



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 پلاسمونیک جفت‌شده با حضور اثر کر و جذب دوفوتونی

فروزان حبیبی، امین قادی

دانشکده فیزیک دانشگاه مازندران، خیابان طالقانی، بابلسر، مازندران

چکیده - برهمکنش غیرخطی نانوسیم‌های پلاسمونیک از موضوعات مهم در مدارات مجتمع اپتیکی است. در این مقاله به بررسی اثرات جفت‌شدگی غیرخطی در دامنه‌های مختلف بر روی دو نانوسیم پلاسمونیک از جنس نقره در حضور اثر کر و حالتی دیگر که محیط هم دارای اثر کر و هم اثر جذب دوفوتونی است، می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که اثرات غیرخطی با حضور اثر جذب دوفوتونی در دامنه‌های ورودی خیلی پایینتری نسبت به اثر کر ظاهر می‌شود. 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 جابجایی موج پلاسمونیک بین دو موجبر نانوسیم می‌شود.

کلید واژه- اثر جذب دو فوتونی، اثر کر، نانوسیم، جفت‌شدگی 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.

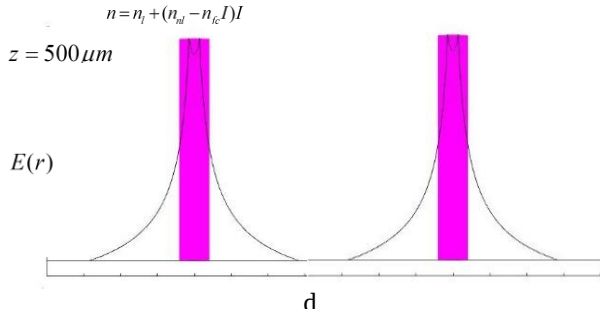
Keywords: two-photon absorption effect, Kerr effect, nanowire, nonlinear coupling.

مقدمه

مطالعه بر روی آثار پلاسمونیک از سالها قبل آغاز شده است [۱]. امروزه ابزارهای فوتونیک 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 پلاسمونیک برای نانوسیم‌های 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، می‌تواند باعث تحریک الکترون‌ها در نزدیکی سطح فلز شود [۵]. الکترون‌ها در پاسخ به میدان الکترومغناطیسی اعمال شده نوسان می‌کنند 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 دی‌الکتریک نانوسیم پلاسمونیک $\epsilon(\omega) = 1 - (\omega_p^2 / \omega^2 + i\Gamma\omega)$ است. ما در این مقاله به بررسی دو نانوسیم فلزی می‌پردازیم که در یک محیط دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند. شکل (۱) تصویری از شبکه پلاسمونیک دارای دو نانوسیم را نشان می‌دهد. نانوسیم‌ها از جنس فلز نقره هستند که در محیط دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند. فاصله آنها d و شعاع هر دو نانوسیم r است. به دلیل اینکه نانوسیم‌ها به شکل استوانه هستند در مختصات استوانه‌ای مد میدان به صورت توابع بسل زیر هستند [۳].

$$\begin{cases} E^i = \sum_{m=0}^{\infty} C_m J_m(h_i r) e^{im\theta} e^{ik_z z} \\ E^o = \sum_{m=0}^{\infty} D_m H_m(h_o r) e^{im\theta} e^{ik_z z} \end{cases} \quad (1)$$

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



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

در معادله (۲)، ϵ ثابت گذردهی نانوسیم فلزی است. $\Gamma = 2.73 \times 10^{13} \text{ Hz}$ و $\omega_p = 13.7 \times 10^{16} \text{ Hz}$ 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].

$$\begin{aligned} -i\partial A_1 / \partial z &= Q_1 A_1 + Q_2 A_2 + (Q_3 |A_1|^2 + 2Q_4 |A_2|^2) A_1 \\ &- (Q_5 |A_1(z)|^4 + 6Q_6 |A_1(z)|^2 |A_2(z)|^2) A_1(z) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} -i\partial A_2 / \partial z &= Q_1 A_2 + Q_2 A_1 + (Q_3 |A_2|^2 + 2Q_4 |A_1|^2) A_2 \\ &- (Q_5 |A_2(z)|^4 + 6Q_6 |A_2(z)|^2 |A_1(z)|^2) A_2(z) \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$Q_1 = \frac{\omega \epsilon_0}{4P_0} \int (n_l^2 - (n_l^{(1)})^2) |E_1|^2 dx dy \quad (5-1)$$

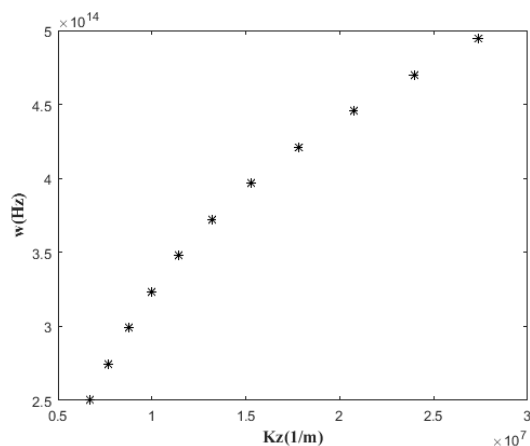
$$Q_2 = \frac{\omega \epsilon_0}{4P_0} \int (n_l^2 - (n_l^{(1)})^2) E_1 \cdot E_2^* dx dy \quad (5-2)$$

$$Q_3 = \frac{\epsilon_0 n_l n_m \omega \gamma}{2P_0} \int |E_1|^4 dx dy \quad (5-3)$$

$$Q_4 = \frac{\epsilon_0 n_l n_m \omega \gamma}{2P_0} \int |E_1|^2 |E_2|^2 dx dy \quad (5-4)$$

$$Q_5 = \frac{n_l n_{fc} \omega \epsilon_0 \gamma^2}{2P_0} \int dx dy |E_1|^6 \quad (5-5)$$

