بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# بررسی خواص انتشاری امواج پلاسمونی در زنجیره ای از نانو ذرات نقره

ادریس افروز، وحید سیاهپوش*، رضا خردمند

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز

**در این مقاله یک زنجیره از نانو ذرات نقره به عنوان یک موجبر پلاسمونی مورد مطالعه قرار گرفته است. این موجبر با تابش نور به اولین ذره ی آن برانگیخته شده و بسته به قطبش نور فرودی، دو موج پلاسمونی متفاوت می تواند در آن منتشر شود. ما با استفاده از روش تقریب دوقطبی های گسسته اثر فاصله نانو ذرات و طول موج نور فرودی را بر خواص انتشاری این امواج بررسی کرده ایم. نتایج بدست آمده نشان می دهند که امواج پلاسمونی با قطبش طولی، طول انتشار بیشتری نسبت به امواج با قطبش عرضی دارند. ما همچنین نشان داده ایم که طول انتشار امواج پلاسمونی و طول موجی که امواج پلاسمونی با بیشترین طول انتشار را برانگیخته می کند، می تواند از طریق تنظیم فاصله نانو ذرات کنترل شود.**

کلید واژه- موجبر پلاسمونیکی، زنجیره نانو ذرات فلزی، حد پراش، تقریب دوقطبی گسسته.

# The investigation of plasmonic waves propagation properties in a silver nanoparticles chain.

Edris Afrouz, Vahid Siahpoush*, Reza Kheradmand

Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz.

v_siahpoush@tabrizu.ac.ir

In this paper, a chain of silver nanoparticles as a plasmonic waveguide has been investigated. This waveguide when excited by illuminating of its first nanoparticle, depends on polarization of incident light, can support two different plasmonic waves. By using discrete dipole approximation (DDA) method, we have investigated the effect of nanoparticles distance and wavelength of incident light on propagation properties of these plasmonic waves. The obtained results show that plasmonic wave with longitudinal polarization has longer propagation length than the wave with transverse polarization. We have also shown that the propagation length of plasmonic waves and the wavelength which excites the wave with maximum propagation length, can be controlled by adjusting nanoparticles distance.

Keywords: plasmonic waveguide, chain of metal nanoparticles, diffraction limit, discrete dipole approximation.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01 ]



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## مقدمه

موجبرهای پلاسمونیکی با قابلیت هدایت نور در ابعاد زیر حد پراش، راهکاری موثر برای فشرده سازی تجهیزات نوری می باشند. یکی از مهم ترین موجبر های پلاسمونیکی، زنجیره ای از نانو ذرات فلزی است که با توجه به انعطاف در طراحی و ساخت نسبتا آسان، در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است[۱]. تابش نور به اولین نانو ذره زنجیره، موجب برانگیزش نوسان های جمعی و هماهنگ پلاسمای الکترونی در سطح آن می شود. این نوسان های غیر انتشاری، پلاسمون های سطحی جایگزیده نامیده می شوند. تحریک پلاسمون های موضعی یک میدان الکتریکی دو قطبی نوسانی در محل اولین نانو ذره ایجاد کرده که منجر به تحریک پلاسمای الکترونی سایر نانو ذرات می گردد[۲]. تحت شرایط خاصی در نتیجه جفت شدگی پلاسمون های جایگزیده یک موج پلاسمونی در طول زنجیره منتشر می گردد. خواص انتشاری این موج پلاسمونی به پارامترهایی نظیر طول موج و قطبش نور فرودی، اندازه نانو ذرات و فاصله آنها از یکدیگر بستگی دارد[۳]. در این مقاله اثر پارامترهای موثر بر چگونگی انتشار میدان در طول زنجیره را بررسی کرده ایم. برای انجام این بررسی از تئوری تقریب دو قطبی های گسسته استفاده شده است. در این روش جهت چشم پوشی از اثرات ناشی از نقش چهار قطبی‌های الکتریکی و مراتب بالاتر، اندازه ذرات باید بسیار کوچکتر از طول موج نور فرودی باشد.

## مبانی تئوری

در بررسی بر هم کنش امواج الکترومغناطیسی با نانو ذرات فلزی، برای تعیین تابع دی الکتریک فلز می توان از مدل دورود استفاده کرد:

$$e = 1 - \frac{w_p^2}{w^2 + iwg} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا $w_p = ۹/۳۷ \times ۱۰^{۱۵} s^{-1}$ فرکانس پلاسمایی و $g = ۱/۰۶ \times ۱۰^{۱۵} s^{-1}$ فرکانس برخورد الکترون های آزاد فلز نقره می باشد[۴].

