



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



بررسی اثر تغییرات ضریب شکست محیط اطراف بر پاسخ طیفی نانوانت‌های پاپیونی

نعیمه طاهری، حبیب خوش سیم، بابک علیایی فر

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، تبریز

چکیده - در این مقاله اثر تغییرات ضریب شکست محیط اطراف بر پاسخ فرکانسی نانوانت‌های پاپیونی شکل در دو حالتی که قطبش نور فرودی موازی و عمود بر طول بلند نانوانت است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب شکست محیط اطراف شدت میدان الکتریکی نرمالیزه شده با دامنه میدان الکتریکی موج فرودی، کاهش می‌یابد و فرکانس تشدید به سمت فرکانس‌های کمتر شیفت می‌یابد. از این رفتار مطالعه شده نانوانت‌های پاپیونی می‌توان در ادوات نوری همچون حسگرهای زیستی استفاده نمود.

کلیدواژه: ضریب شکست محیط اطراف، فرکانس تشدید، قطبش نور فرودی، نانوانت پلاسمونیک، نانوانت پاپیونی شکل

Investigation of the effect of variations in the refractive index of the surrounding medium on the spectral response of bowtie nanoantennas

Naemeh Taheri, Habib Khoshsim, babak olyaeefer

Institute for applied Physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz

Abstract- Optical response of a bowtie nano-antenna in diverse refractive indices of the surrounding medium is investigated, including both cases of parallel and normal polarization of the incident beam's electric field, regarding the major axis of the antenna. Results indicate that an increase in the refractive index lowers the amplitude of the normalized electric field and red shifts the resonance. This alteration may find various applications such as in biosensors.

Keywords : bowtie nanoantenna, refractive index of the surrounding medium, resonance frequency, polarization of the incident light

۱- مقدمه

نانوآنتن‌های پلاسمونیک در واقع همان آنتن‌های اپتیکی در مقیاس نانو هستند که از ویژگی پلاسمون‌های سطحی بهره می‌گیرند [۱]. هدف آنتن‌های اپتیکی، تبدیل تابش اپتیکی به انرژی جایگزیده شده در ابعاد زیر طول موج، با بهره‌گیری از پلاسمون‌های سطحی است [۲]. آنتن‌های اپتیکی می‌توانند در فرآیندهایی که اندرکنش نور و ماده اساس کار آن‌هاست، نقشی قابل توجه داشته باشند. در واقع این آنتن‌ها دربی به قلمرویی جدید از کاربردها گشوده‌اند که با آنتن‌های میکروویو قابل دستیابی نبود. استفاده از ایده آنتن در فرکانس‌های اپتیکی در سال‌های اخیر منجر به پیدایش کاربردهای تکنولوژیک جدیدی چون بهبود سطح مقطع جذب و بهره‌کوانتومی در فوتوولتائیک‌ها [۳]، نانو تصویربرداری زیست‌شناسی [۴] و بهینه‌سازی تفکیک فضایی در میکروسکوپی نوری میدان نزدیک [۵] شده است. از سال ۲۰۰۴ مطالعات عددی و تجربی گسترده‌ای بر روی نانوآنتن‌های پلاسمونیک انجام گرفت و اشکال هندسی مختلفی برای آن پیشنهاد داده شد. یکی از معروفترین اشکال نانوآنتن‌های پلاسمونیک، نانوآنتن پاپیونی است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسط گروه شاک^۱ پیشنهاد شد که ویژگی آن کاهش تعداد مد-های تشدیدی بوده و در ثبت نوری اطلاعات بسیار کارآمد است [۶]. بررسی پاسخ طیفی نانوآنتن‌های پلاسمونیک به دلیل تشدید پلاسمون‌های سطحی نیازمند مطالعه مدهای سطحی در نانوساختارهای فلزی است که تحت شرایط هندسی و محیطی خاص تغییر می‌کنند. تشدید پلاسمون‌های سطحی که در ساختارهای با ابعاد نانو، تشدید پلاسمون‌های سطحی موضعی (LSP)^۲ نامیده می‌شود، در واقع همان تحریک غیر انتشاری الکترون‌های باند هدایت نانوساختارهای فلزی است که میدان الکترومغناطیسی به آن‌ها تزویج شده است [۷]. تحریک یک تشدید ($LSPR$)^۳، در حضور باندهای جذب قوی پلاسمون سطحی منجر به پراکندگی شدید نور و بهبود

