

بهبود بازدهی و افزایش جذب ترانزیستور نوری فلز- نیمرسانا- فلز با نانوتوری فلزی پلاسمونی

محمد رضا شاهی وظیفه^۱، محمدعلی منصوری بیرجندی^۲

دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۱m.r.shahi_v@pgs.usb.ac.ir, ^۲mansouri@ece.usb.ac.ir

چکیده - در این مقاله، یک ترانزیستور نوری فلز-نیمرسانا-فلز (MSM)، با بکاربردن روزنه‌ی زیرطول موج، نانوتوری و نانوذرات به روش عددی المان محدود شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تنها با موج الکترومغناطیسی TM و با زاویه‌ی تابش حدوداً ۰/۲۵ رادیان پلاسمون‌های سطحی برانگیخته می‌شود و با انتخاب ماده‌ی GaAs بعنوان زیرلایه می‌توان بیشترین مقدار جذب ($\alpha=0.58$) را مشاهده نمود. در این ساختار با توجه به تک حاملی بودن (نوع n) دیود نوری MSM، از زیرلایه نوع p به جهت ایجاد ویژگی تقویت‌کنندگی (عملکرد ترانزیستوری) بهره برده شده است.

کلید واژه- ترانزیستور نوری فلز-نیمرسانا-فلز (MSM)، دیود نوری فلز-نیمرسانا-فلز (MSM-PD)، پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPP)، موج پلاسمون سطحی (SPW)، نانوتوری

Efficiency Improve and Absorption Enhancement of Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Phototransistor Based on Plasmonic Metal Nanogratings

Mohammad Reza Shahi-Vazifeh¹, Mohammad Ali Mansouri-Birjandi²

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan

¹m.r.shahi_v@pgs.usb.ac.ir, ²mansouri@ece.usb.ac.ir

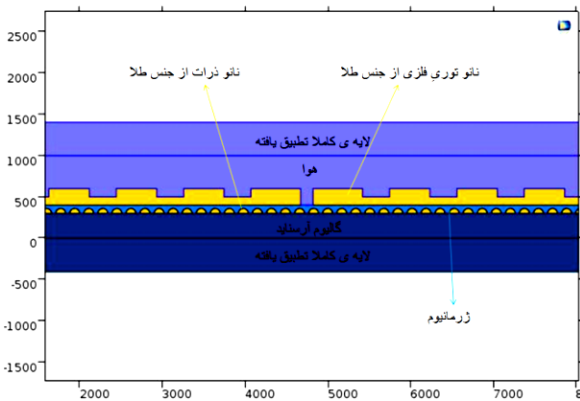
Abstract - In this article, a metal-semiconductor-metal phototransistor (MSM) is simulated with numerical finite element method using sub-wavelength aperture, nanograting and nanoparticles. Simulation results show that surface plasmons to be excited just with TM electromagnetic wave and a radiation angle of about 0.25 radian, and by selecting the GaAs material as a substrate, can be seen the greatest amount of absorption ($\alpha=0.58$). Considering MSM photodiode is single-carrier (type n), the p-type substrate is used in this structure to create amplify features (performance of transistor).

Keywords: Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Phototransistor, Metal-Semiconductor-Metal Photodiode (MSM-PD), Surface Plasmon-Polariton (SPP), Surface Plasmon Wave (SPW), Nanograting

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

۱- مقدمه

لایه‌های فلزی نازک نقش کلکتور و امیتر ترانزیستور را ایفا می‌نمایند. با بایاس این ترانزیستور، جریان کلکتور متناسب با تابش برخوردی به ناحیه‌ی بیس تغییر می‌یابد و مشابه یک دیود نوری عمل می‌کند، اما در مقایسه با دیود نوری (با همان میزان تابش نور ورودی)، جریان خروجی چندین برابر جریان تولید شده توسط دیود نوری می‌باشد.



