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 پراکندگی میدان الکتریکی و تشدید پلاسمون سطحی یک نانوسیم با مقطع بیضوی

مریم فتحی سپهوند ،مسعود رضوانی جلال

گروه فیزیک، دانشگاه ملایر، ملایر

چکیده – هنگامی‌که بسامد نور تابشی با قطبش مغناطیسی عرضی (*TM*)، با بسامد نوسانات پلاسمون سطحی یک ماده پلاسمونیکی برابر باشد، تشدید پلاسمون سطحی می‌تواند اتفاق افتد. در این مقاله با استفاده از روش معادلات انتگرال‌های سطحی پراکندگی میدان الکتریکی در اطراف یک نانو سیم با مقطع بیضوی از جنس طلا، تحت اثر نور فرودی ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. با محاسبه اندازه متوسط میدان الکتریکی در داخل و اطراف نانوسیم، بسامدی که باعث بیشینه شدن متوسط میدان می‌شود به عنوان بسامد تشدید این نانوسیم گزارش شده است.

کلید واژه- تشدید پلاسمون سطحی، نانوسیم، پراکندگی نور، روش معادلات انتگرال‌های سطحی

Investigation of electric field scattering and surface plasmon resonance of a nanowire with elliptical cross section

Fathi Sepahvand, Maryam; Rezvani Jalal, Masoud

Department of Physics, Malayer University, Malayer

Abstract- When frequency of incident light with transverse magnetic (TM) polarization is equal to oscillations of surface plasmon of a plasmonic material, the surface plasmon resonant can be occurred. In this paper, by using surface integral equations method, the scattering of electric field around of a gold nanowire with elliptical cross section under the incident light with ۰, ۴۵ and ۹۰ degree of light illumination angles, have been investigated. By calculating the average of magnitude of electric in inside and around of nanowire, the frequency that maximizes field's average, reported as resonant frequency of nanowire.

Keywords: Surface Plasmon Resonance, Nanowire, Light Scattering, Surface Integral Equation Method

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

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

۱- مقدمه

به نوسان‌های دسته جمعی الکترون‌ها در فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک پلاسمون سطحی گفته می‌شود [۱ و۲]. این نوسان‌ها هنگامی‌که نانوذرات فلزی در معرض نور فرودی با قطبش مغناطیسی عرضی (TM) و با طول موج مناسب قرار می‌گیرند، می‌توانند رخ دهد [۳ - ۵]. هنگامی‌که بسامد نور فرودی به نانوخوشه فلزی با بسامد پلاسمون سطحی آن برابر باشد، تشدید پلاسمون سطحی اتفاق می‌افتد. بسامد این تشدید به پیکربندی، ابعاد، و جنس نانوخوشه و نیز به خواص محیطی که نانوخوشه در آن قرار گرفته، بستگی دارد [۶ - ۸]. در هنگام تشدید پلاسمون سطحی در یک نانوخوشه فلزی، می‌توان میدان‌های الکتریکی محلی قوی در اطراف خوشه ایجاد کرد که از میدان الکتریکی نور فرودی بسیار قوی‌تر باشد [۱]. چنین میدان‌های قوی موضعی کاربرد زیادی در ایجاد سنسورهای بیولوژیکی و شیمیایی، آشکارسازی طیفی تک مولکولی، نانولنزها، نانو آنتن‌ها، دستگاه‌های توان بالا و اتصالات نوری p-n و همچنین پراکندگی رامان افزوده سطحی (SERS) دارد [۹ - ۱۳]. تشدیدهای پلاسمون در بسامدهایی رخ می‌دهد که قسمت حقیقی ضریب دی‌الکتریک نانو ذره فلزی منفی بوده و در عین حال طول موج نور تابشی بسیار بزرگ‌تر از ابعاد نانو ذره گردد [۱۴]. این در واقع مکانیسم فیزیکی اصلی تشدید پلاسمون در نانو ذرات فلزی می‌باشد.

