



جفت‌شدگی غیر خطی دو نانوسیم پلاسمونیک جفت شده با حضور اثر کر و جذب دوفوتونی در مدهای TM_{00} و TM_{10}

فروزان حبیبی، امین قادی و سعید میرزائزاد

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران

پست الکترونیکی: a.ghadi@umz.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷)

چکیده

برهم‌کنش غیر خطی نانوسیم‌های پلاسمونیک از موضوعات مهم در مدارات مجتمع اپتیکی است. در این مقاله به بررسی اثرات جفت‌شدگی غیرخطی برای دو مد TM_{00} و TM_{10} در دامنه‌های مختلف بر روی دو نانوسیم پلاسمونیک از جنس نقره در حضور اثر کر و حالتی دیگر که محیط علاوه بر اثر کر جذب دوفوتونی نیز دارد، می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که اثرات غیرخطی با حضور اثر جذب دوفوتونی در دامنه‌های ورودی خیلی پایین تری نسبت به اثر کر ظاهر می‌شود. اثر کر در شدت‌های بسیار بالاتری نسبت به اثر جذب دوفوتونی رخ می‌دهد و اثرات اپتیکی غیرخطی موجب کاهش جابه‌جایی موج پلاسمونیک بین دو موجبر نانوسیم می‌شود. مقادیر طول جفت‌شدگی (L_c) - که این طول کمترین مسافتی است که طی آن در محیط جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم صد در صد است - در مد TM_{00} کمتر از مد TM_{10} است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش شدت در یک طول جفت‌شدگی به ازای دامنه میدان‌های اولیه مختلف منجر به افزایش راندمان جفت‌شدگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اثر جذب دو فوتونی، اثر کر، نانوسیم، جفت‌شدگی غیر خطی

۱. مقدمه

این نوع موجبر به عنوان خط انتقال در بسامدهای میکروویو استفاده می‌شود، نانوسیم‌ها گروهی از موجبرها هستند که با وجود مطالعات گسترده‌ای که در رابطه با آنها انجام شده است هنوز مورد علاقه دانشمندان است از آن جمله می‌توان به مطالعه بر روی نانوسیم‌های ابرسانا [۳]، نانوسیم‌های فلزی تک‌کریستال [۴]، لیزر نانوسیم [۵]، جذب کننده نانوسیم برای فوتودکتور [۶]، شبکه کوانتومی نانوسیم [۷] و اثرات گرمایی در نانوسیم نقره [۸] نام برد. موجبرها معمولاً به دو نوع فلزی و

امروزه ابزارهای فوتونیک در مقیاس نانو بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱ و ۲]. موجبرها یکی از این ابزارهای فوتونیک هستند. آنها مانند خطوط انتقال ساختارهایی هستند که موج الکترومغناطیس را از یک نقطه به نقطه دیگر هدایت می‌کنند. آنها قادرند یک سیگنال را با کمترین اتلاف انرژی در یک یا دو بعد منتشر کنند. نوع معمول و رایج آن یک لوله فلزی توخالی است که امواج رادیویی را هدایت می‌کند.

مشخص γ میرا می‌شود. در حالتی که حرکت جمعی الکترون‌ها پلاسمون را به وجود می‌آورد، تابع دی‌الکتریک نانوسیم پلاسمونیک با استفاده از مدل لورنتس-درود به صورت

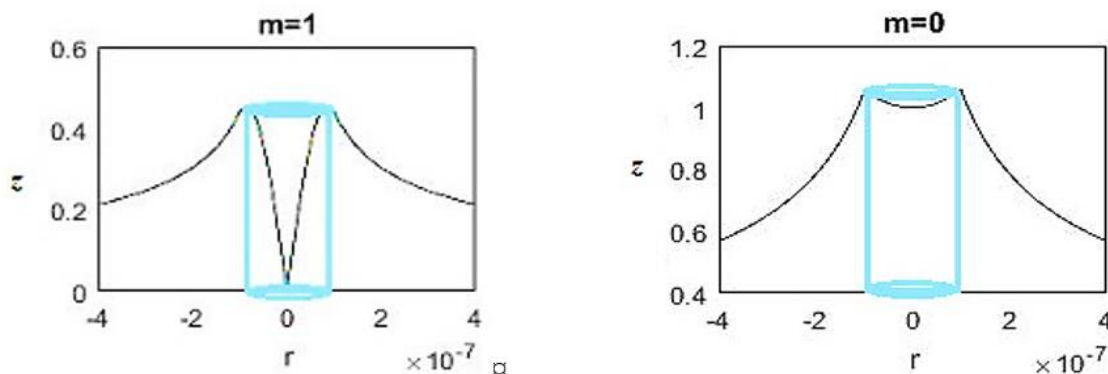
$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_d^2}{\omega^2 + i\omega\gamma_d} - \sum_{n=1}^r \frac{\Delta\varepsilon_{Ln}\omega_{Ln}^2}{\omega^2 - \omega_{Ln}^2 + i\gamma_{Ln}}$$

مقادیر $\varepsilon_{\infty} = 1$ ، $\omega_d = 1/3877 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ ، $\omega_{L1} = 3/254 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ ، $\gamma_d = 1/87 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ ، $\Delta\varepsilon_{L1} = 0/089$ ، $\gamma_{L1} = 1/165 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ و $\gamma_{Lr} = 3/46 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ ، $\omega_{Lr} = 7/758 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ است [۲۹ و ۳۰]. در سال ۲۰۰۹ در مقاله‌ای تحت عنوان مطالعه عددی اثر جذب دوفوتونی در جفت شونده‌های غیر خطی در موجبرهای جفت شده به بررسی دقیق اثر جذب دوفوتونی پرداختیم [۱۸]، اکنون در ادامه پژوهش قبل در این مقاله ما به بررسی دو نانوسیم فلزی می‌پردازیم که در یک محیط دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند که دارای آثار غیر خطی است. قصد داریم با بررسی آثار جفت‌شدگی در مقیاس زیر حد طول موج در دو مد مختلف به نتایج جدید و مفیدی در رابطه با این ابزار پلاسمونی دست یابیم. به این منظور با به دست آوردن ثابت انتشار در دو مد TM_{00} و TM_{10} و سپس به دست آوردن شدت به ازای دامنه میدان‌های مختلف نتایج را رسم و برای دو مد مورد نظر مقایسه قرار می‌دهیم.