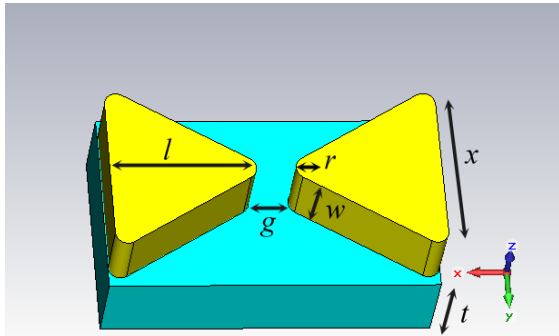
میدان الکترومغناطیسی محلی می‌شود [۸]. مکان طیفی پلاسمون‌های سطحی موضعی به شدت به هندسه ساختاری، ماده نانوساختار و دی الکتریک محیط اطراف حساس است. با توجه به ابعاد بسیار کوچک نانوآنتن‌های پلاسمونیک و پیچیدگی فنی ساخت آن‌ها، دستیابی به سازوکاری که بتوان این نانوآنتن‌ها را پس از تولید نیز کوک‌پذیر کرد، همواره مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از این رو یکی از پارامترهایی که می‌توان برای دستیابی به کنترل آن‌ها، مورد مطالعه قرار داد محیط اطراف آن‌هاست. حساسیت نانوآنتن‌های پلاسمونیک به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف در کاربردهای حسگری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله ما به بررسی اثر ضریب شکست محیط اطراف در تقویت میدان الکتریکی و تأثیر آن بر پاسخ فرکانسی در نانوآنتن پاپیونی شکل می‌پردازیم تا بتوانیم با تغییر دلخواه ضریب شکست محیط اطراف، عملکرد مورد انتظار خود را از نانوآنتن داشته باشیم.

۲- فرمول بندی مسئله

در این مقاله از روش عددی FEM ^۴ برای طراحی و تجزیه و تحلیل ساختار مورد مطالعه بهره گرفته‌ایم. تقسیم بندی فضای مسئله شامل هشت مرحله است که در هر مرحله، تقسیمات^۵ کوچکتر و در قسمت‌های دارای انحنا دقیق‌تر می‌شود. نانوآنتن پاپیونی شبیه سازی شده از جنس طلا است که برای فرکانس پلاسما و فرکانس برخورد برای طلا از مقادیر تجربی جانسون و کریستی^۶ [۹] استفاده شده است. برای ساختار موردنظر از شرط مرزی PML ^۷ استفاده کرده ایم. این شرط مرزی با هدف طراحی ناحیه‌ای مجازی در اطراف ناحیه اصلی ایجاد شده است که بتواند کل موج برخوردی به مرز را جذب کند. محیط توسط موج تخت تحریک می‌شود. مرزهای محیط به صورت باز در نظر گرفته شده‌اند تا موجی به داخل محیط از مرزها بازتاب نشود و در محاسبات اختلالی ایجاد

^۴ Finite Element Method^۵ Meshing^۶ Johnson & Christy^۷ Perfectly Matched Layer^۱ Schuck^۲ Localized Surface Plasmon^۳ Localized Surface Plasmon Resonance

حالت برای فضای اطراف نانوانتن شبیه سازی شده بر روی زیرلایه، بترتیب ضرایب شکست $n=1.32, n=1.35, n=1.4, n=1.45, n=1.5$ در نظر گرفته شده است و نمودار تشدید آن در گستره فرکانسی 100 تا 600 تراهرتز به دست آمده است. پیک-های ثانویه‌ای که در نمودار تشدید دیده می‌شوند مربوط به سایر مدهای تشدید هستند که ما در این بررسی رفتار مد اصلی را مورد بحث قرار می‌دهیم.



شکل ۱: پارامترهای هندسی نانوانتن پاپیونی شکل

در حالت اول راستای قطبش میدان الکتریکی موج فرودی موازی با طول بلند نانوانتن است. در این حالت در ناحیه گپ شرایط تشدید فراهم است و تقویت میدان الکتریکی را داریم که این امر ناشی از انباشت بار در ناحیه گپ خواهد بود شکل (۲-الف). آنچه که از نمودار تشدید نانوانتن پاپیونی در حالت اول شکل (۳-الف)، مشخص است بیانگر این مطلب است با افزایش ضریب شکست محیط اطراف تا نزدیکی ضریب شکست زیرلایه بیشینه منحنی تشدید کاهش و فرکانس تشدید به سمت فرکانس-های کمتر شیف می‌یابد که این شرایط هم در مورد مد اصلی و هم در مورد مد ثانویه صادق است.

