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

تشدید فانو کوک‌پذیر در ساختار هیبریدی اتمی-پلاسمونی بخار روبیدیوم-لایه نازک طلا

محمد مصلح، ملیحه رنجبران، سیده مهری حمیدی

آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – پیشرفت‌های سریع در حوزه پلاسمونیک امکان تغییر خواص فوتونیکی مواد ناشی از اندرکنش نور با ماده را ممکن ساخته است. جفت شدن تشدیدی مد پلاسمونی با پهنای نسبتا بزرگ با یک خط جذبی اتم با پهنای خیلی کم یکی از این موارد است که موجب تغییر شکل خط جذب اتمی شده و کاربردهای منحصر به فرد خود را به همراه دارد. در این گزارش ما با استفاده از یک مدل نظری تعمیم یافته بر مبنای مدل فانو، جفت شدگی مدهای پلاسمونی با گذار اتمی D_2 اتم روبیدیوم را مورد بررسی قرار داده‌ایم. در این ساختار پیشنهادی تغییر زاویه فرود نور به ساختار را به عنوان یک راهکار خیلی سریع و موثر برای کوک‌پذیری خط جذب اتمی مورد استفاده قرارد داده و تشدید فانو را کنترل کرده‌ایم.

کلید واژه- خط جذب فانو، مد پلاسمونی، شفافیت القایی الکترومغناطیسی، ساختار هیبریدی اتمی-پلاسمونی، اتم روبیدیوم.

Tunable Fano resonance in atomic-plasmonic hybrid structure made of Rubidium atomic vapor-Au thin film

Mohamamd Mosleh, Maliheh Ranjbaran, Seyedeh Mehri Hamidi

Magnetoplasmonic Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. M_hamidi@sbu.ac.ir

Abstract- Following the rapid progress in the field of plasmonics, it is possible to alter the optical properties of materials as a consequence of light matter interaction. Resonant coupling between the relatively broad plasmonic resonance and ultra-narrow atomic line is one of these cases which causes changing of the atomic line shape and so supports special applications. In this paper we have studied the coupling between the plasmonic modes and D_2 resonance line of Rubidium based on the theoretical Fano model. In the proposed structure, we have introduced the change of the angle of light incidence as an efficient tool for tuning the atomic line-shape and its associated Fano resonance.

Keywords: Fano lineshape, plasmonic mode, EIT, atomic-plasmonic hybrid structure, Rubidium atom.

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

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

مقدمه

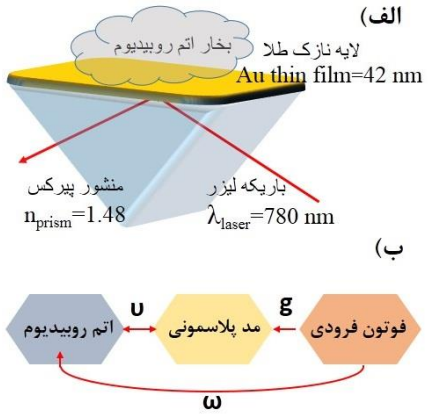
تشدید فانو یکی از پدیده‌های مهم فیزیکی است که اولین بار توسط آقای فانو به عنوان یک تداخل کوانتومی در جفت‌شدگی یک حالت گسسته با یک حالت پیوسته مطرح شد [۱] و کاربردهای فراوانی در طیف‌نگاری، سوئیچ‌های نوری، موجبرهای کم اتلاف، اپتیک غیرخطی و حسگرهای شیمیایی و زیستی یافته است [۲].

در یک ساختار متشکل از اتم و مد پلاسمونی، با توجه به پهنای بزرگ طیفی مد پلاسمونی و پهنای کم جذب اتمی، تشدید فانو مشاهده می‌شود. می‌توان از تشدید فانوی حاصل از جفت‌شدگی اتم‌های فلز قلیایی با پلاسمون پلاریتون‌های سطحی [۳] و جایگزیده [۴] در کاربردهایی چون سوئیچ تمام نوری و حسگر بهره گرفت.