۲. تئوری

شکل ۱ تصویری از شبکه پلاسمونیک دارای دو نانوسیم را نشان می‌دهد. خطوط مشکی پروفایل میدان الکتریکی است. نانوسیم‌ها از جنس فلز نقره هستند که در محیط دی‌الکتریک با ضریب شکست n قرار گرفته‌اند. فاصله آنها d و شعاع هر نانوسیم r است. به دلیل این که نانوسیم‌ها به شکل استوانه هستند، در مختصات استوانه‌ای مد، میدان به صورت توابع بسل معادله (۱) هستند [۹]. در معادله (۲)، $k_i = \sqrt{\varepsilon^i} \omega/c$ 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 می‌شوند که

دی‌الکتریک طبقه‌بندی می‌شوند. موجبرهای فلزی به طور معمول به شکل لوله های فلزی هستند. فلزی بودن می‌تواند منجر به آثار پلاسمونی در موجبرها شود. مطالعه بر روی آثار پلاسمونیک از سال‌ها قبل آغاز شده است [۹] از جمله تحقیقات در زمینه پلاسمونیک مطالعه بر روی حسگرهای پلاسمونی [۱۰]، مطالعه بر روی نانوذرات پلاسمونی [۱۱]، اثر پلاسمونیک سطحی نانوذرات طلا و نقره [۱۲]، مطالعه بر روی لیزر پلاسمونی [۱۳]، ساخت آرایه‌های نانوذرات نقره پلاسمونی [۱۴] را می‌توان نام برد. پلاسمونی بودن موجبرها پیامدهای مختلفی دارد، از جمله می‌توان به بالابردن راندمان تولید امواج اشاره کرد. ویژگی امواج منتشر شده در موجبرها و خطوط انتقال کاملاً متفاوت است. این تفاوت ناشی از هندسه متفاوت برای خط انتقال و موجبر است. به دلیل علاقه دانشمندان به کار در مقیاس زیر حد طول موج از موجبرهای پلاسمونی در اندازه نانو استفاده‌های زیادی می‌شود [۱۵]. انتشار در آرایه‌ی موجبرها [۱۶ و ۱۷] منجر به آثار جفت‌شدگی می‌شود. از این رو مطالعات زیادی بر روی جفت‌شدگی موجبرها انجام شده است که از بین آنها بررسی جفت‌شدگی دو موجبر [۱۸ و ۱۹]، جفت‌شدگی چندین موجبر [۲۰]، جفت‌شدگی نانوسیم‌های فلزی [۲۱] و جفت‌شدگی نانوسیم‌های آرایه‌ای [۲۲] بوده است. در سال ۲۰۱۳ گروهی از دانشمندان بر روی یک جفت نانوسیم پلاسمونی مطالعه کرده‌اند [۲۳]. نتایج مطالعات پیشین دانشمندان و محققان نشان می‌دهد که آثار پلاسمونیک برای دستگاه‌های مختلف نانوسیم‌های فلزی [۲۴] در اثر میدان‌های الکترومغناطیسی حاکم بر نانوسیم‌ها منجر به آثار جفت‌شدگی غیرخطی می‌شود [۲۵]. پیش از این مطالعات زیادی نیز بر روی شبکه‌های پلاسمونی انجام شده است که از آن میان به مطالعه بر روی سالیتون‌های شبکه پلاسمونی می‌توان اشاره کرد [۲۶] و [۲۷]. همچنین تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، هنگامی که نور با نانوساختارهای فلزی در تعامل است، می‌تواند باعث تحریک الکترون‌ها در نزدیکی سطح فلز شود [۲۸]. الکترون‌ها در پاسخ به میدان الکترومغناطیسی اعمال شده نوسان می‌کنند و حرکت آنها از طریق تصادم با یک بسامد برخورد



شکل ۱. طرحواره‌ای از میدان‌های درون نانوسیم به شعاع ۱۰۰ نانومتر در مد $TM_{0,0}$ و $TM_{1,0}$.

محیط و تغییر در ضریب شکست محیط شبیه به لنز عمل می‌کند و پرتو نور متمرکز می‌شود. اثر جذب دوفوتونی در یک محیط یک فرایند جذب غیرخطی است که به موجب آن دو فوتون به طور همزمان توسط یک اتم یا یون جذب می‌شوند و یک الکترون از سطح انرژی پایین‌تر به سطح انرژی بالاتر ارتقا می‌یابد. تحت این شرایط، اثر جذب دوفوتونی منجر به تابش دو فوتون برانگیخته می‌شود و حالت برانگیخته ایجاد شده توسط این اثر با انتشار خودبه‌خودی به حالت با انرژی پایین فروافت می‌کند. در این حالت انرژی با اتلاف همراه است. در این اثر انتقال نوری جذب دوفوتونی به مربع شدت نور بستگی دارد. به دلیل جفت‌شدگی دو نانوسیم، دو دسته معادلات جفت شده خواهیم داشت، که به صورت زیر هستند [۱۵ و ۳۱]:

$$\frac{-i\partial A_1(z)}{\partial z} = Q_1 A_1(z) + Q_2 A_2(z) + (Q_2 |A_1(z)|^2 + r Q_3 |A_2(z)|^2) \exp(-\alpha z) A_1(z) - (Q_1 |A_1(z)|^2 + \epsilon Q_4 |A_2(z)|^2) \exp(-r\alpha z) A_2(z), \quad (3)$$

$$\frac{-i\partial A_2(z)}{\partial z} = Q_1 A_2(z) + Q_2 A_1(z) + (Q_2 |A_1(z)|^2 + r Q_3 |A_2(z)|^2) \exp(-\alpha z) A_2(z) - (Q_1 |A_2(z)|^2 + \epsilon Q_4 |A_1(z)|^2) \exp(-r\alpha z) A_1(z), \quad (4)$$