در حالت دوم که راستای قطبش نور فرودی را به صورت عمود بر محور بلند نانوانتن در نظر گرفته‌ایم، میدان الکتریکی ضعیفی را در ناحیه گپ ایجاد می‌کند شکل (۲-ب). نمودار تشدید نیز نشان می‌دهد که در این حالت با افزایش ضریب شکست، تضعیف میدان الکتریکی و شیف فرکانس به سمت فرکانس‌های کمتر را داریم و برای ضرایب شکست $n=1.45, n=1.5$ نیز آنتن از شرایط تشدیدی خارج و تقویت میدان الکتریکی نداریم شکل (۳-ب).

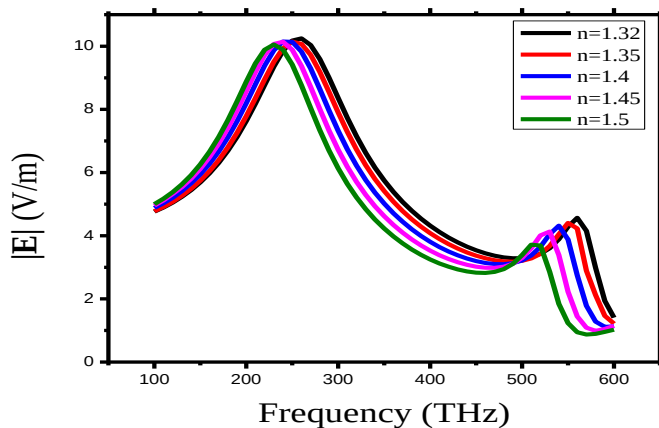
نکند. پاسخ الکترومغناطیسی نانوانتن مورد مطالعه با مدل درود توصیف می‌شود. مدل درود به صورت

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 \pm i\gamma\omega} \quad (1)$$

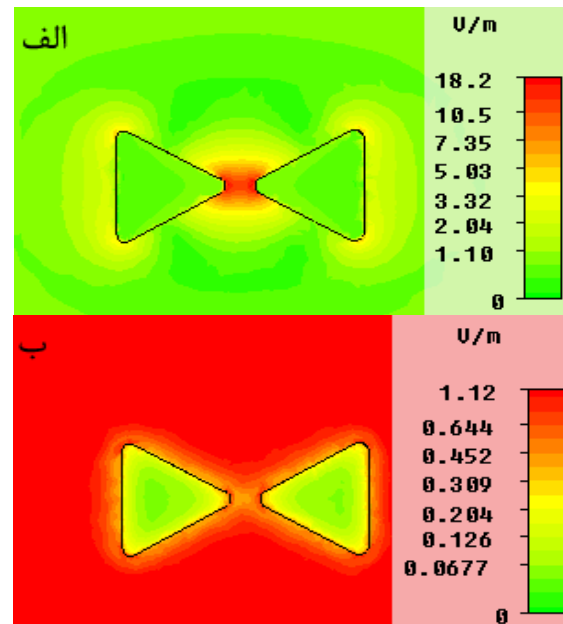
است که ω_p فرکانس پلاسما و γ ضریب میرایی برای فلز بر حسب $(\frac{rad}{s})$ است. برای پلاسمایی که توسط مدل درود توصیف می‌شود، فرکانس پلاسما را می‌توان با شرط $Re(\varepsilon(\omega_p)) \approx 0$ به دست آورد. می‌توان دید به ازای $\omega < \omega_p$ خواهیم داشت $Re(\varepsilon(\omega)) < 0$. علاوه بر این اگر ω خیلی کوچک نباشد، جذب که با بخش موهومی مدل توصیف می‌شود نیز کوچک خواهد بود. این دو شرط یعنی $Re(\varepsilon(\omega)) < 0$ و کوچک بودن $Im(\varepsilon(\omega))$ هستند که طیف وسیعی از اثرات اپتیکی جذاب از جمله تشدیدهای پلاسمونیک را ممکن می‌سازند. برای بسیاری از فلزات، فرکانس پلاسما در بخش uv طیف الکترومغناطیس است. بنابراین محدوده مورد علاقه در بخش مرئی (یا نزدیک uv و یا مادون قرمز نزدیک) بسته به نوع فلز، قرار خواهد گرفت [۷].

