بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

جفت‌شدگی غیرخطی دو نانوسیم پلاسمونیکی جفت‌شده با حضور اثر کر و جذب دوفوتونی

فروزان حبیبی ، امین قادی

دانشکده فیزیک دانشگاه مازندران، خیابان طالقانی، بابلسر، مازندران

چکیده - برهمکنش غیرخطی نانو سیم‌های پلا سمونیکی از مو ضوعات مهم در مدارات مجتمع اپتیکی ا ست. در این مقاله به برر سی اثرات جفت شدگی غیرخطی در دامنه‌های مختلف بر روی دو نانو سیم پلا سمونیکی از جنس نقره در ح ضور اثر کر و حالتی دیگر که محیط هم دارای اثر کر و هم اثر جذب دوفوتونی اســـت، می‌پردازیم. نتایج نشـــان می‌دهد که اثرات غیرخطی با حضـــور اثر جذب دوفوتونی در دامنه‌های ورودی خیلی پایینتری نسبت به اثر کر ظاهر می شود. نتایج نشان می‌دهد این اختلاف در شدت‌ها از مرتبه 10^2 برابر است. بدین معنی که اثر کر در شدت‌های بسیار بالاتری نسبت به اثر جذب دوفوتونی رخ می‌دهد. همچنین، اثرات غیرخطی موجب کاهش جاجایی موج پلاسمونیکی بین دو موجبر نانوسیم می‌شود.

کلید واژه- اثر جذب دو فوتونی، اثر کر، نانوسیم، جفت شدگی غیرخطی.

Nonlinear coupling of two nonlinear coupled Plasmonic nanowires in the presence of Kerr and two-photon absorption

Forouzan Habibi, Amin Ghadi

Department of Physics, University of Mazandaran, Mazandaran

Abstract- The nonlinear interactions of coupled nanowires are important phenomena in data processing of integrated photonic circuits. In this paper, we investigate the nonlinear coupling of two silver nonlinear coupled plasmonic nanowires under different amplitudes in the presence of Kerr effect, and the other case the medium has Kerr and two photon absorption (TPA) effect too. The results show that in the presence of two-photon absorption effect the nonlinear optical effects appear in lower initial amplitudes Kerr effect. Our results show that this difference is in order to 10^2. This means that the Kerr effect occurs in upper intensities than the two-photon absorption effect. Also, nonlinear effect leads to decrease the exchange of plasmonic waves between two nanowires.

Keywords: two-photon absorption effect, Kerr effect, nanowire, nonlinear coupling.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

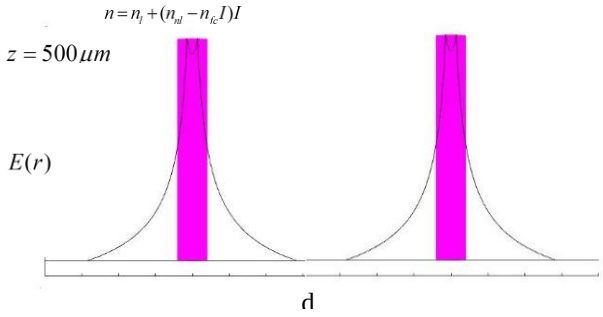
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

مطالعه بر روی آثار پلاسمونیکی از سالها قبل آغاز شده است [۱]. امروزه ابزارهای فوتونیکی در مقیاس نانو بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است [۲]. ازینرو، در سال ۲۰۱۳ گروهی از دانشمندان بر روی پلاسمون‌ها در یک جفت نانو سیم مطالعه کرده‌اند [۳]. مطالعات زیادی نیز بر روی موجبرها انجام شده است که از بین آنها بررسی جفت‌شدگی دو موجبر بوده است [۴]. نتایج مطالعات پیشین دانشمندان و محققان نشان می‌دهد که آثار پلاسمونیکی برای نانوسیم-های فلزی در اثر میدان‌های الکترومغناطیسی حاکم بر نانوسیم‌ها منجر به آثار جفت‌شدگی غیرخطی می‌شود. همچنین تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، هنگامی که نور با نانوساختارهای فلزی در تعامل است، می تواند باعث تحریک الکترون‌ها در نزدیکی سطح فلز شود [۵]. الکترون‌ها در پاسخ به میدان الکترومغناطیسی اعمال شده نوسان می کنند و حرکت آن‌ها از طریق تصادم با یک فرکانس برخورد مشخص γ میرا می‌شود. در حالتی که حرکت جمعی الکترون‌ها پلاسمون را به وجود می‌آورد، تابع دی الکتریک نانوسیم پلاسمونیکی $\varepsilon(\omega)=1-(\omega_p^2/\omega^2+i\Gamma\omega)$ است. ما در این مقاله به بررسی دو نانوسیم فلزی می‌پردازیم که در یک محیط دی الکتریک قرار گرفته‌اند. شکل (۱) تصویری از شبکه پلاسمونیکی دارای دو نانوسیم را نشان می‌دهد. نانوسیم ها از جنس فلز نقره هستند که در محیط دی الکتریک قرار گرفته‌اند. فاصله آنها d و شعاع هر دو نانوسیم r است. به دلیل اینکه نانوسیم‌ها به شکل استوانه هستند در مختصات استوانه ای مد میدان به صورت توابع بسل زیر هستند [۳].