$A_1(z)$ و $A_2(z)$ به ترتیب دامنه‌های موج پلاسمونیکی نانوسیم اول و دوم است. ضرایب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q_1 = \frac{\omega \epsilon_0}{r P_0} \int (n_1^2 - (n_1^{(1)})^2) |E_1|^2 dx dy, \quad (1-5)$$

$$Q_2 = \frac{\omega \epsilon_0}{r P_0} \int (n_1^2 - (n_1^{(1)})^2) E_1 E_2^* dx dy, \quad (2-5)$$

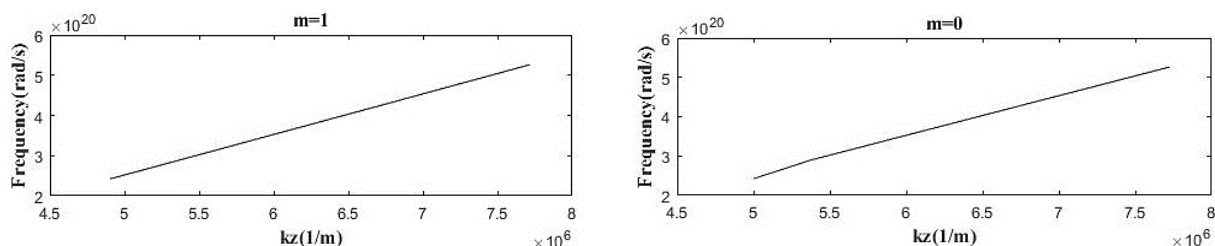
$$Q_3 = \frac{\epsilon_0 n_1 n_2 \omega \gamma}{r P_0} \int |E_1|^2 dx dy, \quad (3-5)$$

مربوط به داخل نانوسیم و ۰ مربوط به خارج نانوسیم است. m در اینجا مقادیر صفر و یک را دارد. ϵ ثابت گذردهی نانوسیم فلزی است.

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

$$\begin{cases} \kappa_i^r \kappa_o^r \left[\kappa_o \epsilon^i \frac{I_m'(\kappa_i R)}{I_m(\kappa_i R)} - \kappa_i \epsilon^o \frac{K_m'(\kappa_o R)}{K_m(\kappa_o R)} \right] \\ \left[\kappa_o \frac{I_m'(\kappa_i R)}{I_m(\kappa_i R)} - \kappa_i \frac{K_m'(\kappa_o R)}{K_m(\kappa_o R)} \right] = \frac{m^r k_z^r}{R^r} (\epsilon^o - \epsilon^i)^r \frac{W^r}{c^r}, \end{cases} \quad (2)$$

پس از به دست آوردن ثابت انتشار از حل معادله پراکندگی (۲)، نمودار ثابت انتشار بر حسب بسامد برای مدهای مختلف در محیط خطی قابل رسم است [۹]. همچنین برای حالتی که محیط غیر خطی در نظر گرفته شود، برای دو مد $m=0$ و $m=1$ به صورت شکل ۱ رسم می‌شود. نمودار تغییرات ثابت انتشار بر حسب فرکانس در شکل ۲ برای دو مد $m=0$ و $m=1$ رسم شده است که نشان داده‌ایم که با افزایش فرکانس، ثابت انتشار افزایش یافته است. از جمله آثار غیر خطی که در اثر قطبش غیر خطی در محیط به وجود می‌آیند اثر کر و اثر جذب دوفوتونی هستند که ما در اینجا برای محیط پیرامون دو نانوسیم فلزی مورد بررسی قرار می‌دهیم. در محیط غیر خطی پاسخ میدان به قطبش غیر خطی به صورت غیر خطی است. در اثر کر، پاسخ به اعمال میدان الکتریکی به صورت تغییر در ضریب شکست است. به دلیل وجود این اثر غیر خطی در



شکل ۲. تغییر بسامد بر حسب ثابت انتشار (kz) مربوط به دو نانوسیم پلاسمونی جفت شده در محیط با آثار غیر خطی در مد $m=1$ و $m=0$.

$$\alpha = \alpha_0 + (\alpha_r - \alpha_{fc} I) I, \quad (7)$$

P_0 در معادلات (۵) توان بهنجار است. توان کل و همچنین شدت با دو معادله زیر تعریف می‌شوند:

$$I = \frac{P}{A} \quad P = |A(z)|^2 P_0, \quad (8)$$

سطح مقطع A برابر با $\pi \times 1 \mu m^2$ است. همچنین شدت در حالتی که حامل‌های آزاد و اثر جذب دو فوتونی در محیط وجود داشته باشند به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (9)$$

