بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

تنظیم پذیری جفت شدگی پلاریتون- پلاسمون سطحی و اکسیتون بر حسب غلظت نیمرسانای اکسیتونی در یک ساختار دو لایه‌ای

منا رستمی[۱]، فریدون بابائی[۲]

[۱]Mona_rostami90@yahoo.com
[۲]Ferydonbabaei@gmail.com
دانشکدهٔ علوم، گروه فیزیک، دانشگاه قم، قم

چکیده - در این مقاله تنظیم پذیری جفت شدگی پلاریتون-پلاسمون سطحی واکسیتون برحسب غلظت نیمرسانای اکسیتون (f_J) دریک ساختار دو لایه ای در پیکربندی کریشمن بطور نظری مطالعه شده است. طیف‌های جذب اپتیکی مربوط به ساختار جفت شده به ازای مقادیر مختلف f_J، دارای مدهای پلاریتونی بالاتر و پایین‌تر است. با تنظیم غلظت نیمرسانای اکسیتونی از 0.06 به 0.1 قدرت جفت شدگی بین پلاسمون و اکسیتون افزایش می‌یابد.

کلید واژه- اکسیتون، پلاریتون- پلاسمون سطحی، پلکسیتون، شکافتگی رابی

Tuning surface plasmon- polariton and exciton coupling via concentration of excitonic semiconductor in a twolayer structure

Mona Rostami[1], Ferydon Babaei[2]

[1]Mona_rostami90@yahoo.com
[2]Ferydonbabaei@gmail.com
Department of Physics, University of Qom, Qom

Abstract- In this paper, tuning surface plasmon- polariton and exciton coupling via concentration dependent of excitonic semiconductor (f_J) in a twolayer structure has been studied theoretically in Kretschmann configuration. Optical absorption spectrums of the coupling structure at different values of f_J، have upper and lower polariton branches. By tuning the concentration of excitonic semiconductor from 0.06 to 0.1, the coupling strength between plasmon and exciton increases.

Keywords: Exciton, Surface plasmon- polariton, plexciton, Rabi splitting

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

برهم‌کنش پلاسمون‌ها و اکسیتون‌ها در شاخه‌ی جدیدی از فیزیک ماده چگال به نام پلکسیتونیک مطالعه می‌شود. یک سیستم پلکسیتونی، ترکیبی از یک محیط پلاسمونی (فلزی) و یک محیط اکسیتونی (نیمرسانا) است. هر گاه فرکانس پلاسمون به فرکانس اکسیتون نزدیک باشد، جفت شدگی بین پلاسمون و اکسیتون شبه ذره‌ی جدیدی را تشکیل می‌دهد که پلکسیتون نامگذاری شده است. پلکسیتون یک حالت هیبرید شده اپتیکی جدید است که شامل شاخه‌های پلاریتونی بالا (Up) و پایین (Lp) می باشد [۳-۱]. مهم‌ترین شاخصه‌ی یک مد SPP جایگزیدگی قوی میدان الکترومغناطیسی آن در فصل مشترک فلز و دی الکتریک است. محبوس شدن انرژی الکترومغناطیسی یک مد SPP به فضای دو بعدی مرز مشترک سبب می‌شود که انتشار این امواج به طور قوی به شرایط مرزی حساس شود. از این رو موجب کاربرد SPP در ساخت حسگرها و آشکارسازهای فیزیکی و شیمیایی می‌شود. اما محدودیت‌هایی در کاربردهای آن وجود دارد، می‌توان به میرایی بالا به دلیل اتلافات اهمی و در نتیجه طول انتشار کوتاه و غیر خطی‌های اپتیکی ضعیف نام برد [۷-۴]. جفت شدن SPP به تشدیدهای نوری غیر خطی نظیر اکسیتون‌ها (X) در نانوساختارهای نیمرسانایی می‌تواند اثرات غیرخطی‌های ضعیف SPP را اصلاح کند. این یک گام کلیدی جهت تحقق بخشیدن به دستگاه‌های پلاسمونی جدید نظیر سوئیچ‌های اپتیکی، ترانزیستورهای تک فوتونی و نانولیزرها است. نتیجه‌ی جفت شدگی قوی بین SPP و اکسیتون، شامل تبادل همدوس و تناوبی انرژی بین دو سیستم است. دوره‌ی تناوب این نوسانات که در نتیجه‌ی غیرخطی اپتیکی مربوط به سیستم هیبریدی است، روی زمان فوق سریع ۱۰fs توسط جمعیت اکسیتون مدوله می‌شود. بنابراین مکانیزم جدیدی برای همه‌ی سوئیچ‌های اپتیکی فوق سریع در قطعات پلاسمونی فعال ارائه می‌گردد [۴]. اگر دو مد پلکسیتونی (UP) و (LP) با ω_-, ω_+ بیان شوند، در $\delta = \omega_{SPP} - \omega_X = 0$ با در نظر داشتن اتلاف‌های مربوط به مد پلاسمونی γ_{SPP} و مد اکسیتونی γ_X، انرژی شکافتگی رابی Ω_R به عنوان انرژی جفت شدگی بین SPP و اکسیتون با رابطه‌ی $\Omega_R = \sqrt{(\omega_+ - \omega_-)^2 + 0.25(\gamma_{SPP} - \gamma_X)^2}$ مشخص می‌شود [۸]. در این کار به مطالعه‌ی قدرت جفت شدگی بین محیط اکسیتونی که جزء اصلی آن مولکول‌های رنگدانه‌ی سیانین TDBC با انباشت J شکل (J-aggregate) است و امواج SPP پرداخته شده و تغییرات Ω_R و $\Delta\omega = \omega_+ - \omega_-$ برحسب غلظت اکسیتون (f_J) در محیط مرکب (هوا، MgF_2 و J-aggregate)، مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل سازی اپتیکی