به منظور تحلیل تشدید فانو، تاکنون مدل‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله آنها می‌توان به مدل مبتنی بر ماتریس پراکندگی [۵] و یا مدل دو نوسانگر کلاسیکی جفت شده اشاره کرد[۶]. انتخاب هر مدل بستگی به اهداف مورد نظر، کاربرد دارد. در این مقاله، برای یک ساختار هیبریدی مبتنی بر هندسه کرشمن با بستره طلا در مجاورت بخار فلز قلیایی روبیدیوم، مدل تعمیم یافته‌ای بر پایه مدل اولیه آقای فانو، به کار گرفته شده است[۷]. در این مدل برهم‌کنش دو مد تشدیدی اتمی-پلاسمونی،در نزدیکی خط جذب اتمی و دورتر از آن مورد تحلیل و بررسی واقع شده است.

ساختار مورد بررسی

ساختار مورد بررسی ما یک سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی، با کوک‌پذیری زاویه‌ای می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، نور فرودی پس از بازتاب داخلی از منشور با مد بالقوه پلاسمونی جفت شده و سپس جفت‌شدگی میان مد پلاسمونی و گذار اتمی روبیدیوم به وجود می‌آید، که در مجموع نتیجه این جفت‌شدگی‌ها به صورت خط جذب غیرمتقارن فانو نمایان می‌شود.



شکل ۱: ساختار هیبریدی مبتنی بر هندسه کرشمن با بستره طلا در مجاورت بخار فلز قلیایی روبیدیوم.

مبانی نظری

در مدل فانو، تشدید حاصل از جفت‌شدگی دو مد گسسته و پیوسته با رابطه ۱ داده می‌شود،

$$\sigma(E) = \frac{(e+q)^2}{e^2+1} \qquad (۱)$$

که در آن، $q = \frac{2\upsilon\omega/g}{\Gamma_d(E)} + \frac{2(E-E_p)}{\Gamma_p(E)}$ ، پارامتر شکل است و عدم تقارن در سیستم را نشان می‌دهد و سه پدیده EIT و جذب لورنتسی و خط جذب فانو، به ترتیب بسته به مقدار q با مقادیر q=0، q=∞، q≠0 و q≠∞ رخ می‌دهند، و همچنین پارامتر دیگر، $\boldsymbol{e = \frac{2E}{\Gamma_d(E)} + \frac{2(E-E_p)}{\Gamma_p(E)}}$، به انرژی فوتون فرودی E، و انرژی گذار اتمی و پهنای گذار اتمی بستگی دارد. ضرایب جفت شدگی میان مدهای مختلف (نشان داده شده در شکل ۱) در واقع به جزئیات دقیق هندسه ساختار بستگی دارد. ولی می‌توان در تقریب اول این ضرایب را به این‌صورت در نظر گرفت: ضریب g، احتمال تحریک پلاسمون توسط یک موج تخت و با در نظر گرفتن پهنای مد پلاسمونی، به صورت $g^2 \sim \Gamma_p/2\pi$ و جفت شدگی مدپلاسمونی با جذب اتمی با توجه به قاعده طلایی فرمی و به شکل $\upsilon^2 \sim \Gamma_d/2\pi$ همچنین با توجه به احتمال

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

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

کم عبور نور از لایه فلزی و رسیدن به اتم روبیدیوم، ضریب جفت‌شدگی میان فوتون فرودی و اتم روبیدیوم صفر در نظر گرفته شده است ($\omega \sim 0$).

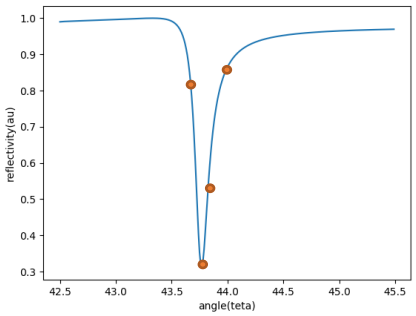
نتایج

همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در ساختار هیبریدی، مد پلاسمونی در یک لایه نازک طلا و با استفاده از یک منشور تحریک می‌گردد. کمینه زاویه بازتاب لیزر با طول موج ۷۸۰ nm (خط جذبی D_2 اتم روبیدیوم) از این سامانه را می‌توان با استفاده از ضرایب فرنل در یک سامانه سه لایه‌ای شامل محیط دی‌الکتریک منشور، لایه نازک طلا و خلا به دست آورد.

