

بیست و هفتمین کنفرانس  
اپتیک و فوتونیک ایران و  
سیزدهمین کنفرانس مهندسی  
و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه سیستان و بلوچستان،



زاهدان، ایران.

۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۴۵۴-۱۰-A

## تنظیم پذیری جفت شدگی پلاریتون-پلاسمون سطحی واکسیتون برحسب ضخامت لایه‌ی پلاسمونی در یک ساختار سه لایه‌ای

منا رستمی، فریدون بابائی

دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه قم، قم

چکیده - در این مقاله تنظیم پذیری جفت شدگی پلاریتون-پلاسمون سطحی واکسیتون برحسب ضخامت لایه‌ی پلاسمونی در یک ساختار سه لایه ای در پیکربندی کریشن بطور نظری مطالعه شده است. طیف انرژی شاخه‌های پلکسیتونی برحسب فرکانس واکوکی نشان‌دهنده‌ی رفتار غیر متقاطع مدهای پلکسیتونی به ازای ضخامت‌های مختلف محیط پلاسمونی است. با تنظیم ضخامت فلز از 30 تا 50nm قدرت جفت شدگی بین پلاسمون و اکسیتون از ناحیه‌ی متوسط به ناحیه‌ی قوی تغییر کرد. در هیبرید شدگی مدهای پلاسمونی و اکسیتونی، پهنای متفاوت طیف برانگیختگی آن‌ها و توانایی آن‌ها در جفت شدگی با میدان خارجی، روش‌های مختلفی را برای کنترل خواص اپتیکی سیستم‌های جفت شده فراهم می‌کند و جفت شدگی قوی در تولید قطعات اپتوالکترونیک نقش بسزایی دارد.

کلید واژه- اکسیتون، پلاریتون-پلاسمون سطحی، پلکسیتون.

## Tuning surface plasmon-polariton and exciton coupling via thickness dependent of plasmonic layer in a trilayer structure

Mona Rostami, Frydon Babaei

Department of Physics, University of Qom, Qom

In this paper, tuning surface plasmon-polariton and exciton coupling via thickness dependent of plasmonic layer in a trilayer structure has been studied theoretically in Kretschmann configuration. Energy spectra of plexcitonic branches as a function of detuning frequency indicates to the anticrossing behavior of plexciton modes at different thicknesses of plasmonic medium. By tuning the thickness of metal from 30 to 50nm, the coupling strength between plasmon and exciton changed from the intermediate range to strong range. In the forming plasmon-exciton hybrid modes, different linewidths of their excitation spectra and the abilities to couple with external field, provide different methods for controlling optical properties of the coupled systems and strong coupling plays an important role in the design of optoelectronic systems.

Keywords: Exciton, Surface plasmon-polariton, plexciton.

نوری که از طریق آن محیط به سطح فلز می‌رسد، نمی‌تواند مستقیماً منجر به برانگیختگی SPP شود. به منظور افزایش عدد موج فوتون فرودی و برابری آن با عدد موج SPP مطابق شکل ۱ از پیکربندی کریشن استفاده می‌شود، وقتی نوری تحت قطبش p و تحت زاویه  $\theta_{in}$  وارد منشور می‌شود، عدد موج آن افزایش یافته و در صورت برابری مؤلفه‌ی موازی با فصل مشترک فلز و دی الکتریک مربوط به آن  $\left(\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_{prism}} \sin \theta_{in}\right)$  با  $k_{SPP}$ ، جفت شدگی این فوتون‌ها با پلاسمون‌های سطحی در فصل مشترک دی الکتریک و فلز از طریق تونل زنی فوتون با شرایط بازتاب کلی در منشور رخ می‌دهد [۴].

