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 نانوآنتن‌های پاپیونی

نعیمه طاهری، حبیب خوش سیما، بابک علیایی‌فر

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، بلوار۲۹ بهمن، تبریز

چکیده – در این مقاله اثر تغییرات ضریب شکست محیط اطراف بر پاسخ فرکانسی نانوآنتن پاپیونی شکل در دو حالتی که قطبش نور فرودی موازی و عمود بر طول بلند نانوآنتن 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 به‌سمت فرکانس‌های کمتر شیفت می‌یابد. از این رفتار مطالعه شده نانوآنتن پاپیونی می‌توان در ادوات نوری همچون حسگرهای زیستی استفاده نمود.

کلیدواژه : ضریب شکست محیط اطراف، فرکانس تشدید، قطبش نور فرودی، نانوآنتن پلاسمونیکی، نانوآنتن 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 Khoshsima, babak olyaeefar

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]

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

۱- مقدمه

نانوآنتن‌های پلاسمونیکی 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 بهره کوانتومی در فوتوولتائیک‌ها[۳]، نانوتصویربرداری زیست‌شناسی[۴] و بهینه سازی تفکیک فضایی در میکروسکوپی نوری میدان نزدیک[۵] شده است. از سال ۲۰۰۴ مطالعات عددی و تجربی گسترده‌ای بر روی نانوآنتن‌های پلاسمونیکی انجام گرفت و اشکال هندسی مختلفی برای آن پیشنهاد داده شد. یکی از معروفترین اشکال نانوآنتن‌های پلاسمونیکی، نانوآنتن پاپیونی است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسط گروه شاک[1] پیشنهاد شد که ویژگی آن کاهش تعداد مد-های تشدیدی بوده و در ثبت نوری اطلاعات بسیار کارآمد است[۶]. بررسی پاسخ طیفی نانوآنتن‌های پلاسمونیکی 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)[2] نامیده می-شود، در واقع همان تحریک غیر انتشاری الکترون‌های باند هدایت نانوساختارهای فلزی است که میدان الکترومغناطیسی به آن‌ها تزویج شده است[۷]. تحریک یک تشدید($LSPR$)[3]، در حضور باندهای جذب قوی پلاسمون سطحی منجر به پراکندگی شدید نور و بهبود میدان الکترومغناطیسی محلی می‌شود[۸]. مکان طیفی پلاسمون‌های سطحی موضعی به‌شدت به هندسه ساختاری، ماده نانوساختار و دی الکتریک محیط اطراف حساس است. با توجه به ابعاد بسیار کوچک نانوآنتن‌های پلاسمونیکی 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 پلاسمونیکی به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف درکاربردهای 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[4] برای طراحی و تجزیه و تحلیل ساختار مورد مطالعه بهره گرفته‌ایم. تقسیم بندی فضای مسئله شامل هشت مرحله است که در هر مرحله، تقسیمات[5] 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[6] [۹] استفاده شده است. برای ساختار موردنظر از شرط مرزی PML [7] 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 به‌صورت باز در نظر گرفته شده‌اند تا موجی به داخل محیط از مرزها بازتاب نشود و در محاسبات اختلالی ایجاد

---

1 *Schuck*
2 *Localized Surface Plasmon*
3 *Localized Surface Plasmon* Resonance
4 *Finite Element Method*
5 *Meshing*
6 *Johnson & Christy*
7 *Perfectly Matched Layer*

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]

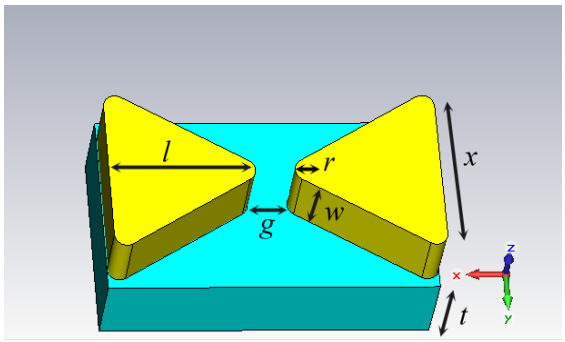
نکند. پاسخ الکترومغناطیسی نانوآنتن مورد مطالعه با مدل درود توصیف می‌شود. مدل درود به‌صورت

$$\varepsilon(\omega)=1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2\pm i\gamma\omega} \qquad (۱)$$

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 $\mathrm{Re}(\varepsilon(\omega_p))\approx 0$ به‌دست آورد. می‌توان دید به ازای $\omega<\omega_p$ خواهیم داشت $\mathrm{Re}(\varepsilon(\omega))<0$. علاوه بر این اگر ω خیلی کوچک نباشد، جذب که با بخش موهومی مدل توصیف می‌شود نیز کوچک خواهد بود. این دو شرط یعنی $\mathrm{Re}(\varepsilon(\omega))<0$ و کوچک بودن $\mathrm{Im}(\varepsilon(\omega))$ هستند که طیف وسیعی از اثرات اپتیکی جذاب از جمله تشدیدهای پلاسمونیکی 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

نانوآنتن پاپیونی مورد مطالعه نوعی از نانوآنتن دوقطبی است که از دو قطعه مثلثی شکل فلزی تشکیل شده که دو رأس آن به فاصله $g=20nm$ از هم قرار گرفته‌اند. این نانوآنتن بر روی زیرلایه شیشه‌ای با ضریب شکست $n=1.5$ و ضخامت $t=100nm$ طراحی شده است. پارامترهای هندسی آن به‌صورت $l=200nm$، $w=80nm$، $x=230.94nm$، در نظر گرفته شده‌اند. هریک از زوایای مثلث‌ها برابر با $\theta=60$ درجه و شعاع انحنا در رأس آن‌ها $r=15nm$ است شکل(۱). در نانوآنتن‌های پلاسمونیکی 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 موج تشدید و میزان تقویت میدان الکتریکی در نقطه‌ای 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 نانوآنتن است، بررسی شده است. در هر دو حالت برای فضای اطراف نانوآنتن شبیه سازی شده بر روی زیرلایه ، بترتیب ضرایب شکست $n=1.32, n=1.35, n=1.4, n=1.45, n=1.5$ درنظر گرفته شده است و نمودار تشدید آن در گستره فرکانسی 100 تا 600 تراهرتز به‌دست آمده است. پیک‌های 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.