۳- محاسبات عددی و نتایج

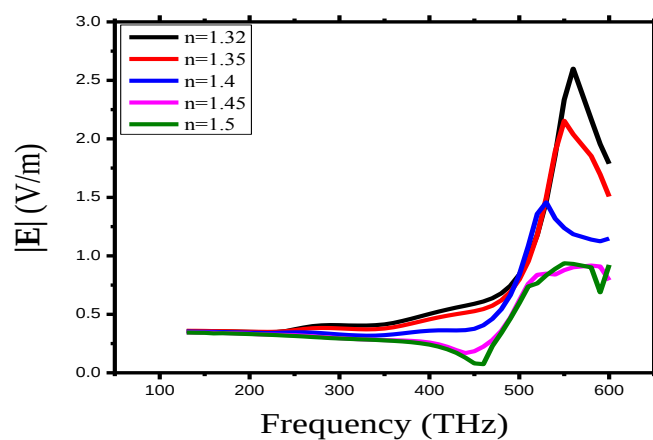
نانوانتن پاپیونی مورد مطالعه نوعی از نانوانتن دوقطبی است که از دو قطعه مثلثی شکل فلزی تشکیل شده که دو رأس آن به فاصله $g = 20 \text{ nm}$ از هم قرار گرفته‌اند. این نانوانتن بر روی زیرلایه شیشه‌ای با ضریب شکست $n=1.5$ و ضخامت $t=100 \text{ nm}$ طراحی شده است. پارامترهای هندسی آن به صورت $x = 230.94 \text{ nm}$, $w = 80 \text{ nm}$, $l = 200 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند. هریک از زوایای مثلث‌ها برابر با $\theta = 60^\circ$ درجه و شعاع انحنا در رأس آن‌ها $r = 15 \text{ nm}$ است شکل (۱). در نانوانتن‌های پلاسمونیک گپ محلی برای چگالی انرژی متمرکز شده است و پاسخ اپتیکی کلی آنتن را تعیین می‌کند. از این رو در این مقاله تأثیر تغییرات ضریب شکست محیط اطراف و زیرلایه بر طول ثابت میان گپ به مختصات $(x=0, y=0, z=40)$ در دو حالتی که راستای قطبش نور فرودی موازی و عمود بر طول بلند نانوانتن است، بررسی شده است. در هر دو



شکل ۳-الف. نمودار تشدید نانوانتِن پایبونی با قطبش نور فرودی در جهت X با مقادیر مختلف ضرایب شکست برای محیط اطراف



شکل ۳-ب. توزیع میدان الکتریکی در اطراف نانوانتِن پایبونی. (الف) قطبش نور فرودی موازی با طول بلند نانوانتِن (ب) قطبش نور فرودی عمود بر طول بلند نانوانتِن



شکل ۳-ب. نمودار تشدید نانوانتِن پایبونی با قطبش نور فرودی در جهت Z با مقادیر مختلف ضرایب شکست برای محیط اطراف

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود قوی ترین بهبود میدان در گپ زمانی است که برای تحریک پلاسمون های سطحی، راستای قطبش نور فرودی در جهت طول بلند نانوانتِن پایبونی باشد. در مورد جابجایی فرکانس تشدید هم می توان گفت با توجه به این که جابجایی فرکانس تشدید تحت تأثیر محیط اطراف و ویژگی های اپتیکی نانوانتِن مورد مطالعه است، در اینجا با افزایش ضریب شکست محیط اطراف تا نزدیکی ضریب شکست زیرلایه، فرکانس تشدید به سمت فرکانس های کمتر شیفِت پیدا می کند. در نتیجه می توان با تغییر دلخواه ضریب شکست محیط اطراف به فرکانس های مورد نظر برای کاربردهای حسگری و اسپکتروسکوپی مادون قرمز نزدیک تا میانی دست یافت.

مراجع

- [1]- Park, Q-Han. *Optical antennas and plasmonics*. Contemporary Physics 50.2 (2009): 407-423.
- [2]- Bharadwaj, Palash, Bradley Deutsch, and Lukas Novotny. *Optical antennas*. Advances in Optics and Photonics 1.3 (2009): 438-483.
- [3]- Stockman, Mark I. *Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future*. Optics express 19.22 (2011): 22029-22106.
- [4]- Garcia-Parajo, Maria F. *Optical antennas focus in on biology*. Nature Photonics 2.4 (2008): 201-203.
- [5]- Frey, Heinrich G., et al. High-resolution imaging of single fluorescent molecules with the optical near-field of a metal tip. Physical review letters 93.20 (2004): 200801.
- [6]- Fromm, David P., et al. Gap-dependent optical coupling of single "bowtie" nanoantennas resonant in the visible. Nano Letters 4.5 (2004): 957-961.
- [7]- Maier, Stefan Alexander. *Plasmonics: Fundamentals and Applications: Fundamentals and Applications*. Springer, 2007.
- [8]- Aizpurua, Javier, et al. *Optical properties of gold nanorings*. Physical Review Letters 90.5 (2003): 057401.
- [9]- Johnson, Peter B., and R-W_ Christy. *Optical constants of the noble metals*. Physical Review B 6.12 (1972): 4370.