقاله طراحی و شبیه سازی فیلترهای نوری بر اساس آرایه ای متناوب از نانوذرات نقره کروی مدفون در ژرمانیوم که مابین دو لایه از جنس سیلیکا قرار گرفته-

است، انجام شده است. هدف طراحی فیلتر برای کارکرد در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر می باشد. فیلتری که در این مقاله به طراحی و شبیه سازی آن پرداخته ایم، دامنه انتقالی تقریبی ۸۰٪ با قله رزونانسی بیشینه در طول موج مخابراتی را دارد.

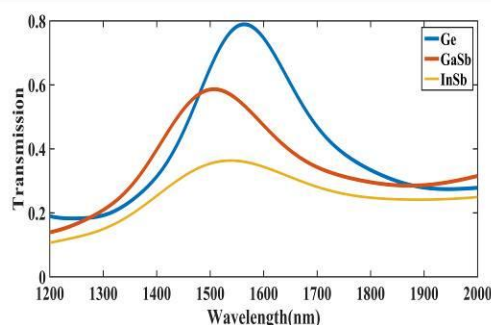
۲- ساختار و روش شبیه سازی

در ساختار پیشنهادی آرایه ای متناوب از نانوذرات کروی از آلایژ نقره با شعاع ۱۱ نانومتر و ضخامت (h_{Ag}) و ثابت شبکه متناوب ۴۴ نانومتر در راستای محورهای مختصاتی x و y را درون لایه ای از جنس ژرمانیوم با ضخامت بهینه (h_{Ge}) در حدود ۳۵۵ نانومتر بر روی بستری از جنس سیلیکا با ضخامت (h_{SiO_2}) ۱۰۰۰ نانومتر قرار می دهیم. شرایط مرزی در راستای عمود بر ساختار بصورت لایه های جاذب PML و در راستای موازی با آن بصورت شرایط مرزی متناوب در نظر گرفته شده است. به منظور تحریک ساختار از یک منبع موج تخت با شدت ۱ وات بر میکرومتر مربع در جهت z - با گستره ی طول موجی ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر از بالای ساختار و عمود بر آن استفاده شده است. دقت فضایی در هر سه راستا ۰/۵ نانومتر مد نظر گرفته شده است. ساختار فیلتر پلاسمونیکی پیشنهادی در این مقاله در محیط نرم افزار FDTD SOLUTION شبیه سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است [6].



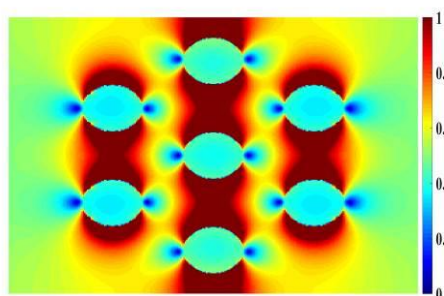
شکل ۱. شماتیک دو و سه بعدی از ساختار پیشنهادی

در انتها به بررسی تاثیر تغییر جنس لایه نیمه‌هادی استفاده شده در ساختار شکل ۲ می‌پردازیم. در این بررسی، از نیمه‌هادی‌های دیگری مانند GaSb و InSb با حفظ مقادیر اولیه برای ابعاد ساختار به جای لایه ژرمانیوم استفاده می‌کنیم (شکل ۴).

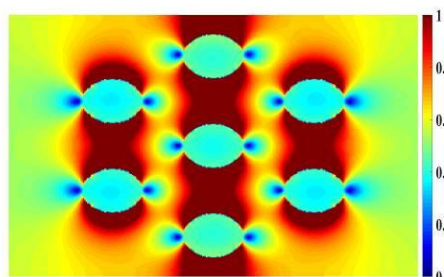


شکل ۴. مقایسه‌ی طیف انتقال به ازای سه عنصر: Ge, GaSb, InSb

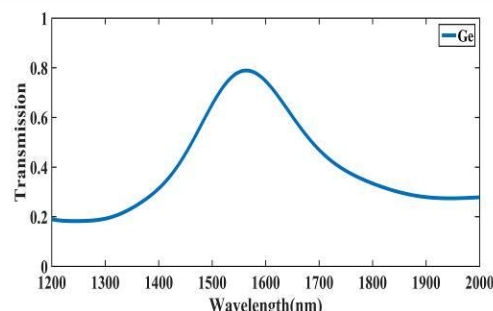
با این تغییرات، تغییر شدت میدان محلی در مرز بین نانوذرات نقره در لایه‌ای از نیمه‌هادی InSb و GaSb بترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۵. طیف شدت میدان محلی در صفحه X-Y در مرز بین نانوذرات واقع در لایه InSb در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر

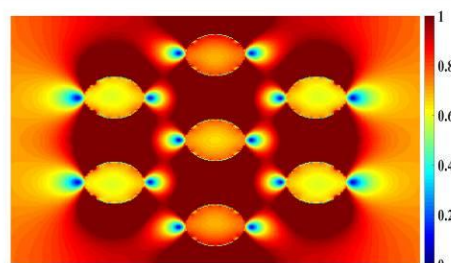


شکل ۶. طیف شدت میدان محلی در صفحه X-Y در مرز بین نانوذرات واقع در لایه GaSb در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر



شکل ۲. نمودار طیف عبور هنگامیکه از آرایه متناوب با ثابت شبکه ۴۴ نانومتر از نانوذراتی کروی از جنس نقره با شعاع ۱۱ نانومتر داخل لایه‌ای از ژرمانیوم با ضخامت ۳۵۵ نانومتر قرار داده ایم.