شکل ۱: طراحی شماتیک از ترانزیستور نوری MSM

۲-۱- برانگیختن SPPها توسط نانو توری

پلاسمون‌های سطحی (SP)، امواج الکترومغناطیسی انتشار یافته در طول مرز یک رسانا و دی‌الکتریک می‌باشند. از برهم‌کنش SPها با نور، امواج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPP) ایجاد می‌شود. استفاده از نانوتوری، یکی از روش‌های تحریک SPPها توسط نور است که شیارهای سطحی متناوب آن، موجب تزویج تابش ورودی به SPPها می‌گردد. ثابت انتشار SPP یا بردار موج با دوره نانوتوری فلزی Λ از رابطه زیر بدست می‌آید [۵-۶].

$$\frac{\omega}{c} \sin(\theta) \mp \frac{2\pi l}{\Lambda} = k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon'_m \epsilon_d}{\epsilon'_m + \epsilon_d}} \quad (1)$$

که Λ دوره نانوتوری فلزی، ω فرکانس زاویه‌ای موج نوری ورودی، c سرعت نور در خلاء، θ زاویه میان نور ورودی و قائم، l یک عدد صحیح و ϵ_m ضریب گذردهی فلز به صورت $\epsilon_m = \epsilon'_m + i\epsilon''_m$ و ضریب گذردهی هوا ϵ_d تعریف می‌گردد. بدین ترتیب هر شیار نانوتوری، SPPها را تحریک کرده و امواج ترکیبی شامل موج‌های پلاسمون سطحی و نوری، درون روزنه زیرطول موج انتشار می‌یابند.

ترانزیستور نوری، افزاره‌ای دوقطبی است (BJT) که به علت خاصیت ترانزیستوری، بهره زیادی دارد و کم‌نویز است. در این مقاله یک نمونه کاربرد جدید از ساختار فلز-نیمرسانا-فلز (MSM) به عنوان ترانزیستور نوری معرفی و ضمن تشریح عملکرد این ساختار، به بهبود مشخصات این آشکارساز پرداخته می‌شود. در سال ۱۹۷۲، ملوین بلاسکو^۱ ترانزیستورهای نوری فلز-نیمرسانا-فلز (MSM) را پیشنهاد کرد. بهره این ترانزیستور وابسته به نسبت طول نفوذ حامل اقلیت در نیمرسانا به فاصله میان لایه‌های فلزی نازک است [۱]. ساختار ترانزیستور نوری MSM بسیار شبیه به دیود نوری MSM می‌باشد با این تفاوت که عملکرد دیود نوری بصورت تک حاملی (نوع n) است و از سال ۱۹۷۲ تاکنون در زمینه نوع ترانزیستوری آن (دارای زیرلایه نوع p) کار زیادی صورت نگرفته است، در حالی که کلیه‌ی تحقیقات بر روی نوع دیودی (MSM-PD) انجام شده است که فاقد بهره می‌باشد.

در سال ۲۰۰۶، توسط یو^۲ و همکارانش از خاصیت پلاسمون-های سطحی برای افزایش نسبت سیگنال به نویز یک آشکارساز نوری در فرکانس‌های مادون قرمز میانی، از طریق بهبود جذب، استفاده شد [۲]. در سال ۲۰۰۷، توسط هتتریچ^۳ یک طراحی بهینه برای MSM-PDهایی با الکترودهای شانه‌ای با ابعاد زیر طول موج ارائه داده شد که در آن از یک چاه کوانتومی (GaInNAs)، به عنوان لایه جذب کننده استفاده شد [۳]. در سال ۲۰۱۰، توسط تان^۴ و همکارانش یک ساختار آشکارساز MSM-PD باتوری پراش فلزی پیشنهاد داده شد [۴] و تاکنون، همین گروه، تحقیقات زیادی برای بهبود جذب ساختار آشکارساز نوری دیودی با به کاربردن توری پراش فلزی به صورت تئوری و عملی انجام دادند.