در مقاله حاضر ابتدا، با استفاده از روش معادلات انتگرال‌های سطحی به بررسی اثر تشدید پلاسمون سطحی در یک نانوسیم با سطح مقطع بیضوی شکل از جنس طلا پرداخته شده است. این نانو سیم تحت اثر زوایای مختلف نور فرودی با بسامدهایی در محدوده نور مرئی بررسی شده است. نحوه محاسبه بسامد مربوط به تشدید پلاسمون بدین صورت انجام گرفته شده است که ابتدا پراکندگی میدان با استفاده از روش انتگرال‌های سطحی محاسبه شده، سپس متوسط میدان الکتریکی در درون و اطراف این نانو سیم محاسبه گردیده که از این طریق بسامدهایی که بیشترین افزایش را در مقدار متوسط میدان الکتریکی داشته، به عنوان بسامدهای تشدید گزارش شده است.

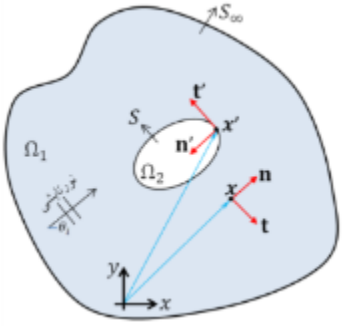
۲- معادلات انتگرالی

معادلات جفت شده برای یک محیط ۲ بعدی در حالت TM دارای میدان الکتریکی $\mathbf{E}=E_x\mathbf{e_x}+E_y\mathbf{e_y}$ و میدان مغناطیسی به صورت $\mathbf{H}=H_z\mathbf{e_z}$ می باشد که در این حالت روابط استراتون-چو در ناحیه Ω_2 به صورت ذیل می باشند [۱۵ و ۱۶]:

$$H_z(\mathbf{x})=\int_S H_z(\mathbf{x}')\mathbf{n}'.\nabla' G_2 dl'+i\omega\int_S \varepsilon_2 E_t(\mathbf{x}')G_2 dl' \quad (۱)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{x})=i\omega\int_S \mu_2\mathbf{G_2}H_z(\mathbf{x}')d\mathbf{l}'+\frac{1}{\varepsilon_2}\int_S D_n(\mathbf{x}')\nabla' G_2 dl' - \int_S E_t(\mathbf{x}')\mathbf{e_z}\times\nabla' G_2 dl' \quad (۲)$$

میدان الکتریکی و مغناطیسی در ناحیه ۱ (Ω_1) به دو بخش تابشی و پراشی قابل تقسیم است یعنی $\mathbf{E}=\mathbf{E}^i+\mathbf{E}^s$ و $\mathbf{H}=\mathbf{H}^i+\mathbf{H}^s$ که در آن وجود حرف i و s به ترتیب نشان دهنده بخش تابشی و بخش پراشی میدان هستند. بخش تابشی میدان در سرتاسر این مقاله پاسخ هارمونیک سیستم پراشی به صورت فاکتور هارمونیک زمانی $\exp(-i\omega t)$ در نظر گرفته شده است.



شکل۱ : شکل شماتیک مسئله ۲ بعدی

بخش پراشی میدان در ناحیه Ω_1 به صورت ذیل محاسبه می گردد:

$$H_z^s(\mathbf{x})=\int_S H_z^s(\mathbf{x}')\mathbf{n}'.\nabla' G_1 dl'-i\omega\int_S \varepsilon_1 E_t^s(\mathbf{x}')G_1 dl' \quad (۳)$$

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{x})=-i\omega\int_S \mu_1 G_1 H_z^s(\mathbf{x}')d\mathbf{l}'-\frac{1}{\varepsilon_2}\int_S D_n^s(\mathbf{x}')\nabla' G_1 dl' + \int_S E_t^s(\mathbf{x}')\mathbf{e_z}\times\nabla' G_1 dl' \quad (۴)$$

در روابط (۱) تا (۴)، ε ضریب دی الکتریک و μ ضریب گذردهی مغناطیسی است. ω ، بسامد زاویه ای نور تابشی، $i=\sqrt{-1}$ ، S نشان دهنده سطح نانو ذرات، $\mathbf{x}'\in S$، $\mathbf{n}'$ بردار نرمال بر سطح، $\mathbf{e_z}$ بردار یکه در راستای محور z (شکل ۱ را ببینید) و (H_z, D_n, E_t) مقادیر میدان بروی سطح نانو ذرات بوده به ترتیب از چپ به راست مقادیر میدان مغناطیسی در راستای z، میدان جابجایی عمود بر سطح و میدان الکتریکی مماسی در نقطه $\mathbf{x}'$ هستند.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