$$\begin{cases} E^i = \sum_{m=0}^{\infty} C_m J_m(h_i r) e^{im\theta} e^{ik_z z} \\ E^o = \sum_{m=0}^{\infty} D_m H_m(h_o r) e^{im\theta} e^{ik_z z} \end{cases} \quad (۱)$$

در معادلات (۱) و (۳) $k_i=\sqrt{\varepsilon^i}\,\omega/c$ و $k_o=\sqrt{\varepsilon^o}\,\omega/c$ و $h_i=\sqrt{k_i^2-k_z^2}$ و $h_o=\sqrt{k_o^2-k_z^2}$ تعریف می شوند که i مربوط به داخل نانوسیم و o مربوط به خارج نانوسیم است.



شکل ۱ : تصویر شماتیک از میدان های درون دو نانولوله جفت شده.

در معادله (۲)، ε ثابت گذردهی نانوسیم فلزی است. $\Gamma=2.73\times10^{13}Hz$ و $\omega_p=13.7\times10^{16}Hz$ است. پس از به دست آوردن ثابت انتشار از حل معادله پراکندگی (۲)، به دلیل جفت‌شدگی دو نانوسیم، دو دسته معادلات جفت‌شده خواهیم داشت، که به صورت زیر هستند [۴].

$$-i\partial A_1/\partial z = Q_1A_1 + Q_2A_2 + \left(Q_3|A_1|^2 + 2Q_4|A_2|^2\right)A_1 - (Q_5|A_1(z)|^4 + 6Q_6|A_1(z)|^2|A_2(z)|^2)A_1(z) \quad (۳)$$

$$-i\partial A_2/\partial z = Q_1A_2 + Q_2A_1 + \left(Q_3|A_2|^2 + 2Q_4|A_1|^2\right)A_2 - (Q_5|A_2(z)|^4 + 6Q_6|A_2(z)|^2|A_1(z)|^2)A_2(z) \quad (۴)$$

A_1 و A_2 بترتیب دامنه‌های موج پلاسمونیکی نانوسیم اول و دوم می‌باشد. ضرایب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Q_1 = \frac{\omega\varepsilon_0}{4P_0}\int(n_l^2-(n_l^{(1)})^2)|E_1|^2dxdy \quad (۵\text{-}۱)$$

$$Q_2 = \frac{\omega\varepsilon_0}{4P_0}\int(n_l^2-(n_l^{(1)})^2)E_1.E_2^*dxdy \quad (۵\text{-}۲)$$

$$Q_3 = \frac{\varepsilon_0 n_l n_{nl}\omega\gamma}{2P_0}\int|E_1|^4dxdy \quad (۵\text{-}۳)$$

$$Q_4 = \frac{\varepsilon_0 n_l n_{nl}\omega\gamma}{2P_0}\int|E_1|^2|E_2|^2dxdy \quad (۵\text{-}۴)$$

$$Q_5 = \frac{n_l n_{fc}\omega\varepsilon_0\gamma^2}{2P_0}\int dxdy|E_1|^6 \quad (۵\text{-}۵)$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

$$Q_6 = \frac{\varepsilon_0 n_l n_{fc} \omega \gamma^2}{2P_0} \int |E_1|^4 |E_2|^2 \, dxdy \qquad (۵-۶)$$

n_0، n_l، n_{nl} و n_{fc} به ترتیب ضریب شکست محیط، ضریب شکست خطی، ضریب شکست غیرخطی، ضریب شکست حامل‌های آزاد هستند. همچنین γ به صورت $\gamma = n_l \varepsilon_0 c$ تعریف می‌شود. در یک محیط غیرخطی ضریب شکست و ضریب جذب با تغییر شدت، تغییر می‌کنند. این دو ضریب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$n = n_l + (n_{nl} - n_{fc} I) I, \alpha = \alpha_0 + (\alpha_2 - \alpha_{fc} I) I \qquad (۶)$$