۲- معرفی ساختار ترانزیستور نوری MSM و تشریح عملکرد آن

این ترانزیستور متشکل از دو دیود شاتکی (فلز-نیمرسانا) به صورت NPN شکل گرفته است. زیرلایه ترانزیستور به عنوان بیس ترانزیستور، به صورت سبک نوع p آلایش یافته است،

^۱ Melvin Belasco

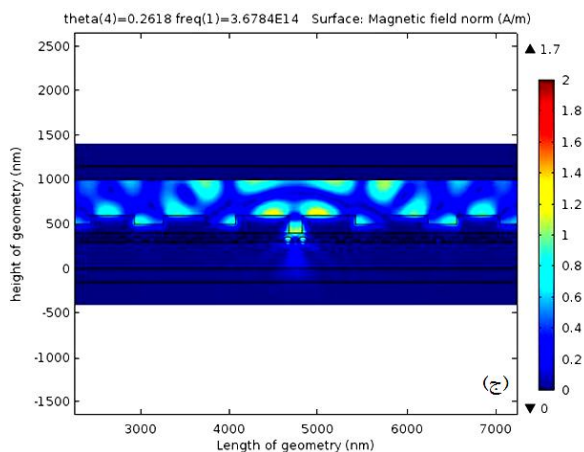
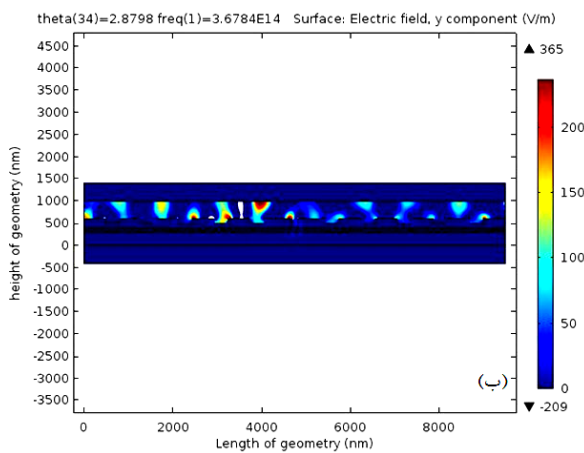
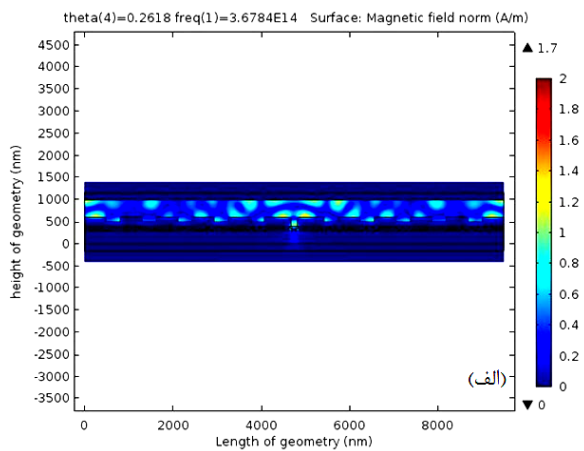
^۲ Yu, Z.

^۳ Hetterich, J.

^۴ Tan, C.

۲-۲- نانو ذرات فلزی جاسازی شده

شد یا به عبارتی برای بررسی نوسانات سطحی باید از قطبش P استفاده نمود.