به منظور شبیه سازی اپتیکی، ساختار دو لایه‌ای به صورت شکل۱ در پیکربندی کریشمن در نظر بگیرید. با توجه به شکل۱ فضای $0 \le z \le d_{met}$ توسط ماده‌ی همگن فلزی از جنس نقره به ضخامت $40\,nm$ پر شده است. محیط اکسیتونی که در فاصله‌ی $d_{met} < z < d$ قرار گرفته است، به صورت همگن و ناهمسانگرد متشکل از دی الکتریک همگن و ناهمسانگرد MgF_2 به صورت CTF و نیمرسانای اکسیتونی J-aggregate با ضریب گذردهی نسبی ε_J است. کسر حجمی J-aggregate (f_J) در این محیط خیلی کوچک است ($f_J \ll 1$)، که در نتیجه اسکالرهای گذردهی نسبی مؤثر مربوط به ساختار CTF دربردارنده‌ی J-aggregate با کسر حجمی f_J از تئوری ماکسول گارنت محاسبه می‌شود. با فرض آنکه اسکالرهای گذردهی نسبی مربوط به CTF، $\varepsilon_{a,b,c}(f_v)$ نامگذاری شود (f_v کسر حجمی هوا در لایه‌های نازک ستونی متخلخل است)، اسکالرهای گذردهی نسبی مؤثر مربوط محیط اکسیتونی مرکب، $\varepsilon_{a,b,c}(f_v, f_J)$ نامیده می‌شود و از این رابطه به دست می‌آید [۹،۱۰]:

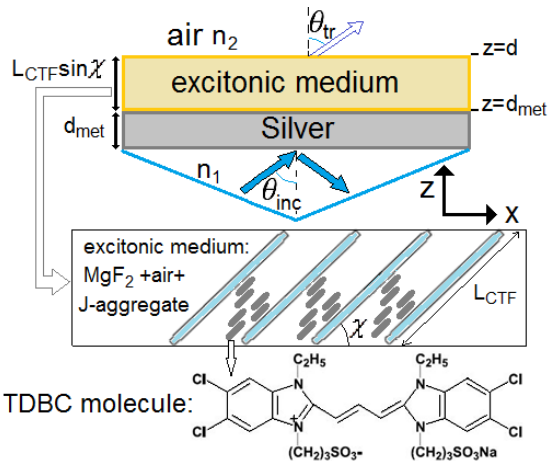
$$\varepsilon_{a,b,c}(f_v, f_J) = \varepsilon_{a,b,c}(f_v)\left(1 + \frac{f_J}{\frac{\varepsilon_{a,b,c}(f_v)}{\varepsilon_J - \varepsilon_{a,b,c}(f_v)} + \frac{1-f_J}{3}}\right)$$

ضخامت محیط اکسیتونی مرکب $L_{CTF} = 800\,nm$ و زاویه‌ی ستون‌های مربوط به آن $\chi = 25^\circ$ نسبت به محور x در صفحه‌ی xz فرض شده است. کسر حجمی هوا در

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

محیط اکسیتونی $f_v = 0.6$ و ضریب شکست آن $n_2 = 1$ است. ثابت دی الکتریک منشور (سلنایدروی) مقدار $n_1^2 = 6.656$ می‌باشد. برای محاسبه‌ی گذردهی دی الکتریک لایه‌های نازک ستونی ناهمسانگرد $\varepsilon_{a,b,c}(f_v)$، از روش همگن سازی بروگمن استفاده شده است [۱۱].