۳. جفت‌شدگی در مد TM_0 نانوسیم

در این قسمت ابتدا ثابت انتشار k_z را با استفاده از معادله (۲) با در نظر گرفتن مقادیر $\lambda = 1550 nm$ ، $n_0 = 3/3$ ، $n_1 = 3/5$ ، $n_{fc} = 7/45 \times 10^{-23} cm^2 / W^2$ ، $n_{nl} = 3/3 \times 10^{-13} cm^2 / W$ و $\alpha_0 = 10/2 cm^{-1}$ و $\alpha_r = 24 cm / GW$ به دست می‌آوریم. سپس برای مد TM به ازای $m=0$ در این قسمت و $m=1$ در قسمت بعد، میدان‌های نانوسیم را با استفاده از معادله (۲) به دست می‌آوریم و با حل عددی معادلات (۳) و (۴) انتشار دامنه میدان در دو نانوسیم جفت شده پلاسمونی از جنس فلز نقره را با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی کر و در حالتی که اثر جذب دو فوتونی نیز وجود دارد می‌یابیم. پیش از این، این نتایج برای حالتی که در محیط فقط اثر کر وجود داشته است، به دست آمده است. با در نظر گرفتن بسامد $\omega = 2/4 \times 10^{16} rad/s$ در شکل‌های ۳ و ۵ ثابت انتشار را $k_z = 4/99 \times 10^6 (m^{-1})$ به دست می‌آوریم. در حضور اثر کر در شکل ۳ الف به ازای دامنه ۱، شدت معادل برابر $10^{-1} MW / cm^2$ به دست آمده است و

$$Q_r = \frac{\epsilon_0 n_1 n_{nl} \omega \gamma}{r P_0} \int |E_r|^2 |E_r|^2 dx dy, \quad (4-5)$$

$$Q_D = \frac{n_1 n_{fc} \omega \epsilon_0 \gamma^2}{r P_0} \int |E_r|^2 dx dy, \quad (5-5)$$

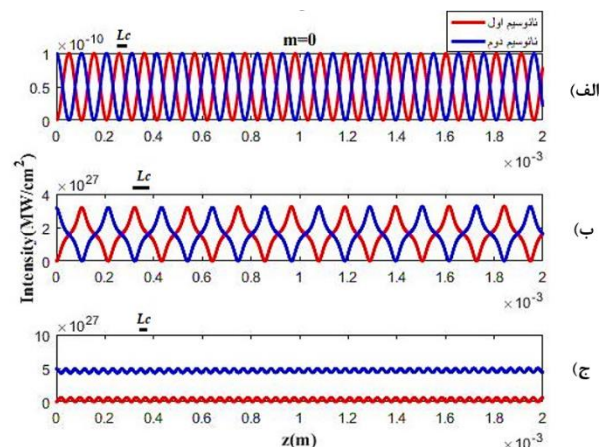
$$Q_e = \frac{\epsilon_0 n_1 n_{fc} \omega \gamma^2}{r P_0} \int |E_r|^2 |E_r|^2 dx dy, \quad (6-5)$$

جمله Q_1 از همپوشانی میدان مد با خودش به وجود می‌آید. جمله Q_2 به دلیل وجود یک مد در محور مجاور به وجود می‌آید و منجر به جفت‌شدگی خطی بین موجرها می‌شود. جملات غیر خطی، Q_3 و Q_4 ، از اثر کر ناشی می‌شوند که به ترتیب با برهم‌کنش غیر خطی یک مد با خود و یک مد با محور مجاور به وجود می‌آید. مشاهده می‌شود که جملات غیر خطی Q_5 و Q_6 از اثر حامل‌های آزاد بر ضریب شکست محیط ناشی می‌شود. این جملات به ترتیب با برهم‌کنش غیر خطی ۱ یک مد با خود و یک مد با مد مجاور مطابقت دارد. n_0 ، n_1 ، n_{nl} و n_{fc} به ترتیب ضریب شکست محیط، ضریب شکست خطی، ضریب شکست غیر خطی ناشی از اثر کر و ضریب شکست در اثر حامل‌های آزاد هستند. همچنین γ به صورت $\gamma = n_1 \epsilon_0 c$ تعریف می‌شود. در یک محیط غیر خطی ضریب شکست و ضریب جذب با تغییر شدت، تغییر می‌کنند. این دو ضریب به صورت معادله (۶) و (۷) تعریف می‌شوند [۱۸]. دو جمله آخر در دو معادله (۶) و (۷) مربوط به اثر کر و اثر جذب دو فوتونی در محیط هستند که به ترتیب با شدت و مربع شدت متناسب هستند. کاهش ضریب شکست متناسب با مربع شدت میدان الکتریکی نور است و این کاهش منجر به تضعیف اثر کر می‌شود. در اثر جذب دو فوتونی ضریب شکست محیط و شدت نور کاهش می‌یابد.

$$n = n_1 + (n_{nl} - n_{fc} I) I, \quad (6)$$

میدان‌های اولیه مختلف متفاوت است. اکنون این نتایج را با حضور همزمان اثر کر و جذب دوفوتونی به دست می‌آوریم. با در نظر گرفتن جمالات Q_5 و Q_6 در بسامد $\omega = 2/4 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ و با به دست آوردن ثابت انتشار $k_z = 4/44 \times 10^6 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ ، اثر جذب دو فوتونی و کر در دامنه بسیار کمتری نسبت به حالتی که فقط اثر کر به تنهایی در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌شود. به دلیل جمله $\exp(-\alpha z)$ شدت به صورت میرا کاهش می‌یابد. در شکل ۴ الف دامنه ورودی ۱ در نظر گرفته شده است و شدت معادل آن برابر با 10^{-1} MW/cm^2 است و به صورت میرا می‌باشد. در اینجا اثر کر و جذب دوفوتونی هم‌زمان در نظر گرفته شده و مشاهده می‌شود که جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم حالت خطی دارد.