مقدار $n_{fc} = 7/45 \times 10^{-24}$ ، $n_{nl} = 3/3 \times 10^{-13}$ 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 می‌آوریم. سپس با استفاده از معادلات (۳) و (۴) نمودارهای دامنه را برای نانوسیم‌ها محاسبه می‌کنیم.



شکل ۲: 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 می‌یابد. این نتایج در حضور

$$Q_6 = \frac{\varepsilon_0 n_l n_{fc} \omega \gamma^2}{2P_0} \int |E_1|^4 |E_2|^2 dx dy \quad (5-6)$$

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

$$n = n_l + (n_{nl} - n_{fc} I) I, \alpha = \alpha_0 + (\alpha_2 - \alpha_{fc} I) I \quad (6)$$

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 هم‌چنین شدت با دو معادله زیر تعریف می‌شود.

$$I = P/A (A = 1 \mu m) \quad P = |A(z)|^2 P_0 \quad (7)$$

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

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (8)$$

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 $n_l = 3/5$ ، $n_0 = 3/3$ ، $\omega = 250 THz$ ، $\lambda = 1550 nm$

بسیار کمتری نسبت به حالتی است که تنها اثر کر وجود داشته باشد.

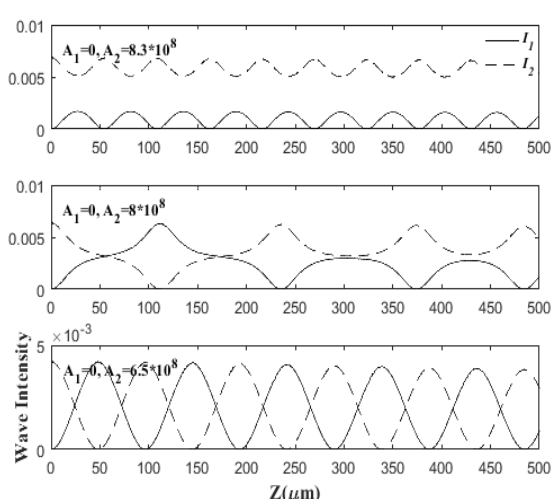
مرجع ها

- [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. Sohbatazadeh, "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.

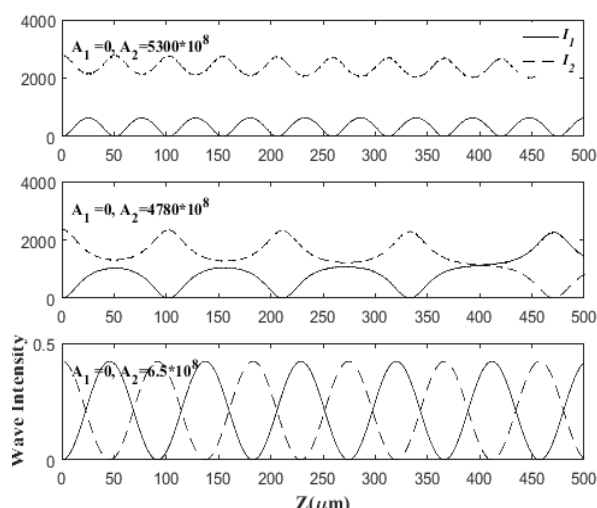
اثر کر بتنهایی در دامنه بسیار بزرگتری و در حدود صد برابر نسبت به شدت اثر جذب دوفوتونی مشاهده می شود. به ازای دامنه 8×10^8 در حضور اثر جذب دوفوتونی و به ازای دامنه 4780×10^8 در حضور اثر کر، جفت شدگی پنجاه پنجاه رخ می دهد.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثرات جفت شدگی غیرخطی دو نانوسیم پلاسمونیک به دلیل حضور اثرات جذب دوفوتونی و کر پرداختیم. نمودارهای شدت برای دو نانوسیم پلاسمونیک جفت شده غیرخطی رسم شده است. نمودارها نشان می دهند که با افزایش دامنه میدان اولیه دو نانوسیم، میزان جابجایی موج بین دونانوسیم جفت شده تغییر می کند و کاهش می یابد. با مقایسه حالت های 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 می شود. به این معنا که اثرات اپتیک غیرخطی در حضور اثر جذب دوفوتونی در دامنه های



شکل ۲: نمودار شدت های دو نانولوله جفت شده غیرخطی پلاسمونی ۱ و ۲ در حضور اثر جذب دوفوتونی در فاصله انتشار ۵۰۰ نانومتر.



شکل ۳: نمودار دامنه های دو نانولوله جفت شده غیرخطی پلاسمونی ۱ و ۲ در حضور اثر کر در فاصله انتشار ۵۰۰ نانومتر.