همچنین توابع گرین G_j که پاسخ تکین معادله هلمهولتز است، به صورت ذیل محاسبه می گردند (j=۱ , ۲):

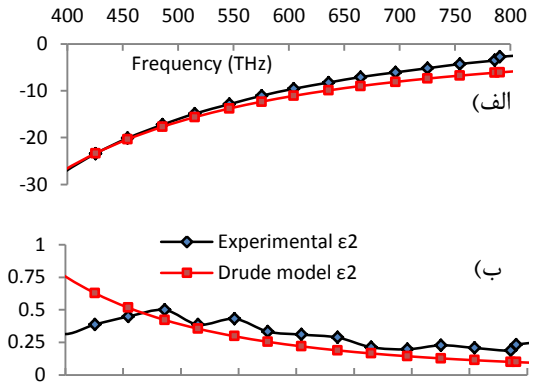
$$G_j(\mathbf{x}',\mathbf{x}) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_j\,|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|) \qquad (۵)$$

که در آن $H_0^{(1)}$ تابع هنکل نوع اول از مرتبه صفر بوده و $k_j = \omega\sqrt{\varepsilon_j \mu_j}$ است. با نوشتن معادلات (۱) تا (۴) برای سطح نانو ذرات و با انجام اندکی تغییرات بروی این معادلات، می‌توان سه معادله انتگرالی دیگر را نوشت که با استفاده از آنها می‌توان مجهولات روی مرز، یعنی (H_z, D_n, E_t) را تعیین و سپس مقادیر میدان در هر نقطه از دامنه محاسبه کرد. برای توضیحات بیشتر در این زمینه می‌توان به [۱۷] مراجعه کرد.

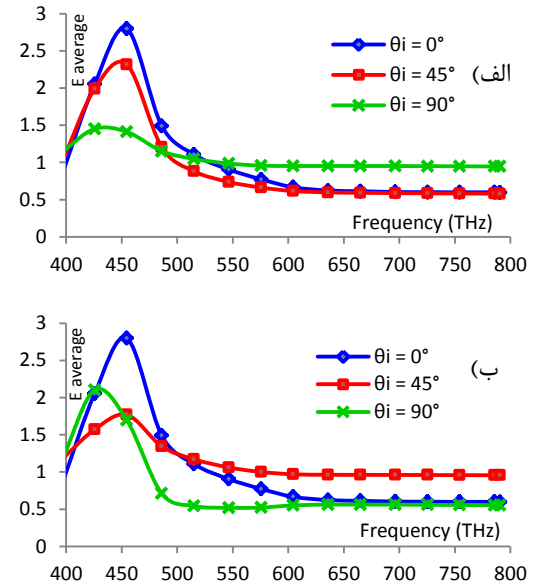
۳- رهیافت عددی

برای بررسی تشدید پلاسمون سطحی در اطراف تک نانوسیم با مقطع بیضوی از جنس طلا تحت اثر زوایای مختلف نور فرودی، یک بیضی با قطرهای a = ۲۰ nm و b = ۴۰ nm در نظر گرفته شده است که قطر بزرگ آن در راستای محور y قرار داشته و طول این نانوسیم بی‌نهایت است. مقطع این نانوسیم تحت اثر نور فرودی با زوایای انتشار صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه قرار گرفته است ناحیه‌ای که مقطع نانوسیم در مرکز آن قرار دارد به صورت شبکه‌ای ۱۶۰x۱۶۰ خانه‌ای می‌باشد. از آنجا که تحت اثر بسامدهای مختلف نور فرودی مقادیر ضریب دی‌الکتریک طلا تغییر می‌کند لذا برای بسامدهای متفاوت نور فرودی از داده‌های آزمایشگاهی که در [۱۸] گزارش شده، استفاده شده است. در شکل (۲)، نمودار قسمت حقیقی و موهومی ضریب دی‌الکتریک مربوط به داده‌های آزمایشگاهی آورده شده و مقادیر آن با مدل درود [۲] مقایسه شده است.

در شکل (۳) نمودار متوسط اندازه میدان الکتریکی در داخل نانوسیم و در شکل (۴) نمودار متوسط اندازه میدان الکتریکی در اطراف نانوسیم بیضوی، به ترتیب برای زوایای نور فرودی صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه به ازای بسامدهای مختلف نور فرودی ترسیم شده است. قله این نمودارها نشان دهنده بسامد تشدید می‌باشد که در جدول (۱) به صورت خلاصه این بسامدهای تشدید آورده شده است.