در تقریب دوقطبی های گسسته در یک توزیع از $N$ نانو ذره یکسان که تحت تابش نور قرار دارند، هر نانو ذره به صورت یک دوقطبی الکتریکی در نظر گرفته می شود که با تمامی نانو ذرات دیگر در مجموعه، در حال بر همکنش است. گشتاور دوقطبی نانو ذره $n$ ام که در مکان $\vec{r}_n$ قرار دارد به صورت زیر تعیین می گردد[۵]:

$$P_n = e_0 e_m a(w) \left( \sum_{m \neq n}^{N} E_m + E_n^{inc} \right) \qquad (۲)$$

که در آن $E^{inc}$ میدان تابش نور فرودی، $E_m$ میدان پراکنشی از دوقطبی $m$ ام در محل دوقطبی $n$ام است:

$$\vec{E}_m = \frac{k_0^2}{e_0} \vec{P}_m . \vec{G} \qquad (۳)$$

که در آن $\vec{G}$ تانسور گرین [۶] و $a(w)$ قطبش پذیری نانو ذره فلزی می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$a(w) = \frac{a_0(w)}{1 - \frac{2}{3} i k^3 a_0(w)} \qquad (۴)$$

که در آن $a_0(w)$ رابطه کلازیوس-موسوتی است[۷،۸].

$$a_0(w) = 4pa^3 \frac{e(w) - e_m}{e(w) + 2e_m} \qquad (۵)$$

با جاگذاری معادله (۳) در معادله (۲) یک دستگاه معادلات خطی بدست می آید که با حل آن می توان بردار قطبش و میدان در محل هر نانو ذره را محاسبه کرد [۳].

می توان دو حالت متفاوت برای قطبش نور فرودی در نظر گرفت:

الف) تابش فرودی با قطبش عرضی: گشتاور دوقطبی ها عمود بر امتداد زنجیره باشند.

ب) تابش فرودی با قطبش طولی: گشتاور دوقطبی ها موازی امتداد زنجیره باشند.

## نتایج محاسبات

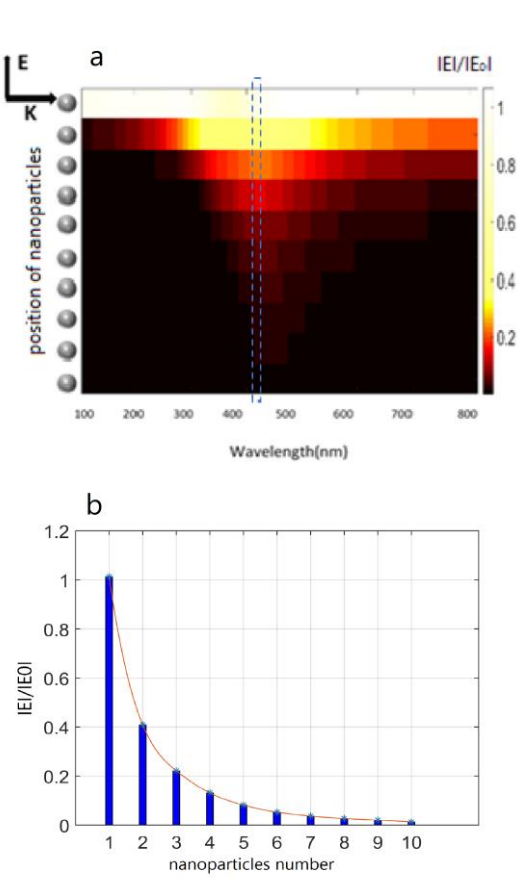
یک زنجیره شامل ۱۰ نانو ذره نقره با قطر $۲۵nm$ و فواصل $۵nm$ از یکدیگر را در خلا در نظر می گیریم که نانو ذره ابتدایی تحت تابش نور با دامنه $E_0$ قرار دارد.