جمله Q_1 از همپوشانی میدان مد با خودش بوجود می‌آید. جمله Q_2 به دلیل وجود یک مد در محور مجاور بوجود می‌آید و منجر به جفت‌شدگی خطی بین موجبرها می‌شود. جملات غیرخطی، Q_3 و Q_4 ، از اثر کر ناشی می‌شوند که به ترتیب با برهمکنش غیرخطی یک مد با خود و یک مد با محور مجاور به وجود می‌آید. مشاهده می‌شود که جملات غیرخطی، Q_5 و Q_6 از اثر حامل‌های آزاد بر ضریب شکست محیط ناشی می‌شود. این جملات به ترتیب با برهمکنش غیرخطی یک مد با خود و یک مد با محور مجاور مطابقت دارد. P_0 در معادلات بالا توان بهنجار است. توان کل و هم چنین شدت با دو معادله زیر تعریف می‌شود.

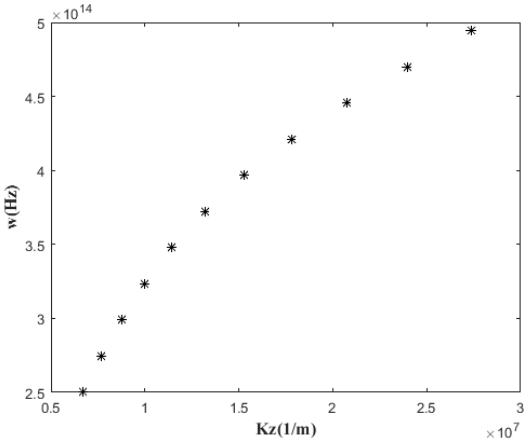
$$I = P/A(A = 1\mu m) \qquad P = |A(z)|^2 P_0 \qquad (۷)$$

همچنین شدت در حالتی که حامل‌های آزاد و اثر جذب دوفوتونی در محیط وجود داشته باشند به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \qquad (۸)$$

روش انجام کار

در این مقاله ابتدا ثابت انتشار k_z را با استفاده از معادلات (۲) بدست می‌آوریم. این مقدار با در نظر گرفتن $\lambda = 1550\eta m$ ، $\omega = 250THz$ ، $n_0 = 3/3$ ، $n_l = 3/5$ ، $n_{nl} = 3/3 \times 10^{-13}$ ، $n_{fc} = 7/45 \times 10^{-24}$ به مقدار $k_z = 5\mu m^{-1}$ به دست می‌آید. شکل (۲) نمودار تغییر فرکانس بر حسب ثابت انتشار مربوط به دو نانوسیم در مد $m = 0$ است. ضریب جذب دو فوتونی (α) برابر با $\alpha = 0/102$ است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس ثابت انتشار افزایش می‌یابد. این نتیجه معمولاً برای همه آثار پلاسمونی به صورت مشابه به دست می‌آید. پس از به دست آوردن ثابت انتشار برای مد TM به ازای $m = 0$ میدان‌های نانوسیم را با استفاده از معادله (۲) به دست می آوریم. سپس با استفاده از معادلات (۳) و (۴) نمودارهای دامنه را برای نانوسیم‌ها محاسبه می‌کنیم.



شکل۲: نمودار تغییر فرکانس بر حسب ثابت انتشار (k_z) مربوط به دو نانوسیم پلاسمونی جفت شده غیر خطی در مد $m = 0$.

پیش از این، این نتایج برای حالتی که در محیط فقط اثر کر وجود داشته است، به دست آمده است. اکنون این نتایج را با در نظر گرفتن جملات Q_5 و Q_6 به دست می‌آوریم. در شکل (۳) و (۴) با افزایش دامنه، در حضور اثر جذب دو فوتونی و کر به ازای دامنه $6/3 \times 10^8$ شدت برابر $0/005$ به دست آمده است و جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم به صورت خطی است. در حالیکه به ازای دامنه 8×10^8 و $8/3 \times 10^8$، شدت به ترتیب برابر $0/006$ و $0/075$ به دست آمده است، جابه‌جایی موج غیرخطی است و انتقال انرژی بین دو نانوسیم کاهش می یابد. این نتایج در حضور