شکل ۲) مقایسه ضریب دی الکتریک طلا ($\varepsilon = \varepsilon_1 + i\,\varepsilon_2$) مدل درود و نتایج آزمایشگاهی به ازای بسامدهای مختلف نور فرودی: الف) قسمت حقیقی ثابت دی الکتریک، ب)قسمت موهومی آن مقایسه شده است.



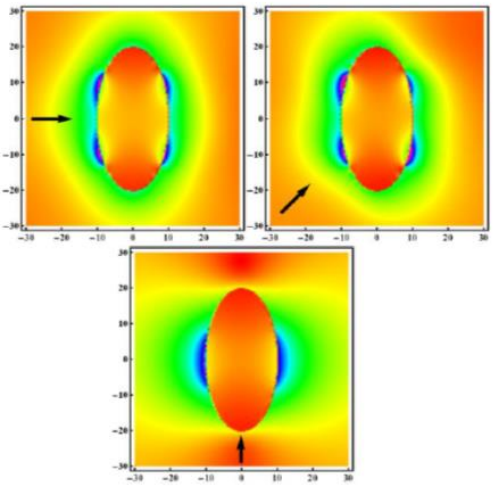
شکل ۳) متوسط میدان الکتریکی با مقطع بیضوی با زاویه تابش‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه: الف) در داخل نانوسیم، ب) در اطراف نانوسیم.

همچنین در شکل ۴، پراکندگی اندازه میدان الکتریکی در اطراف نانوسیم بیضوی آورده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌گردد بسامد تشدید پلاسمون سطحی برای زوایای نور فرودی صفر و ۴۵ درجه به صورت چهارقطبی بوده در حالی‌که برای زاویه فرودی ۹۰ درجه به صورت دو قطبی می‌باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

جدول ۱) بسامدهای تشدید برای نانو سیم با مقطع بیضوی با قطرهای کوچک و بزرگ ۲۰ و ۴۰ نانومتر.

زاویه نور فرودی (θ_i) بر حسب درجه	بسامد تشدید (ν) بر حسب (THz)	
	در داخل نانوذره	در اطراف نانوذره
۰	۴۵۴/۶	۴۵۴/۶
۴۵	۴۵۴/۶	۴۵۴/۶
۹۰	۴۲۵/۶	۴۲۵/۶



شکل ۴) توزیع اندازه میدان الکتریکی در مقطع نانوسیم بیضوی با زاویه تابش‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه (محورها برحسب نانومتر هستند).

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش معادلات انتگرال‌های سطحی پراکندگی میدان و نیز بسامد تشدید میدان الکتریکی برای داخل و نیز اطراف یک نانو سیم با مقطع بیضوی از جنس طلا، با شعاع بزرگ‌تر و کوچک‌تر ۲۰ و ۱۰ نانومتر تحت اثر نور فرودی ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت و ملاحظه گردید که بسامد تشدید آن در محدوده بسامد ۴۲۵/۶ تا ۴۵۴/۶ تراهرتز اتفاق افتاده است. همچنین ملاحظه گردید در حالتی‌که زاویه نور تابشی در راستای عمود بر قطر بزرگ‌تر مقطع بیضوی نانوسیم است، پراکندگی میدان الکتریکی در بسامد تشدید پلاسمون به صورت یک چهار قطبی بوده و هنگامی‌که این زاویه تابش موازی با راستای قطر بزرگ‌تر می‌گردد، پراکندگی میدان به صورت یک دوقطبی می‌گردد.

۵- مرجع ها

[۱] Garcia, M. A. *Surface Plasmons in metallic nanoparticles: Fundamentals and applications*. **Journal of Physics D: Applied Physics**. (۲۰۱۱). Vols. ۴۴, No ۲۸, pp. ۱-۴۳.

[۲] Maier, Stefan Alexander. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. **Springer**. New York., (۲۰۰۷).

[۳] Li, Debin and Ning, C. Z. *All-semiconductor active plasmonic system in mid-infrared wavelengths*. **Optics Express**. (۲۰۱۱). Vol. ۱۹, ۱۵, pp. ۱۴۵۹۴-۱۴۶۰۳.