### مدل سازی اپتیکی

به منظور شبیه سازی اپتیکی، ساختار سه لایه‌ای به صورت شکل ۱ در نظر بگیرید. با توجه به شکل ۱ فضای  $0 \leq z \leq d_{met}$  توسط ماده‌ی همگن فلزی از جنس نقره پر شده است. محیط دی الکتریک لایه نازک ستونی منیزیوم فلوراید و محیط اکسیژنی یک لایه‌ی همگن J-aggregate است که در وسط یک محیط دی الکتریک با مورفولوژی ستونی حائل شده است. ضخامت لایه‌های منیزیوم فلوراید در بالا و پایین لایه‌ی J-aggregate  $L_{CTF} = 500nm$  و ضخامت لایه‌ی J-aggregate  $d_{J-aggregate} = 284nm$  انتخاب شده است. زاویه‌ی ستون‌های لایه نازک متخلخل (هوا و منیزیوم فلوراید)  $\chi = 20^\circ$  نسبت به محور x فرض شده است. ثابت دی الکتریک منشور (سلناید روی) مقدار  $n_{prism}^2 = 6.656$  می‌باشد. برای محاسبه‌ی گذردهی دی الکتریک لایه‌های نازک ستونی ناهمسانگرد، از روش همگن سازی بروگمن استفاده شده است [۵]. کسر حجمی هوا  $f_v = 0.8$  در نظر گرفته شده و ضریب شکست آن نیز  $n_{air} = 1$  می‌باشد. در این کار اکسیژن‌های سطحی در فصل مشترک J-aggregate و محیط دی الکتریک بالا حضور دارند، پلاریتون اکسیژن سطحی (SEP) نتیجه‌ای از جفت شدگی فوتون‌ها با اکسیژن‌ها در فصل مشترک بلورهای ارگانیک J-

### مقدمه

جفت شدگی قوی در سیستم‌هایی که در آن مدهای پلاریتون-پلاسمون سطحی (SPP) با اکسیژن‌ها از نوع مولکول‌های رنگدانه‌ی سیانین TDBC با انباشت J شکل (J-aggregate) هیبرید شده‌اند، منجر به تبادل همدوس انرژی بین مدهای پلاسمونی و اکسیژنی می‌شود و کاربردهای قابل توجهی در سوئیچ‌های نوری و لیزرهای پلاسمونی دارد [۱]. نوسانگرهای SPP و اکسیژنی هر کدام دارای فرکانس مختص به خود می‌باشند که به ترتیب با  $\omega_{SPP}$  و  $\omega_{exc}$  در این کار مشخص می‌شوند و اختلاف بین آن‌ها  $\delta = \omega_{SPP} - \omega_{exc}$  به فرکانس واکوکی  $\delta$  (detuning frequency) موسوم است، هر گاه فرکانس پلاسمون به فرکانس اکسیژن نزدیک باشد، جفت شدگی بین پلاسمون و اکسیژن شبه ذره‌ی جدیدی را تشکیل می‌دهد که پلکسیژن نامگذاری شده است. پلکسیژن شامل حالت‌های هیبرید شده اپتیکی جدید است که شاخه‌های پلاریتونی بالاتر (UP) و پایین‌تر (LP) نامیده می‌شوند. [۲]. اگر دو مد پلکسیژنی (UP) و (LP) با  $\omega_+, \omega_-$  بیان شوند، در  $\delta = 0$  با در نظر داشتن اتلاف‌های مربوط به مد پلاسمونی  $\gamma_{SPP}$  و مد اکسیژنی  $\gamma_{exc}$ ، انرژی شکافتگی رابی  $(\hbar\Omega_R)$  به عنوان انرژی جفت شدگی بین SPP و اکسیژن با رابطه‌ی