شکل ۲: نمایش اعمال موج: (الف) نوع TM به ساختار و تحریک پلاسمون‌های سطحی و حرکت موج پلاسمون به سمت روزه زیر طول موج. (ب) نوع TE به ساختار و عدم تحریک پلاسمون‌های سطحی. (ج) نمای نزدیک و بزرگ شده حالت (الف)

سطح جذب ساختار MSM پلاسمونی می‌تواند با استفاده از نانوذرات فلزی جاسازی شده در زیرلایه‌ی نیم‌رسانا افزایش یابد مانند آنچه که در شکل ۱ نشان داده شده است. با اتخاذ مدل دوقطبی متداول، جذب و پراکندگی سطح مقطع نانوذرات (که دارای قطر خیلی کوچکتر از طول موج نور ورودی می‌باشد) می‌تواند از رابطه زیر تبعیت کند [۷]:

$$C_{abs} = \frac{2\pi}{\lambda} Im(\alpha) \quad (2)$$

$$C_{sca} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 |\alpha|^2 \quad (3)$$

که قطبش پذیری α برای ذره کروی توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = 3V \frac{\epsilon_p - \epsilon_{sm}}{\epsilon_p + \epsilon_{sm}} \quad (4)$$

V حجم ذره و ϵ_{sm} و ϵ_p به ترتیب تابع دی الکتریک ذره و متوسط مجاور است.

۳- نتایج شبیه سازی و بحث

برای تحلیل نتایج شبیه سازی از نمودارهای دو بعدی و یک بعدی بهره برده شده که شامل نمودارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی در راستای عمود می‌باشد و همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد میدان موج TE قادر به تحریک پلاسمون‌ها نبوده اما موج TM موجب تحریک پلاسمون‌های سطحی و حرکت این موج به سمت روزه زیرطول موج و در نتیجه باعث جذب حداکثری در نیم‌رسانا می‌گردد. بارهای در حال نوسان، بر روی کناره‌ی دیوار روزه جمع شده‌اند و این بارهای سطحی پرتو نور را در امتداد روزه حمل نموده و موجب ایجاد یک دوقطبی الکتریکی در لبه‌های پایین روزه می‌شوند.

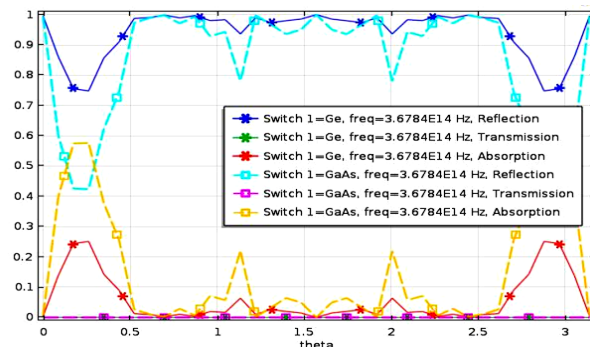
در بررسی پلاسمون سطحی توجه ما به موج‌هایی است که در ناحیه بین دو ماده انتشار می‌یابند از آنجایی که انتشار موج همواره عمود بر راستای انتشار E است. بنابراین باید حداقل یک مولفه E عمود بر راستای انتشار داشته باشیم. از بین قطبش‌های P و S تنها قطبش P است که این مولفه دارد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قطبش S منجر به تولید نوسانات سطحی نخواهد

۴- نتیجه گیری

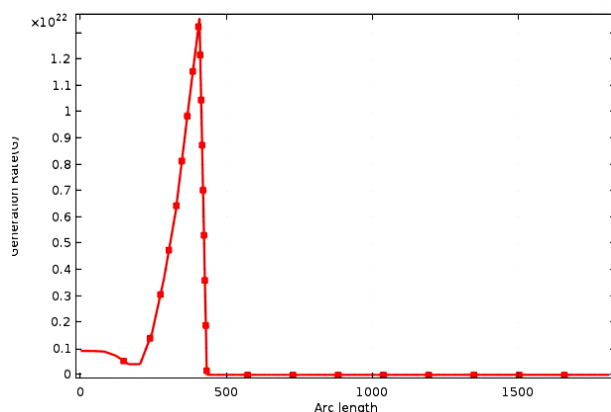
در این مقاله یک نمونه کاربرد جدید از ساختار فلز-نیمرسانا-فلز (MSM) به عنوان ترانزیستور نوری بر پایه نانوتوری‌های فلزی و نانو ذرات طراحی گردید و نتایج شبیه‌سازی، تولید موج پلاسمون سطحی (SPW) را توسط موج TM (در ساختار نانو توری فلزی با نانوذرات جاسازی شده) برای جذب حداکثری نشان می‌دهد. و مشاهده گردید که ترانزیستور MSM به جهت دارا بودن زیرلایه نیمرسانا نوع P عملکردی متفاوت و دارای تقویت کنندگی می‌باشد.