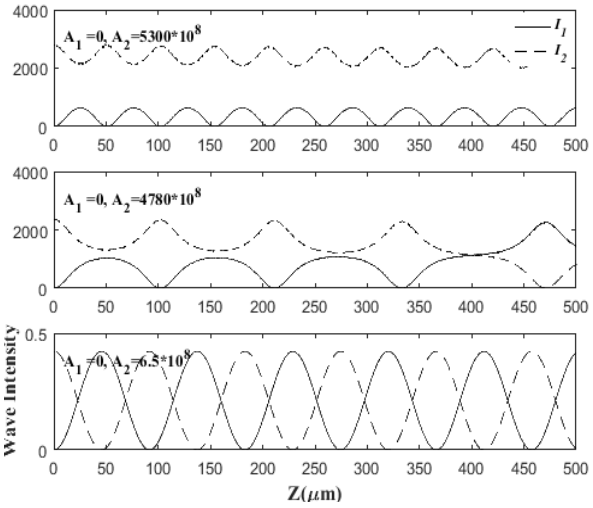
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

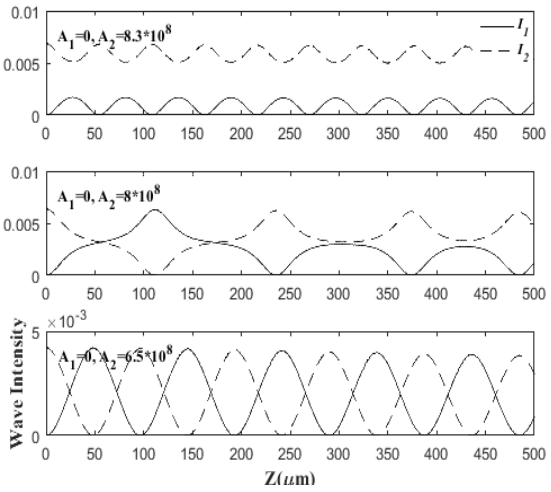
اثر کر بتنهایی در دامنه بسیار بزرگتری و در حدود صد برابر نسبت به شدت اثر جذب دوفوتونی مشاهده می‌شود. به ازای دامنه 8×10^{8} در حضور اثر جذب دوفوتونی و به ازای دامنه 4780×10^{8} در حضور اثر کر، جفت شدگی پنجاه پنجاه رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثرات جفت‌شدگی غیرخطی دو نانوسیم پلاسمونیکی به دلیل حضور اثرات جذب دوفوتونی و کر پرداختیم. نمودارهای شدت برای دو نانوسیم پلاسمونیکی جفت‌شده غیرخطی رسم شده است. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش دامنه میدان اولیه دو نانوسیم، میزان جابجایی موج بین دونانوسیم جفت‌شده تغییر می‌کند و کاهش می‌یابد. با مقایسه حالت‌های مربوط به محیط دارای اثر کر و محیط دارای اثر جذب دوفوتونی نتیجه می گیریم، اثرات اپتیک غیرخطی در محیطی که صرفاً اثر کر است در دامنه های بیشتری نسبت به محیطی که اثر جذب دوفوتونی وجود دارد، دیده می‌شود. به این معنا که اثرات اپتیکی غیرخطی در حضور اثر جذب دوفوتونی در دامنه‌های بسیار کمتری نسبت به حالتی است که تنها اثر کر وجود داشته باشد.



شکل۳: نمودار دامنه‌های دو نانولوله جفت شده غیرخطی پلاسمونی 1 و 2 در حضور اثر کر در فاصله انتشار500 نانومتر.



شکل۴: نمودار شدت های دو نانولوله جفت شده غیرخطی پلاسمونی 1 و 2 در حضور اثر جذب دوفوتونی در فاصله انتشار 500 نانومتر.

مرجع‌ها

[1] D. Pines, D. Bohm, "A Collective Description of Electron Interactions: II. Collective vs Individual Particle Aspects of the Interactions", Phys. Rev., Vol. 85, pp. 338-353, 1952.

[2] Z. Wang, Q. Weibin, R. Junbo, L. Zhili, Q. Pingping, K. Qiang, "A refractive index from negative to positive of graphene plasmonic crystal at the Dirac-like cone in mid-infrared region", Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, Vol. 37, pp. 100745-100752, 2019.

[3] S. Sun, C. Hung-Ting, "Dispersion relation, propagation length and mode conversion of surface Plasmon Polariton in silver double-nanowire systems", Opt. Exp., Vol. 21, pp. 4591, 2013.

[4] A .Ghadi, S. Mirzanezhad, F .Sohbatzadeh, "Numerical study of Two Photon Absorption effect on nonlinear directional couplers on coupled semiconductor waveguides", Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, Vol. 7, No. 4, pp. 198-205, 2009.

[5] S. A. Maier, Plasmonics: Fundamentals and Applications, p. 224, Springer; 2007.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

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