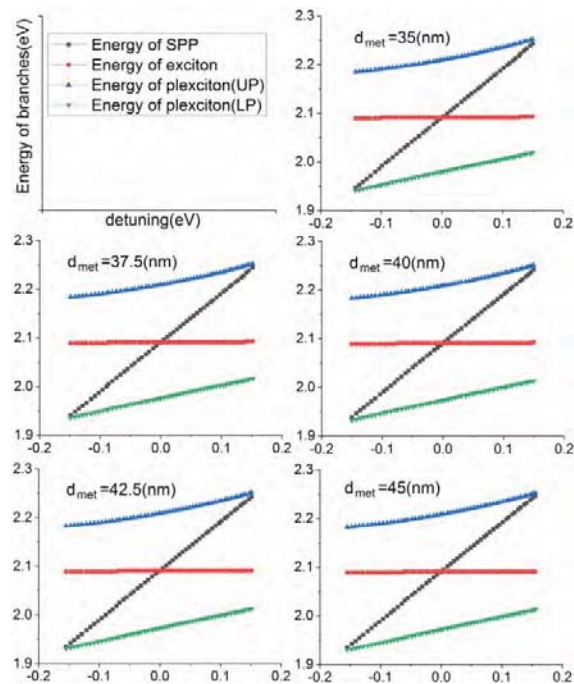
$$\hbar\Omega_R = \sqrt{\hbar^2(\omega_+ - \omega_-)^2 + 0.25(\gamma_{SPP} - \gamma_{ext})^2}$$

مشخص می‌شود [۳]. در این کار به مطالعه‌ی قدرت جفت شدگی بین اکسیژن‌های J-aggregate و SPP پرداخته شده و تغییرات  $\hbar\Omega_R$  و  $\Delta\omega = \omega_+ - \omega_-$  برحسب ضخامت لایه‌ی پلاسمونی مورد بررسی قرار گرفته است.

از آنجا که قسمت حقیقی عدد موج SPP  $(k_{SPP} = k_0 \sqrt{\epsilon_{met} \epsilon_{diel}} / (\epsilon_{met} + \epsilon_{diel}))$  بزرگ‌تر از عدد موج نور فرودی در محیط دی الکتریک است، بنابراین

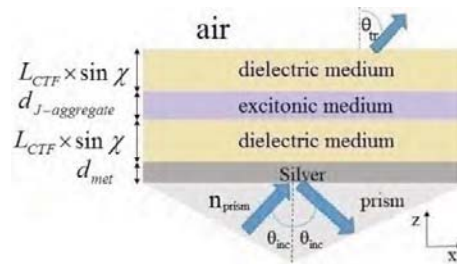
از روش‌های مرسوم برای تنظیم جفت شدگی SPP-اکسیتون کنترل اتلاف مد پلاسمونی بوده است، با تغییرات  $d_{met}$  می‌توان اتلاف SPP را کنترل کرد و از ناحیه‌ی جفت شدگی ضعیف (بدون ظهور رفتار غیرمقاطع شاخه‌های پلکسیتونی) به ناحیه‌ی جفت شدگی قوی (با رفتار غیرمقاطع این شاخه‌ها) دست یافت [۸]. هدف این کار بررسی نوع جفت شدگی با در نظر داشتن رفتار غیرمقاطع شاخه‌های پلکسیتونی در شکل ۲ است.

پهنای نمودار جذب اپتیکی  $\gamma_{SPP}(\omega)$ ،  $\hbar\Omega_R$  و جدایی انرژی بین شاخه‌های پلاریتونی  $(\Delta\omega = \omega_+ - \omega_-)$  در  $\delta = 0$  در شکل ۳ بر حسب  $d_{met}$  (۳۰-۵۰)nm نشان داده شده است. در مورد طیف‌های جذب پلکسیتونی با افزایش  $d_{met}$ ،  $\theta_{\delta=0}$  کاهش می‌یابد. با افزایش  $d_{met}$ ،  $\gamma_{SPP}$  سیر نزولی دارد. پهنای نمودارهای اکسیتونی  $(\gamma_{exc})$  نیز در حالت  $\delta = 0$  در محدوده‌ی  $0.205 eV$  تعیین شد. با افزایش  $d_{met}$ ، مقدار  $\hbar\Omega_R$  تا  $d_{met} = 45 nm$  سیر نزولی داشته و از آن پس تقریباً ثابت می‌ماند و مقدار  $\Delta\omega$  نیز سیر صعودی دارد.