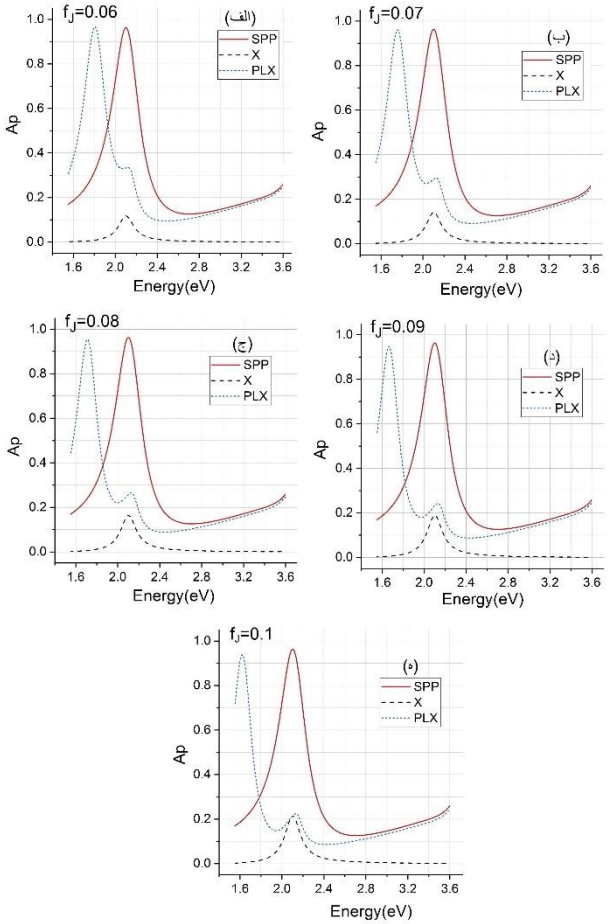
با فرض آنکه این ساختار در معرض یک پرتو نوری به شکل موج تخت با قطبش p تحت زاویه‌ی θ_{in} قرار گرفته باشد، منحنی‌های جذب اپتیکی بر حسب فرکانس نور فرودی برای SPP، اکسیتون سطحی (X) و پلکسیتون سطحی (PLX) به ازای غلظت‌های مختلف f_J ترسیم شد. محاسبات این کار را با روش ماتریس انتقال انجام شده است که جزئیات آن در کار قبلی ما و دیگران به طور مفصل آمده است [۱۱،۱۲].



شکل۱: ساختار دو لایه‌ای جهت جفت شدگی SPP و اکسیتون.

نتایج و بحث

طیف‌های جذب اپتیکی در بازه‌ی $(1.55 - 3.6)eV$ مربوط به مقادیر مختلف f_J در شکل۲ آمده است. مقدار θ_δ به ازای مقادیر مختلف f_J ثابت و برابر $27.545°$ است. بنابراین طیف جذب SPP در هر چهار نمودار (الف تا ه) در شکل۲ مشترک است. با افزایش f_J، بیشینه شدت جذب طیف اکسیتونی از 0.116 به 0.213 افزایش می‌یابد. بیشینه شدت جذب طیف اکسیتون متناسب با تعداد اکسیتون‌های برانگیخته (N) است [۱۳] و براین اساس که $\Omega_R \propto \sqrt{N}$ است، مقدار Ω_R با افزایش بیشینه شدت جذب طیف اکسیتون تقویت می‌شود [۱۳]. از هیبرید شدگی SPPها و اکسیتون‌ها به ازای همه‌ی مقادیر f_J، سیستم پلکسیتونی مطابق شکل۲ (الف تا ه)، دارای مدهای پلاریتونی UP,LP می‌باشد و با افزایش f_J، مطابق آنچه انتظار است، مدهای پلاریتونی واضح‌تر و $\Delta\omega$ افزایش می‌یابد.