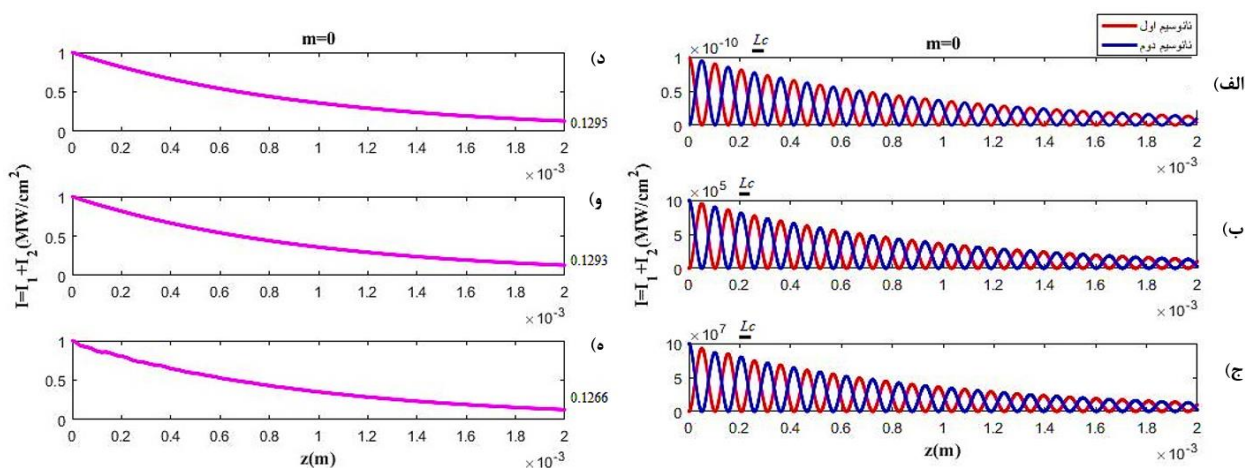
در شکل ۴ ب دامنه ورودی 10^8 و شدت معادل آن 10^6 MW/cm^2 است و مشاهده می‌شود که جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم حالت غیر خطی است. در شکل ۴ ج دامنه ورودی 10^9 و شدت معادل آن 10^7 MW/cm^2 است و مشاهده می‌شود که جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم حالت غیرخطی است. همچنین در شکل‌های ۴ د، ۴ و و ۴ ه نمودارهای شدت کل مربوط به اثر جذب دوفوتونی و کر در مد $m=0$ رسم شده‌اند و نشان می‌دهند که به دلیل حضور اثر جذب دوفوتونی، شدت به صورت میرا است و با افزایش مقدار اولیه دامنه ۱ (شکل ۴ د)، 10^8 (شکل ۴ و) و 10^9 (شکل ۴ ه) شدت به صورت غیر خطی میرا کاهش می‌یابد. یعنی با مقایسه این سه حالت (د)، (و) و (ه) درمی‌یابیم که با افزایش دامنه اولیه، میزان میرایی در نمودارهای شدت نیز افزایش یافته است. در این قسمت L_c کمترین مسافتی است که طی آن در محیط، انتقال انرژی بین دو موجبر بیشترین مقدار را دارد ولی به دلیل حضور همزمان اثر کر و جذب دوفوتونی، جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم صد در صد نیست. مقادیر L_c که در شکل‌های (۴ الف) تا (۴ ج) با خطوط مشکی نشان داده شده‌اند، به ازای مقادیر اولیه دامنه میدان‌های مختلف، تقریباً یکسانند.



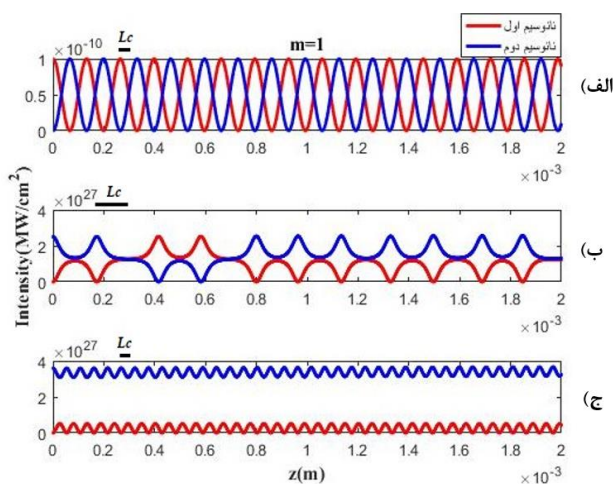
شکل ۳. نمودار شدت دو نانوسیم جفت شده غیر خطی پلاسمونی بر حسب فاصله انتشار (۲۰۰۰ میکرومتر) در حضور اثر کر به ازای دامنه‌های میدان اولیه (الف) ۱، (ب) $5/64 \times 10^{18}$ و (ج) 7×10^{18} . رنگ قرمز مربوط به نانوسیم اول و رنگ آبی مربوط به نانوسیم دوم است.

مشاهده می‌کنیم که جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم حالت خطی دارد. در حالی که به ازای دامنه $5/64 \times 10^{18}$ (شکل ۳ ب) و 7×10^{18} (شکل ۳ ج)، شدت‌های معادل به ترتیب برابر $3/1 \times 10^{27} \text{ MW/cm}^2$ و $5 \times 10^{27} \text{ MW/cm}^2$ به دست می‌آید، در این حالت انتقال انرژی بین دو نانوسیم کاهش می‌یابد. هر چقدر دامنه ورودی در این حالت بیشتر شود، اثرات غیر خطی نیز بیشتر مشاهده می‌شود. به ازای دامنه $5/64 \times 10^{18}$ در حضور اثر کر، جابه‌جایی موج پنجاه پنجاه (شکل ۳ ب) و به ازای دامنه 7×10^{18} (شکل ۳ ج) جابه‌جایی موج به صورت غیر خطی است.