[۴] Peyghambarian, Nasser, Koch, Stephan W. and Mysyrowicz, *Andre. Introduction to semicunductor optics*. **Prentice Hall**, (۱۹۹۳). ۹۷۸۰۱۳۶۳۸۹۹۰۳.

[۵] Jung, Dae-Ryong, et al. *Review Paper: Semiconductor Nanoparticles with Surface Passivation and Surface Plasmon*. **Electronic Materials Letters**. (۲۰۱۱). Vol. ۷, pp. ۱۸۵-۱۹۴.

[۶] Dreaden, Erik C., et al. *Multimodal plasmon coupling in low symmetry gold nanoparticle pairs detected in surface-enhanced Raman scattering*. **AIP Publishing**, (۲۰۱۱). Vol. ۹۸.

[۷] Bi, Ning, et al. *Determination of 6-thioguanine based on localized surface plasmon resonance of gold nanoparticle*. **Spectrochimica Acta Part A**., (۲۰۱۳). Vol. ۱۰۷, pp. ۲۴–۳۰.

[۸] Jung, Jesper, et al. *Electrostatic plasmon resonances of metal nanoparticles in stratified geometries*. **Plasmonics: Metallic Nanostructures and Their Optical Properties VIII. SPIE**, (۲۰۱۰). Vol. ۷۷۵۷, pp. ۱-۱۱.

[۹] Zhang, D., A.Hornerber and Mihaljevic, J. *Plasmon resonance modulated photominescence and Raman spectroscopy of diindenoperylene organic semiconductor thin film*. **Journal of Luminescence**. (۲۰۱۰). Vol. ۱۳۱, pp. ۵۰۲–۵۰۵.

[۱۰] Guzatov, D. V., Klimov, V. V. and Pikhota, M., *Plasmon Oscillations in Ellipsoid Nanoparticles: Beyond Dipole Approximation*. **Laser Physics**, (۲۰۰۹), Vols. ۲۰, No. ۱, pp. ۸۵–۹۹.

[۱۱] Rigo, Maria Veronica, et al**.**, *Plasmon coupling of R6G-linked gold nanoparticle assemblies for surface-enhanced Raman spectroscopy*. **Vibrational Spectroscopy**, (۲۰۱۱), , Vol. ۵۷, pp. ۳۱۵– ۳۱۸.

[۱۲] A.Willets, Katherine and Duyne, Richard P. Van., *Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing*. **Annu. Rev. Phys. Chem.**, (۲۰۰۷). Vol. ۵۸, pp. ۲۶۷–۲۹۷.

[۱۳] Arbabi, Amir. Terahertz Surface Plasmon *Polariton-like Surface Waves for Sensing Applications*. **University of Waterloo, Ontario, Canada**, (۲۰۰۹). Ph.D thesis.

[۱۴] Mayergoyz, isaak d. And zhang, zhenyu., *Modeling of the Electrostatic (Plasmon) Resonances in Metallic and Semiconductor Nanoparticles*. **Journal of Computational Electronics**, (۲۰۰۵), Vol. ۴, pp. ۱۳۹–۱۴۳.

[۱۵] Liaw, Jiunn-Woei, *Analysis of the surface plasmon resonance of a single core-shelled nanocomposite by surface integral equations*. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, (۲۰۰۶), Vol. ۳۰, pp. ۷۳۴–۷۴۵.

[۱۶] Liaw, Jiunn-Woei., *Simulation of surface plasmon resonance of metallic nanoparticles by the boundary-element method*. **Journal of the Optical Society of America** , (۲۰۰۶), Vol. ۲۳, pp. ۱۰۸-۱۱۶.

[۱۷] فتحی سپهوند, مریم و رضوانی جلال, مسعود. شبیه سازی پراکندگی نور از نانو سیم پلاسمونیکی با استفاده از روش انتگرال سطحی. **چهلمین کنفرانس ملی فیزیک. سیستان و بلوچستان**, شهریور ۱۳۹۳.

[۱۸] Johnson, P. B. and Christy, R. W. *Optical constants of the Noble Metals*. **Physical Review B**. ۱۹۷۲. Vol. ۶, pp. ۴۳۷۰-۴۳۷۹.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]