شکل ۳: جفت شدگی بین مد SPP و مد اکسیتونی به ازای ضخامت‌های مختلف محیط پلاسمونی.

aggregate و دی الکتریک فوقانی است [۶]. امواج SPP نیز در فصل مشترک فلز و محیط دی الکتریک منتشر می‌شوند. امواج SPP و SEP می‌توانند ترکیب شده و موج پلکسیتون سطحی را به وجود آورند. با فرض آنکه این ساختار در معرض یک پرتو نوری به شکل موج تخت با قطبش p تحت زاویه‌ی  $\theta_{in}$  قرار گرفته باشد، منحنی‌های جذب اپتیکی بر حسب فرکانس نور فرودی برای SPP، اکسیتون و پلکسیتون به ازای ضخامت‌های مختلف  $d_{met}$  ترسیم شد. محاسبات این کار را با روش ماتریس انتقال انجام شده است که جزئیات آن در کار قبلی ما و دیگران به طور مفصل آمده است [۵،۷].



شکل ۴: ساختار سه لایه‌ای جهت جفت شدگی SPP و اکسیتون.

## نتایج و بحث

با انتخاب بازه‌ای از  $\theta_{inc}$  به عنوان پارامتر ورودی برنامه جهت ترسیم منحنی‌های جذب اپتیکی برای SPP، اکسیتون و پلکسیتون بر حسب تابعی از فرکانس نور فرودی در بازه‌ی  $(1.55 - 4.13) eV$ ، به ازای مقدار خاصی از  $\theta_{inc}$ ،  $\delta = 0$  تعیین شد که آن زاویه را  $\theta_{\delta=0}$  نامیدیم. با تعیین بیشینه‌های طیف جذب اپتیکی مربوط به برانگیختگی‌های پلکسیتونی، SPP و اکسیتون به ازای هر  $\theta_{inc}$  و  $\delta$  متناظر با آن، نمودار انرژی شاخه‌ها بر حسب  $\delta$  در شکل ۲ ترسیم شده است. تنها انرژی شاخه‌ی اکسیتونی است که تغییرات خاصی بر حسب  $\delta$  ندارد. به دلیل وابستگی طیف جذب اپتیکی SPP و پلکسیتون به  $d_{met}$ ، به ازای  $d_{met}$ ‌های مختلف (۳۵-۴۵)nm انرژی شاخه‌ها را در شکل ۲ نشان داده‌ایم. در  $\delta = 0$  مدهای مربوط به حالت‌های جفت شده به صورت غیرمقاطع ظاهر می‌شوند.

بازتاب آن کاهش یافته و انرژی جدایی بین شاخه‌های پلاریتونی ( $\Delta\omega$ ) افزایش می‌یابد. کاهش پهنای طیف بازتاب SPP نشانگر کاهش اتلاف آن و نتیجتاً افزایش طول عمر پلاسمون‌های سطحی است که منجر به افزایش قدرت جفت شدگی بین پلاسمون و اکسیتون می‌شود [۸، ۱۰].

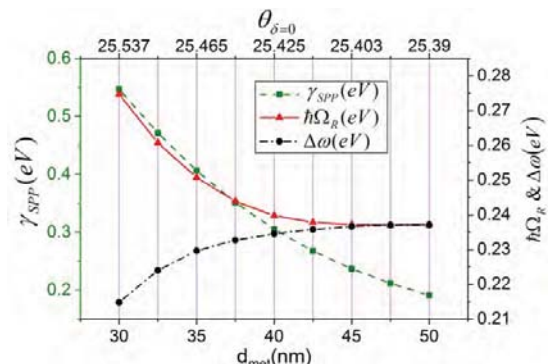
### نتیجه‌گیری

بررسی جفت شدگی SPP و اکسیتون‌های J-aggregate به صورت نظری در پیکربندی کریشمن انجام شد. نتایج نمودارهای انرژی شاخه‌های پلکسیتونی بر حسب فرکانس واکوکی  $\delta$  حاکی از رفتار غیرمقاطع مدهای پلاریتونی بالاتر و پایین‌تر در  $\delta = 0$  به ازای مقادیر مختلف  $d_{met}$  است و افزایش  $d_{met}$  که با افزایش طول عمر SPP همراه خواهد بود، سبب تقویت میزان جفت شدگی از متوسط به قوی خواهد شد.