طیف عبور حاصل از شبیه‌سازی برای ساختار پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ژرمانیوم با شیف‌ت فرکانس پلاسمون سطحی منجر به تشکیل قله رزونانسی در طول موج مخابراتی شده است. به‌منظور مقایسه کیفیت رزونانس پلاسمونیکی نانوذرات فلزی و نیمه‌هادی، از طیف شدت محلی در مرز بین نانوذرات بهره می‌گیریم زیرا میزان میدان محلی گویای میزان تزویج نور ورودی به مد پلاسمونیکی می‌باشد. شکل ۳ میدان محلی ایجاد شده در حد فاصل بین نانوذرات نقره در یک سلول واحد از شبکه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، به‌هنگام استفاده از لایه ژرمانیوم و نانوذرات نقره بدلیل بالا بودن ضریب گذردهی منفی فلزات نسبت به نیمه‌هادی‌های آلایش شده، شدت میدان در مرز بین نانوذرات و لایه ژرمانیوم نسبتاً شدید بوده و بین نانوذرات و لایه ژرمانیوم تزویج شدیدتری رخ داده است. که البته بدلیل خاصیت فلزی، بخشی از نوسانات بصورت تلفات اهمی میرا شده و از اینرو دامنه طیف انتقال کمتر از حالتی است که از نانوذرات نیمه‌هادی استفاده کردیم.



شکل ۳. طیف شدت میدان محلی در صفحه X-Y در مرز بین نانوذرات نقره واقع در لایه ژرمانیوم در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر.

۳- نتیجه گیری

مراجع

- [1] Chih-Jui Yu, "Color Filtering Using Plasmonic Multilayer Structure", [Nanoelectronics Conference \(INEC\), IEEE 4th International](#), 2011.
- [2] K. Kumar, H. Duan, R. S. Hegde, S. C. W. Koh, J. N. Wei, and J. K. W. Yang, "Printing colour at the optical diffraction limit," *Nat. Nanotechnol.* 7, 557 (2012).
- [3] G. Si, Y. Zhao, J. Lv, M. Lu, F. Wang, H. Liu, N. Xiang, T. J. Huang, A. J. Danner, J. Teng, and Y. J. Liu, "Reflective plasmonic color filters based on lithographically patterned silver nanorod arrays," *Nanoscale* 5, 6243 (2013).
- [4] C. W. Hsu, B. Zhen, W. Qiu, O. Shapira, B. G. DeLacy, J. D. Joannopoulos, and M. Soljai, "Transparent displays enabled by resonant nanoparticle scattering," *Nat. Commun.* 5, 3152 (2014).
- [5] Y. Brûlé, G. Demézy, AL Fehrembach, B. Gralak, M. Grangier, D. Barat, ... "Design of metallic nanoparticle gratings for filtering properties in the visible spectrum", *physics.optics*, 2015.
- [6] Dennis M. Sullivan, "Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method". Wiley-IEEE Press, 2013.
- [7] Mohammed Nadhim Abbas, Cheng-Wen Cheng, Yia-Chung Chang and M H Shih, "An omni-directional mid-infrared tunable plasmonic polarization filter", *IOP Publishing Ltd*, 2012.
- [8] Paolo Biagioni, "Group-IV midinfrared plasmonics, *journal of nanophotonics*", vol. 9, 2015.
- [9] Prashant K. Jain Mostafa A. El-Sayed c, 1, " Plasmonic coupling in noble metal nanostructures", *Chemical Physics Letters* 487, 153-164, (2010).

از آنجایی که فرکانس پلاسمون سطحی نقره در طول موج های پایین تر از پنجره‌ی مخابراتی قرار دارد، در واقع این ژرمانیوم است که منجر به شیفت قله رزونانسی به سمت طول موج های بزرگتر شده و در نهایت باعث تشکیل بیشینه قله رزونانسی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر می‌شود. علاوه بر این، وجود مقطع دایروی شکل نانوذرات باعث عملکرد تک مدی نانوذرات در واکنش به میدان ورودی می‌شود [7]. بطوریکه این مدها همگی از نوع مد نوسانی بوده و بسادگی توسط میدان تحریک می‌شوند. ژرمانیوم بدلیل تلفات ذاتی پایین و همچنین قابلیت دوپینگ شدید برای کاربردهای پلاسمونیک، انتخاب مناسبی برای افزاره های فوتونیک در ناحیه مادون قرمز میانی است [8]. همپنین بدلیل پایین بودن جرم مؤثر ژرمانیوم ($m^* \approx 0.12$)، ژرمانیوم قابلیت تولید فرکانس پلاسمای بزرگتری را برای سطح دوپینگ یکسان دارد. علاوه بر این، گاف غیر مستقیم ژرمانیوم از بازترکیب سریع حامل‌های برانگیخته نوری جلوگیری می‌کند [8].

استفاده از نانوذراتی مثل نقره و در ساختارهایی مشابه با ساختار پیشنهادی ما در این مقاله منجر به رزونانس های پلاسمونیک می‌شود که این نیز خاصیت فیلترینگ را در ساختار ایجاد می کند ، با این تفاوت که نانوذرات نقره خاصیت فیلترینگ در ناحیه UV-plasmonic ایجاد می کنند [9].