طول جفت‌شدگی را با L_c نشان می‌دهیم. این طول کمترین فاصله‌ای است که در آن جابه‌جایی موج صد در صد است. در این مقاله به دلیل اثرات غیر خطی در محیط، جابه‌جایی صد در صد نیست و مسافتی را که در آن بیشترین انتقال انرژی بین دو موجبر در ساختار مشاهده می‌شود به عنوان طول جفت‌شدگی در نظر می‌گیریم. این پارامتر در اکثر تحقیقات پیرامون موجبرهای جفت شده بسیار مفید است. مقادیر L_c در شکل‌های ۳ الف تا ۳ ج با خطوط مشکی نشان داده شده‌اند و به ازای



شکل ۴. ستون سمت راست، نمودارهای شدت دو نانوسیم جفت شده غیر خطی پلاسمونی بر حسب فاصله انتشار (۲۰۰۰ میکرومتر) در حضور اثر کر و اثر جذب دوفوتونی به ازای دامنه‌های میدان اولیه (الف) ۱، (ب) 10^8 و (ج) 10^9 . رنگ قرمز مربوط به نانوسیم اول و رنگ آبی مربوط به نانوسیم دوم است. شکل‌های ستون سمت چپ، نمودار های شدت کل دو نانوسیم جفت شده غیر خطی بر حسب فاصله انتشار (۲۰۰۰ میکرومتر) در حضور اثر کر و اثر جذب دوفوتونی با مقادیر دامنه‌های میدان اولیه (د) ۱، (و) 10^8 و (ه) 10^9 .



شکل ۵. نمودار شدت دو نانوسیم جفت شده غیر خطی پلاسمونی بر حسب فاصله انتشار (۲۰۰۰ میکرومتر) در حضور اثر کر به ازای دامنه‌های میدان اولیه (الف) ۱، (ب) 5×10^{18} و (ج) 6×10^{18} . رنگ قرمز مربوط به نانوسیم اول و رنگ آبی مربوط به نانوسیم دوم است.

۴. جفت‌شدگی در مد TM_1 نانوسیم

خطی است. به ازای دامنه 5×10^{14} در شکل ۵. ب شدت معادل برابر با $2/1 \times 10^{27} MW/cm^2$ به دست می‌آید و انتقال انرژی به صورت غیرخطی است و جفت‌شدگی پنجاه پنجاه مشاهده می‌شود.

در شکل ۵. ج به ازای دامنه ورودی 6×10^{14} شدت معادل برابر $3/6 \times 10^{27} MW/cm^2$ به دست می‌آید، انتقال انرژی بین دو نانوسیم صورت غیر خطی است و نسبت به شکل ۵. ب

در این قسمت حالت‌های قبل را برای مد $m=1$ در شکل‌های ۵ و ۶ تکرار می‌کنیم به این صورت که در حضور اثر کر در بسامد $\omega = 2/4 \times 10^{12} rad/s$ ثابت انتشار معادل آن را $k_z = 4/9 \times 10^6 (m^{-1})$ به دست می‌آوریم. در شکل ۵. الف به ازای دامنه ورودی ۱ شدت معادل برابر $10^{-10} MW/cm^2$ به دست آمده است و جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم به صورت

نمودارهای مربوط به دو مد، مقادیر طول جفت‌شدگی (L_c) در مد TM_{00} (شکل ۳ و ۴) کمتر از مقادیر طول جفت‌شدگی در مد TM_{10} (شکل ۵ و ۶) است و می‌توان نتیجه گرفت که اثر جذب دوفوتونی طول جفت‌شدگی را افزایش می‌دهد.

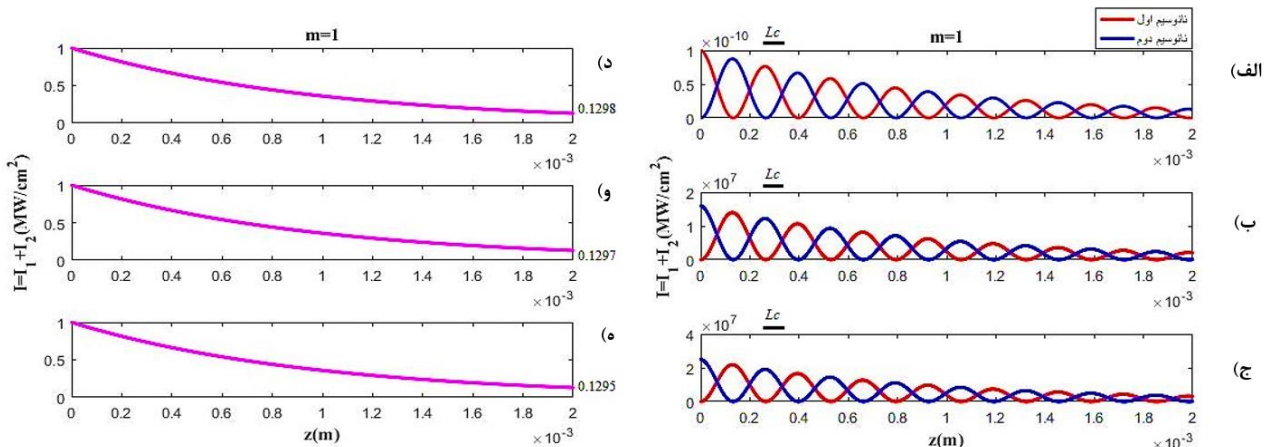
در شکل ۷. الف، حالت اول نشان داده شده است که مربوط به بررسی راندمان جفت‌شدگی بر حسب شدت در طول جفت‌شدگی برای حالتی است که مد TM_{00} است و در محیط علاوه بر اثر کر اثر جذب دوفوتونی هم وجود دارد. در شکل ۷. ب حالت دوم نشان داده شده است که مربوط به مد TM_{10} است و در محیط علاوه بر اثر کر اثر جذب دوفوتونی هم وجود دارد. شکل ۷. ج مربوط به حالتی است که مد TM_{00} است و در محیط تنها اثر کر وجود دارد. شکل ۷. د مربوط به حالتی است که مد TM_{10} است و در محیط تنها اثر کر وجود دارد. همانطور که در همه قسمت‌ها مشاهده می‌کنید، در فاصله طول جفت‌شدگی مربوط به این چهار حالت، راندمان جفت‌شدگی با افزایش شدت در حال افزایش است. مقادیر این راندمان برای این چهار حالت متفاوت است که این به دلیل دامنه ورودی های مختلف به دست می‌آید. در این شکل‌ها به ازای دامنه های مختلف که شدت های غیرخطی متفاوتی را ایجاد می‌کند و با توجه به این نتیجه که از قسمت های قبل به دست آمد و مشاهده کردیم با افزایش دامنه غیرخطی افزایش می‌یابد و در یک طول جفت‌شدگی راندمان، برای غیرخطی‌های مختلف با شدت افزایش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