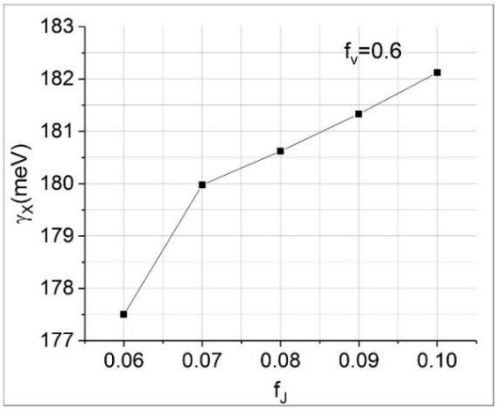


شکل۲: منحنی‌های جذب SPP، X و PLX بر حسب انرژی فوتون فرودی به ازای مقادیر مختلف f_J در θ_δ.

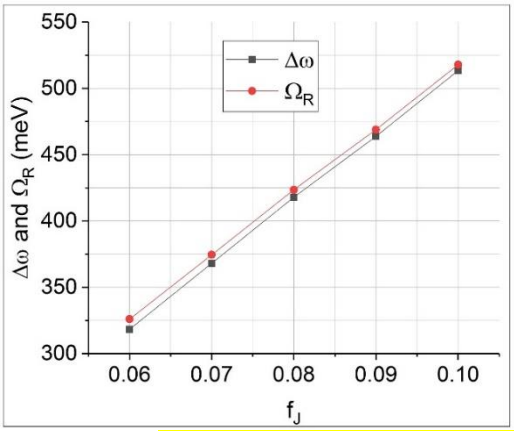
نمودار پهنای اکسیتون سطحی (γ_X) برحسب تغییرات f_J در شکل۳ نشان داده شده و مقدار γ_{SPP}، برابر با $317.9\ meV$ است. با توجه به شکل۳ با افزایش f_J ، γ_X افزایش جزئی می‌یابد. γ_X نیز از عوامل تنظیم کننده‌ی قدرت جفت شدگی است و افزایش آن جفت شدگی را تضعیف می‌کند [۱۴]، اما در این کار همزمان با افزایش اتلاف مد اکسیتونی، شاهد افزایش بیشینه شدت جذب طیف اکسیتونی هستیم؛ بنابراین با افزایش f_J، رفتار مد اکسیتونی منجر به تقویت قدرت جفت شدگی می‌شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

نمودارهای $\Delta\omega$ ، Ω_R و برحسب تغییرات f_J در شکل۴ نشان داده شده است. با افزایش f_J، $\Delta\omega$ از $318.34\ meV$ به $513.34\ meV$ و Ω_R از $325.99\ meV$ به $517.81\ meV$ افزایش می‌یابند. با افزایش f_J و به عبارتی با افزایش غلظت مولکول‌های TDBC در محیط میزبان که CTF می‌باشد، چگالی اپتیکی اکسیتون‌های خالص بالاتر می‌رود و جفت شدگی قوی‌تر می‌شود. نتایج کار ما در توافق با کار گروه بالسی و همکارانش است [۱۴].



شکل۳: نمودار γ_X برحسب f_J در θ_δ.



شکل۴: نمودارهای $\Delta\omega$ و Ω_R برحسب f_J.

در ناحیه‌ی جفت شدگی قوی، قبل از آنکه دو مد اصلی به طور کامل منهدم شوند، انرژی می‌تواند به صورت همدوس بین مدهای SPP و اکسیتونی در زمان کوتاه تبادل شود [۱۵]. دوره‌ی تناوب نوسانات رابی ($T = 2\pi/\Omega_R$) به ازای $f_J = 0.07,0.08,0.09,0.1$ به ترتیب $(11, 9.8, 8.8, 8)fs$ به دست آمده است و حاکی از آنست که انتقال انرژی بین SPP و اکسیتون‌ها در زمان کوتاه انجام شده است.

نتیجه‌گیری

بررسی جفت شدگی SPPها و اکسیتون‌های J-aggregate در ساختار مرکب به ازای مقادیر مختلف f_J در پیکربندی کریشمن انجام شد. افزایش f_J که با افزایش انرژی شکافتگی رابی همراه است، منجر به تقویت قدرت جفت شدگی می‌شود و به ازای $f_J = 0.1$ سریع‌ترین زمان تبادل همدوس انرژی بین SPPها و اکسیتون‌ها حاصل می‌گردد.