در شکل های (۱) و (۲) به ترتیب برای قطبش های عرضی و طولی، دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات در طول موج های متفاوت محاسبه شده است. مشاهده می گردد که در هر دو قطبش در یک طول موج های خاصی طول انتشار امواج پلاسمونی در امتداد زنجیره بیشینه است.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01 ]

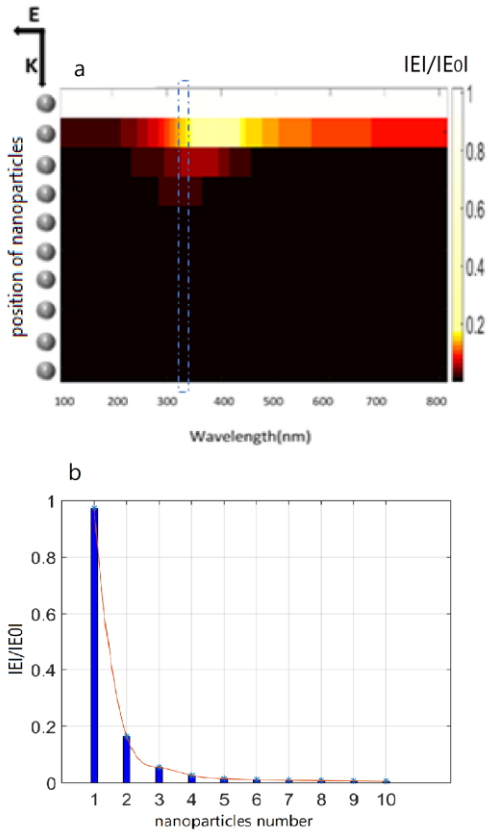



شکل(۲):دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات زنجیره با فواصل ۵ نانو متری در قطبش طولی بر حسب طول موج نور فرودی (a). دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات زنجیره در طول موج ۴۳۳ نانو متر (b).

با مقایسه شکل های (۱) و (۲) مشاهده می گردد طول انتشار در قطبش طولی بیش از قطبش عرضی است (تعداد بیشتری از نانو ذرات برانگیخته شده اند).

با توجه به عملکرد بهتر زنجیره ای از نانو ذرات نقره به عنوان موجبر در قطبش طولی، در ادامه برای بررسی تاثیر فاصله نانو ذرات از یکدیگر، در انتشار امواج پلاسمونی، زنجیره را در قطبش طولی در نظر می گیریم. در شکل های (۳) و (۴) نتیجه محاسبه دامنه میدان برای دو زنجیره متفاوت که در آن فاصله بین نانو ذرات به ترتیب برابر با مقادیر $10\,nm$ و $15\,nm$ است، نشان داده شده است.

مشاهده می گردد طول موجی که در آن طول انتشار بیشینه می شود، وابسته به فاصله بین نانو ذرات است.




شکل(۱):دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات زنجیره با فواصل ۵ نانو متری در قطبش عرضی بر حسب طول موج نور فرودی (a). دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات زنجیره در طول موج ۳۲۵ نانو متر (b).

همان طور که در شکل (1a) مشاهده می گردد هدایت موج توسط نانو ذرات فلزی، فقط در یک بازه محدود طول موجی اتفاق می افتد و زنجیره در این بازه می تواند به عنوان یک موجبر عمل کند. همچنین زنجیره در یک طول موج خاص بیشترین طول انتشار را دارد.

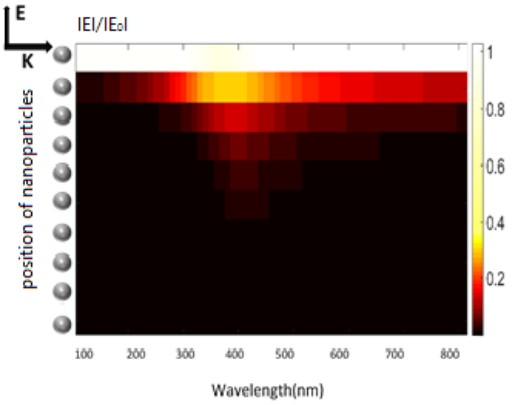
بیشینه طول انتشار در قطبش عرضی در $l = 325\,nm$ روی داده است. دامنه میدان در مکان نانو ذرات زنجیره در این طول موج در شکل (1b) نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (2a) بیشینه طول انتشار در قطبش طولی در $l = 433\,nm$ می باشد. دامنه میدان در مکان هر یک از نانو ذرات زنجیره در این طول موج در شکل (2b) نمایش داده شده است.