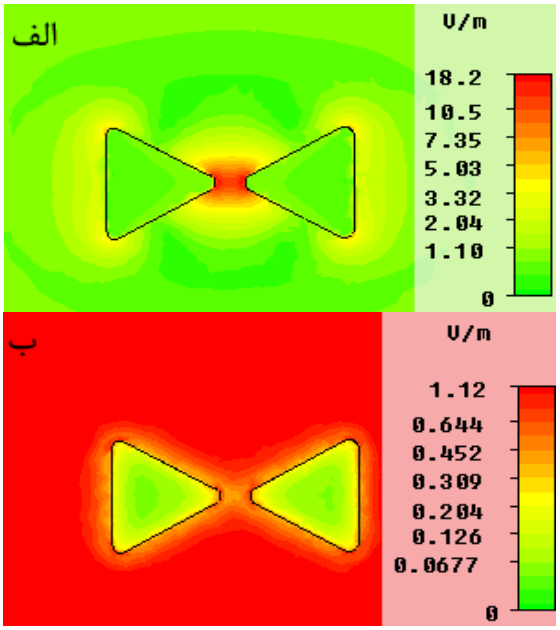


شکل ۱: پارامترهای هندسی نانوآنتن پاپیونی شکل

در حالت اول راستای قطبش میدان الکتریکی موج فرودی موازی با طول بلند نانوآنتن 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 نانوآنتن 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 به‌سمت فرکانس‌های کمتر شیفت 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 به‌صورت عمود بر محور بلند نانوآنتن 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 شیفت فرکانسی به‌سمت 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).

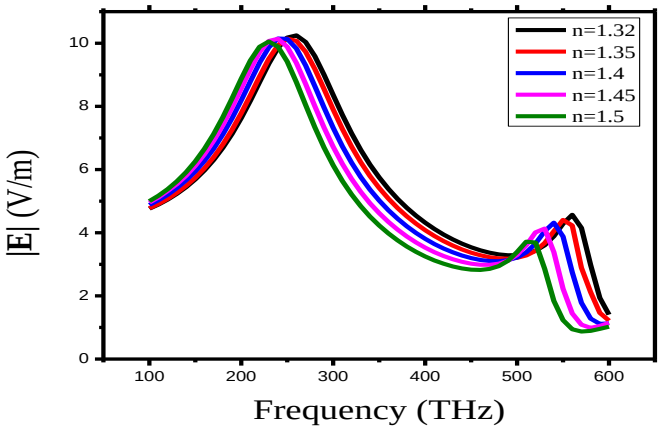
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]



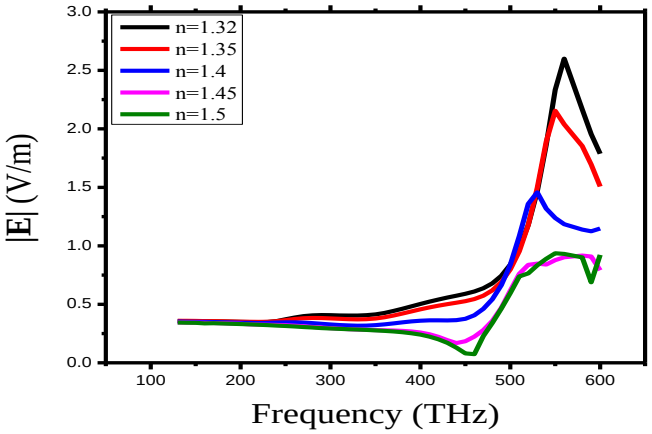
شکل۲-توزیع میدان الکتریکی در اطراف نانوآنتن پاپیونی. الف) قطبش نور فرودی موازی با طول بلند نانوآنتن ب) قطبش نور فرودی عمود بر طول بلند نانوآنتن

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود قوی‌ترین بهبود میدان در گپ زمانی است که برای تحریک پلاسمون‌های سطحی، راستای قطبش نور فرودی در جهت طول بلند نانوآنتن پاپیونی باشد. در مورد جابجایی فرکانس تشدید هم می‌توان گفت با توجه به این‌که جابجایی فرکانس تشدید تحت تأثیر محیط اطراف و ویژگی‌های اپتیکی نانوآنتن مورد مطالعه است، در اینجا با افزایش ضریب شکست محیط اطراف تا نزدیکی ضریب شکست زیرلایه، فرکانس تشدید به‌سمت فرکانس‌های کمتر شیفت پیدا می‌کند. در نتیجه می‌توان با تغییر دلخواه ضریب شکست محیط اطراف به فرکانس‌های موردنظر برای کاربردهای حسگری و اسپکتروسکوپی مادون قرمز نزدیک تا میانی دست یافت.



شکل۳-الف.نمودار تشدید نانوآنتن پاپیونی با قطبش نور فرودی در جهت x با مقادیر مختلف ضرایب شکست برای محیط اطراف



شکل۳-ب.نمودار تشدید نانوآنتن پاپیونی با قطبش نور فرودی در جهت z با مقادیر مختلف ضرایب شکست برای محیط اطراف

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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19]