مرجع‌ها

[1] X. Li, L. Zhou, Z. Hao, and Q-Q. Wang, Advanced Optical Materials, Vol. 6, Iss. 18, 2018.
[2] J. R. Tischler, M. S. Bradley, Q. Zhang, T. Atay , A. Nurmikko, V. Bulovic, Organic Electronics, Vol. 8, Iss. 2–3, pp. 94–113, 2007.
[3] S. Balci and C. Kocabas, Optics Letters, Vol. 40, Iss. 14, pp. 3424-3427, 2015.
[4] P. Vasa, W. Wang, R. Pomraenke, M. Lammers, M. Maiuri, C. Manzoni, G. Cerullo and C. Lienau, Nature Photonics, Vol. 7, pp. 128-132, 2013.
[5] M. V. Sosnova, S. V. Mamykin, A. V. Korovin & N. L. Dmitruk, Nanoscale Research Letters, Vol. 11, Num. 144, 2016.
[6] I. Abdulhalim, M. Zourob & A. Lakhtakia, Electromagnetics, Vol. 28, Iss. 3, pp. 214-242, 2008.
[7] R. Zia, M. D. Selker, P. B. Catrysse, and M. L. Brongersma, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 21, Iss. 12, pp. 2442-2446, 2004.
[8] G. D. Chatzidakis and V. Yannopapas, Modern Optics, Vol. 66, Iss. 15, pp. 1558–1568, 2019.
[9] Vadim A. Markel, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 33, Iss. 7, pp.1244-1256, 2016.
[10] J. C. Hernández and J. A. Reyes, Physical Review E 96, Vol. 96, Iss. 6, 2017.
[11] A. Lakhtakia, R. Messier, *Sculptured Thin Films Nanoengineered Morphology and optics*, p.112, The International Society for Optical Engineering, 2005.
[12] F.Babaei, M.Rostami, Optics Communications, Vol. 439, pp. 8-15, 2019.
[13] D. E. Go´mez, K. C. Vernon, P. Mulvaney and T. J. Davis, Nano Letters, Vol. 10, pp. 274-278, 2010.
[14] S. Balci, C. Kocabas, S. Ates, E. Karademir, O. Salihoglu, and A. Aydinli, Physical Review B, Vol. 86, Iss. 23, 2012.
[15] W. Liu, Y. Wang, C. H. Naylor, B. Lee, B. Zheng, G. Liu, A. T. C. Johnson, A. Pan, and R. Agarwal, American Chemical Society Photonics, Vol. 5, Iss. 1, pp. 192–204, 2018.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

سرکار خانم مرضیه پریشانی
ویراستار محترم انجمن اپتیک و فوتونیک ایران
با سلام و احترام
بسیار سپاسگزارم فرصت اصلاح مقاله به ما داده شد. لازم میدانم توضیحاتی را خدمت سرکار محترم تحت عنوان پاسخ به کامنت‌ها در ذیل این نامه، درج کنم:
کامنت ۱: ایمیل ها در قسمت فارسی و انگلیسی نوشته شود.
پاسخ۱: انجام شد.
کامنت ۲: زیرنویس در زیر شکل قرار گیرد.
پاسخ۲: در کامنت ظاهراً به شکل ۳ اشاره شده بود، فاصله‌ی شکل۳ را از شکل۴ تنظیم کرده و نوشته‌های شکل‌های ۱،۳ و ۴ را در زیر شکل‌ها آوردیم.
همچنین مواردی نیز در شکل۲ و در متن تصحیح کرده ایم که لازم بوده است.
کامنت ۳: فرمت مراجع طبق تمپلیت باشد.
پاسخ۳: سایر مراجع طبق تمپلیت تصحیح شده است.
در فایل راهنمای نگارش مقاله در سایت اپتیک و فوتونیک ایران، اسم مقاله نیز آورده شده است. لازم به ذکر است به دلیل تعداد بالای مقالات استفاده شده در این کار و نبود فضای کافی جهت نوشتن نام مقاله‌ها، از ذکر نام مقاله‌ها خودداری کرده‌ایم که در غیر اینصورت لازم است که از متن اصلی مقاله زده بشود.
خواهشمندیم چنانچه درج نام مقاله از ضروریات باشد، فرصت مجدد ویرایش مقاله را در اختیار بگذارید و راهنمایی بفرمائید در این مورد چه اقدامی انجام شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]