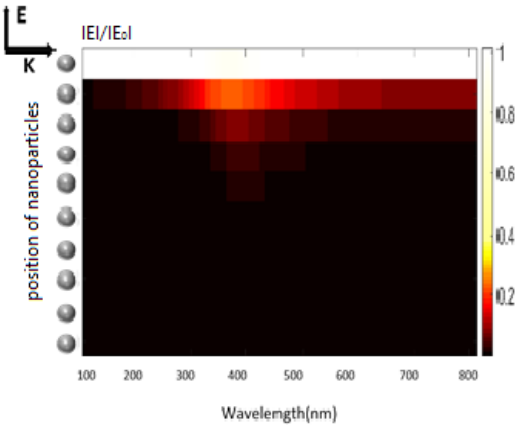


این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01 ]




شکل۳: دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات زنجیره با فواصل۱۰ نانومتری در قطبش طولی برحسب طول موج نور فرودی.




شکل۴ :دامنه میدان الکتریکی در مکان نانو ذرات زنجیره با فواصل۱۵ نانومتری در قطبش طولی برحسب طول موج نور فرودی.

در جدول شماره (۱) طول انتشار ( $L_{sp}$ ) برای هر یک از زنجیره ها، محاسبه شده است:

| قطبش | $d$ | $L_{sp}$ | $l$ |
|---|---|---|---|
| عرضی | $۵nm$ | $۱۲nm$ | $۳۲۵nm$ |
| طولی | $۵nm$ | $۵۱/۹nm$ | $۴۳۳nm$ |
| طولی | $۱۰nm$ | $۴۲nm$ | $۴۰۲nm$ |
| طولی | $۱۵nm$ | $۲۹/۶nm$ | $۳۸۴nm$ |

جدول۱: طول انتشار برای زنجیره شامل۱۰ نانو ذره نقره با قطر ۲۵ نانومتری و با فواصل مختلف ذرات از یکدیگر

با توجه به جدول (۱) مشاهده می گردد که با کاهش فاصله ذرات از هم، به دلیل جفت شدگی شدید نانوذرات و هیبریده شدن تشدیدها، طول موج تشدید زنجیره از طول موج تشدید تک ذره ( $l = ۳۵۴nm$ ) دورتر می‌گردد و انتشار میدان الکتریکی در طول زنجیره افزایش می یابد. نتایج ما با نتایج بدست آمده در بررسی‌های پیشین که برای چند طول موج محدود صورت گرفته است همخوانی دارد[۳،۴].

## نتیجه‌گیری

یک زنجیره شامل ۱۰ نانو ذره نقره به عنوان موجبر پلاسمونیکی در قطبش طولی قابلیت هدایت بهتری نسبت به قطبش عرضی دارد. طول انتشار امواج پلاسمونی در زنجیره بستگی به طول موج نور فرودی و فاصله نانو ذرات از همدیگر دارد. هرچه فاصله ذرات از یکدیگر بیشتر شود به علت کاهش اثر جفت شدگی نانو ذرات، طول انتشار کمتر و طول موجی که در آن بیشینه طول انتشار روی می دهد به طول موج تشدید پلاسمونی تک نانو ذره نزدیک تر است.

## مراجع


[1] Crozier, K. B., et al. "Experimental measurement of the dispersion relations of the surface plasmon modes of metal nanoparticle chains." Optics Express 15.26 (2007): 17482-17493.

[2] Sanchez, D.B, the surface plasmon resonance of supported nobel metal nanoparticles: characterization, laser tailoring, and SERS Aplication, PhD thesis, Mardid University, (2007).

[3] Maier, Stefan A., et al. "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides." Nature materials 2.4 (2003): 229-232.

[4] Weber, W. H., and G. W. Ford. "Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains." Physical Review B 70.12 (2004): 125429.

[5] Koenderink, A. Femius, and Albert Polman. "Complex response and polariton-like dispersion splitting in periodic metal nanoparticle chains." Physical Review B 74.3 (2006): 033402.

[6] Yurkin, Maxim A., and Alfons G. Hoekstra. "The discrete dipole approximation: an overview and recent developments." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 106.1(2007):558-589.

[7] A. Wokaun, J. P. Gordon, and P. F. Liao, Phys. Rev. Lett. 48, 957 (1982).

[8] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd edition (Wiley, New York, 1998), Chap.




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01 ]