مراجع

- [1] Melvin Belasco, Sebastian R Borrello, "Schottky Barrier Phototransistor", Patents/US3700980, 1972.
- [2] Yu, Z., Veronis, G., and Fan, S., "Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures," Applied Physics Letters 89 (15), 151116, 2006.
- [3] Hetterich, J., Bstian, Gippius, G., N. A., Tikhodeev, S. G., Plessen, G. von, and Lemmer, U., "Optimized Design of Plasmonic MSM Photodetector," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 43, no. 10, pp. 855-859, 2007.
- [4] Tan, C. L., Lysk, V. V., Alameh, K., Lee, Y. T., "Absorption enhancement of 980 nm MSM photodetector with plasmonic grating structure," Optics Communications 283, 1763-1767, 2010.
- [5] Zhen-Yu Zhang, Hai-Yu Wang, Jiang-Lin Du, Xu-Lin Zhang, Ya-Wei Hao, Qi-Dai Chen, and Hong-Bo Sun, "Surface Plasmon-Modulated Fluorescence on 2D Metallic Silver Gratings," IEEE Photonics Thechnology Letters, Vol. 27, No. 8, 2015.
- [6] Narottam Das, Farzaneh Fadakar Masouleh, and Hamid Reza Mashayekhi "Light Absorption and Reflection in Nano-Structured GaAs Metal-Semiconductor-Metal Photo-Detectors," Nanotechnology, IEEE, Vol.13, Issue: 5, P.982 - 989, 2014.
- [7] Tan, C. L., Karar, A., Alameh, K., and Lee, Y. T., "Optical Absorption Enhancement of Hybrid - Plasmonic - Based Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Incorporating Metal Nanogratings and Embedded Metal Nanoparticles," Optics Express, vol. 21, no. 2, pp.1713-1725, 2013.



شکل ۳: نمایش نمودار ضرایب بازتاب، انتقال و جذب بر حسب زاویه نور اعمالی، با توجه به انتخاب نوع ماده‌ی ناحیه جذب (ژرمانیوم و گالیوم آرسناید)



شکل ۴: نرخ تولید حامل‌های جفت الکترون-حفره ایجاد شده در اثر برخورد نور اعمالی در طول خط انتخابی که از انتهای زیرلایه تا هوا و از مرکز قطعه (ناحیه جذب) عبور می‌کند.

شکل ۳ نیز ضرایب بازتاب، انتقال و جذب بر حسب زاویه نور اعمالی را با توجه به انتخاب نوع ماده‌ی ناحیه جذب (ژرمانیوم و گالیوم آرسناید) نشان می‌دهد که ملاحظه می‌شود در صورت انتخاب گالیوم آرسناید، با توجه به اینکه به صورت P آرایش یافته است، در زوایای اطراف ۰/۲۵ رادیان می‌توان جذب بیشتری را شاهد بود.

همچنین شکل ۴ نمایانگر نرخ تولید حامل‌های جفت الکترون-حفره ایجاد شده در اثر برخورد نور اعمالی است که در طول خط انتخابی که از انتهای زیرلایه تا هوا و از مرکز قطعه (و ناحیه جذب) عبور می‌کند، به نمایش گذاشته شده و پیک این منحنی در نقطه‌ی ۳۵۰ میکرومتر و مرکز ناحیه-ی فعال (در پایین روزنه زیرطول موج، به دلیل انتقال حداکثری نور در این ناحیه) رخ داده است.