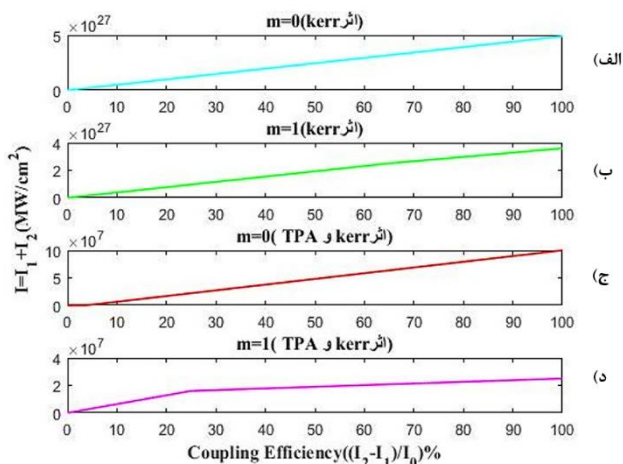
در این مقاله به بررسی اثرات جفت‌شدگی غیرخطی دو نانوسیم پلاسمونیک با حضور اثرات جذب دوفوتونی و کر در دو مد مختلف پرداختیم. نمودارهای شدت برای دو نانوسیم پلاسمونیک جفت شده غیرخطی رسم شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دامنه میدان اولیه دو نانوسیم، میزان جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم جفت شده تغییر می‌کند و کاهش می‌یابد. با مقایسه حالت‌های مربوط به محیط دارای اثر کر و محیط دارای اثر جذب دوفوتونی نتیجه می‌گیریم، اثرات اپتیک

کاهش می‌یابد و غیرخطی‌ت افزایش می‌یابد. مقادیر L_c در شکل‌های ۵. الف تا ۵. ج با خطوط مشکی نشان داده شده است و به ازای مقادیر اولیه مختلف دامنه میدان‌ها، L_c متفاوت است. این نتایج را در حالتی که علاوه بر حضور اثر کر، اثر جذب دوفوتونی نیز در محیط وجود دارد بررسی می‌کنیم. در بسامد $\omega = 2.4 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ ثابت انتشار معادل آن $k_z = 4.9 \times 10^6 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ ، به دست می‌آید. شدت در نمودارهای مربوط به این حالت در دامنه بسیار کمتری نسبت به شدت حالتی که تنها اثر کر در محیط وجود دارد، مشاهده می‌شود. به دلیل جمله $\exp(-\alpha z)$ ، شدت به صورت غیر خطی میرا کاهش می‌یابد (شکل ۶). در این حالت به ازای دامنه ۱ (شکل ۶. الف) شدت معادل برابر با 10^{-10} MW/cm^2 به دست می‌آید که به صورت میرا است و مشاهده می‌کنیم جابه‌جایی موج بین دو موجبر به صورت خطی است. به ازای دامنه ورودی 4×10^8 (شکل ۶. ب) شدت معادل برابر با $5 \times 10^8 \text{ MW/cm}^2$ و به ازای دامنه ورودی 5×10^8 (شکل ۶. ج) شدت معادل برابر با $2.5 \times 10^9 \text{ MW/cm}^2$ به دست می‌آید که به صورت میرا هستند و در هر دو حالت جابه‌جایی موج بین دو نانوسیم غیرخطی است و با افزایش دامنه ورودی، اثرات غیر خطی در شکل ۶. ج نسبت به غیر خطی‌ت در شکل ۶. ب افزایش یافته است.

همچنین شکل ۶. د، شکل ۶. و و شکل ۶. ه نمودارهای شدت کل مربوط به زمانی که علاوه بر اثر کر اثر جذب دوفوتونی نیز در محیط وجود دارد، رسم شده است و نشان می‌دهد، به دلیل حضور اثر جذب دوفوتونی، شدت به صورت میرا است. با افزایش مقدار اولیه دامنه ۱ (۶. د)، 4×10^8 (شکل ۶. و) و 5×10^8 (شکل ۶. ه)، شدت به صورت غیر خطی میرا کاهش می‌یابد به این صورت که مشابه مد $m=0$ با مقایسه این سه حالت (۶. د)، (۶. و) و (۶. ه) با افزایش دامنه اولیه میزان میرایی در نمودارهای شدت نیز افزایش یافته است. مشابه قبل در این قسمت L_c در شکل‌های (۶. الف) تا (۶. ج) با خطوط مشکی نشان داده شده است. به ازای مقادیر اولیه دامنه میدان‌های مختلف، مقادیر L_c تقریباً یکسان است. همچنین در



شکل ۶. ستون سمت راست، نمودارهای شدت دو نانوسیم جفت شده غیر خطی پلاسمونی بر حسب فاصله انتشار (۲۰۰۰ میکرومتر) در حضور اثر کر و اثر جذب دوفوتونی به ازای دامنه‌های میدان اولیه (۹ الف) ۱، (۹ ب) 4×10^8 و (۹ ج) 5×10^8 . رنگ قرمز و آبی به ترتیب مربوط به نانوسیم اول و دوم است. شکل ستون سمت چپ، نمودارهای شدت کل دو نانوسیم جفت شده غیر خطی بر حسب فاصله انتشار (۲۰۰۰ میکرومتر) در حضور اثر کر و اثر جذب دوفوتونی با مقادیر دامنه‌های میدان اولیه (۹ د) ۱، (۹ و) 4×10^8 و (۹ ه) 5×10^8 .