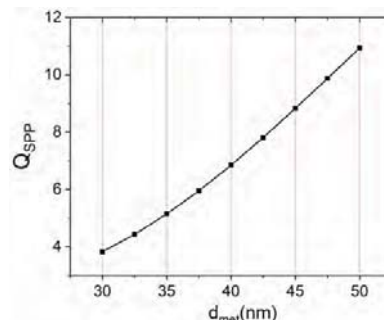
### مرجع‌ها

- [1] W. Wang, P. Vasa, R. Pomraenke, R. Vogelgesang, A. D. Sio, E. Sommer, M. Maiuri, C. Manzoni, G. Cerullo and C. Lienau, ACS Nano (2013), 8, 1.
- [2] S. Balci, B. Kucukoz, O. Balci, A. Karatay, C. Kocabas, and G. Yaglioglu, ACS Photonics (2016), 3, 11 (2010-2016).
- [3] G. D. Chatzidakis and V. Yannopapas, Modern Optics (2019), 66, 15 (1558-1568).
- [4] J. Zhang, L. Zhang and W. Xu, Applied Physics (2012), 45, 11.
- [5] A. Lakhtakia, R. Messier, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, SPIE—The International Society for Optical Engineering, "Sculptured Thin Films Nanoengineered Morphology and optics".
- [6] Y. Xu, L. Wu and L. K. Ang, Physical Review Applied (2019), 12, 2.
- [7] F. Babaei, M. Rostami, Opt. commun (2019), 439, 8-15.
- [8] S. Balci, E. Karademir, C. Kocabas, A. Aydinli, Optics Letters (2014), 39, 17(4994-4997).
- [9] T. Simon, D. Melnikau, A. Sánchez-Iglesias, M. Grzelczak, L. M. Liz-Marzan, Y. P. Rakovich, J. Feldmann, and A. S. Urban, Phys. Chem (2016), 120, 22 (12226-12233).
- [10] S. Balci, C. Kocabas, S. Ates, E. Karademir, O. Salihoglu, and A. Aydinli, Physical Review B (2012), 86, 23 (1-6).

مقدار پارامتر فاکتور کیفیت برای مد پلاسمونی  $[Q_{SPP} = \omega_{SPP} / \gamma_{SPP}]$ ، به ازای مقادیر مختلف  $d_{met}$  (30-50) nm در  $\delta = 0$  محاسبه شده و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش  $d_{met}$ ،  $Q_{SPP}$  افزایش می‌یابد. نتیجه‌ی بررسی  $Q_{SPP}$  در توافق با کار گروه بالسی و همکاران است [۱۰].



شکل ۳: نمودارهای  $\gamma_{SPP}$ ،  $\hbar\Omega_R$  و  $\Delta\omega$  بر حسب  $d_{met}$  و  $\theta_{\delta=0}$ .



شکل ۴: نمودار  $Q_{SPP}$  بر حسب  $d_{met}$  در  $\delta = 0$ .

بر اساس معیارهای کار قبلی ما [۷]، تا  $d_{met} = 42.5 \text{ nm}$  رابطه‌ی  $\gamma_{ext} < \hbar\Omega_R < \gamma_{SPP}$  برقرار بوده و جفت شدگی از نوع متوسط است و به ازای  $d_{met} \geq 45 \text{ nm}$  رابطه‌ی  $\hbar\Omega_R > (\gamma_{ext}, \gamma_{SPP})$  برقرار بوده و جفت شدگی از نوع قوی است و افزایش قدرت جفت شدگی با افزایش  $d_{met}$ ، به دلیل کاهش  $\gamma_{SPP}$  است [۸].

همانطور که ملاحظه کردیم با کاهش  $\Delta\omega$ ،  $\gamma_{SPP}$  افزایش می‌یابد. نتایج کار ما در توافق با کار گروه بالسی و همکارانش می‌باشد. ایشان اثر  $d_{met}$  را در جفت شدگی بین پلاسمون و اکسیتون J-aggregate بررسی کردند [۸، ۱۰]. براساس نتایج کار آن‌ها با افزایش  $d_{met}$ ، پهنای طیف