شکل ۷. نمودار شدت بر حسب درصد راندمان جفت‌شدگی دو نانوسیم جفت شده غیر خطی برای چهار حالت (الف) مد TM_{00} در حضور اثر کر و اثر جذب دوفوتونی، (ب) مد TM_{10} در حضور اثر کر و اثر جذب دوفوتونی، (ج) مد TM_{00} در حضور اثر کر و (د) مد TM_{10} در حضور اثر کر.

ثابت انتشار برای این دو حالت در شرایط ثابت پهنای قله‌های مربوط به نمودارهای دامنه میدان با افزایش مرتبه مد از صفر به یک افزایش می‌یابد که این نتیجه برای هر دو حالت یعنی اثر کر به تنهایی و حالتی که اثر جذب دوفوتونی نیز وجود دارد قابل مشاهده است. همچنین با مقایسه مقادیر L_c مشاهده می‌شود که این مقدار در مد TM_{00} کمتر از مد TM_{10} است و نتیجه

غیر خطی در محیطی که صرفاً اثر کر است در دامنه‌های بیشتری نسبت به محیطی که اثر جذب دوفوتونی وجود دارد، دیده می‌شود. به این معنا که اثرات اپتیکی غیر خطی در حضور اثر جذب دوفوتونی در دامنه‌های بسیار کمتری نسبت به حالتی است که تنها اثر کر وجود داشته باشد. همچنین با مقایسه نمودارهای مد TM_{00} و TM_{10} نتیجه می‌گیریم که به دلیل تغییر

برای هر یک از نانوسیم‌ها نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد راندمان جفت‌شدگی در یک نانوسیم با افزایش شدت افزایش می‌یابد در حالی که در نانوسیم دیگر با افزایش شدت کاهش می‌یابد.

می‌گیریم که اثر جذب دوفوتونی طول جفت‌شدگی را افزایش می‌دهد. به عنوان نتیجه نهایی، با افزایش شدت در یک طول جفت‌شدگی به ازای دامنه میدان‌های اولیه مختلف راندمان جفت‌شدگی افزایش می‌یابد و با افزایش اثرات غیر خطی و در یک فاصله جفت‌شدگی نیز افزایشی خواهد بود. این پارامتر

مراجع

1. Z Wang, Q Weibin, R Junbo, L Zhili, Q Pingping, and K Qiang, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 37 (2019) 100745.
2. W L Barnes, A. Dereux, and T.W. Ebbesen, *Nature* 424 (2003) 824.
3. B Korzh, et al., *Nature Photonics* 14 (2020) 250.
4. D Xie, et al., *Nature Communications* 10 (2019) 4478.
5. Q Bao, et al., *Light: Science and Applications* 9 (2020) 1.
6. S Mokkalpati, D. Saxena, H. Tan, C. Jagadish, *Sci. Rep* 5 (2015) 15339.
7. R Veld, et al., *Commun. Phys*, 59 (2020) 1.
8. Ch Kim, et al., *Sci. Rep*, 10 (2020) 9271.
9. D Pines, D. Bohm, *Phys. Rev.* 85 (1952) 338.
10. A Alipour, A. Mir, A. Farmani, *optics and laser technology* 127 (2020) 106201.
11. S F Haddawi, H. R. Humud, S. M. Hamidi, *optics and laser technology* 121 (2020) 105770.
12. A M El-Mahalawy, A R Wassel, *optics and laser technology* 131 (2020) 106395.
13. M H Motavas, A Zarifkar, *optics and laser technology* 111 (2019) 315.
14. J KiKim, et al., *optics and laser technology* 112 (2019) 151.
15. Z Wang, Q Weibin, R Junbo, L Zhili, Q Pingping, and K Qiang, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 37 (2019) 100745.
16. D N Christodoulides, F Lederer, and Y Silberberg, *Nature* 424 (2003) 817.
17. Y Lahini, A Avidan, F Pozzi, M Sorel, R Morandotti, D N Christodoulides, and Y Silberberg, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 013906.
18. A Ghadi, S Mirzanezhad, F Sohbatzadeh, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications.* 7 (2009) 198.
19. Z Cherpakova et al., *Opt. Lett.* 42 (2017) 2165.
20. S L Chuang, *J. Lightwave Technol.* 5 (1987) 174.
21. J P Kottmann and O Martin, *Opt. Express.* 8 (2001) 655.
22. F Ye, D Mihalache, B Hu, and N C Panoiu, *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 106802.
23. S Sun, C Hung-Ting, *Opt. Exp.* 21 (2013) 4591.
24. J Takahara, et al., *Opt. Lett.* 22 (1997) 475.
25. M Kauranen and A V Zayats, *Nat. Photonics* 6 (2012) 737.
26. F Ye, D Mihalache, B Hu, and N C Panoiu, *Opt. Lett.* 36 (2011) 1179.
27. Y Kou, F Ye, and X Chen, *Opt. Lett.* 38 (2013) 1271.
28. S A Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (2007) 224.
29. M A Ordal et al., *Appl. Opt.* 24 (1985) 4493.
30. Sh Y Chung, et al., *J. Lightwave Technol.* 30 (2012) 1733.
31. A Hardy and W Streifer, *J. Lightwave Technol.* 3 (1985) 1135.