$$R = \left| \frac{r_{01}^{p} + r_{12}^{p} exp\,(2ik_{21}d)}{1 + r_{01}^{p} r_{12}^{p} exp\,(2ik_{21}d)} \right|^2 \qquad (۲)$$

$$r_{ik}^{p} = \left(\frac{k_{zi}}{\varepsilon_i} - \frac{k_{zk}}{\varepsilon_k}\right) / \left(\frac{k_{zi}}{\varepsilon_i} + \frac{k_{zk}}{\varepsilon_k}\right) \qquad (۳)$$

محاسبات این روابط با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون برای ساختار هیبریدی (شکل ۱) انجام گرفته و نمودار تغییرات بازتاب بر اساس تغییر زاویه بدست آمد(شکل۲).



شکل ۲: بازتاب از ساختار پلاسمونی منشور/لایه نازک طلا/خلا در هندسه کرشمن، بر حسب زاویه فرود نور لیزر بر منشور، نقاط قرمز رنگ نشان دهنده زاویه-های مورد بررسی در محاسبات است.

کمینه بازتاب در زاویه فرود ۴۳/۷ درجه نشان دهنده مد پلاسمونی در لایه نازک طلا می‌باشد، مشخصات مد پلاسمونی در این زاویه و همچنین برای سه زاویه ۴۳/۶ و ۴۳/۸ و ۴۴ درجه (نقاط قرمز رنگ شکل۲) محاسبه شدند.

پهنای طیفی شامل دو سهم اتلاف موسوم به اتلاف داخلی که از اتلاف اهمی فلز ناشی می‌شود و یک سهم اتلاف تابشی که به ضخامت لایه نازک بستگی دارد، با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می شوند [۸].

$$\Gamma = Im\left(\Delta k_{x,spp}\right) + Im(k_{spp}) \qquad (۴)$$

در این رابطه، k_{spp} نشان دهنده بردار موج مد پلاسمون-پلاریتون سطحی است که قسمت موهومی آن برای محاسبه اتلاف اهمی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد.

$$k_{spp} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{metal}\varepsilon_{vac}}{\varepsilon_{metal} + \varepsilon_{vac}}} \qquad (۵)$$

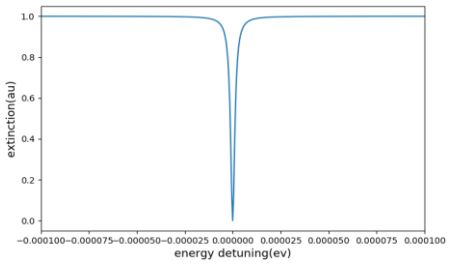
$\Delta k_{x,spp}$ نیز نشان دهنده میزان اتلاف تابشی مد پلاسمون-پلاریتونی در لایه نازک طلا است که از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$\Delta k_x = \left[\frac{\omega}{c}\frac{2}{1 + |\varepsilon_1'|}\left(\frac{|\varepsilon'|}{|\varepsilon_1'| - 1}\right)^{3/2} exp(-2|k_x^0|d_1)\right] r_{01}^{p} \qquad (۶)$$

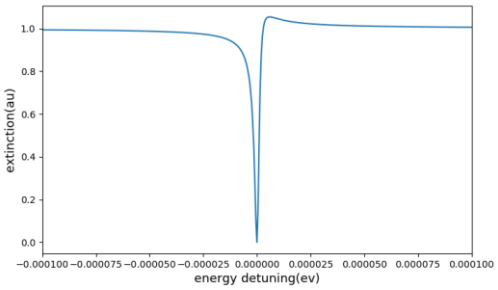
بدین ترتیب مشخصات مد پلاسمونی، ضرایب جفت شدگی و همچنین پارامتر عدم تقارن q و انرژی کاهش یافته e، محاسبه شدند. مشخصات گذار D_2 روبیدیوم با در نظر گرفتن پهن شدگی دوپلری به میزان ۶۰۰ مگاهرتز و پهن شدگی ذاتی به میزان ۴۰ مگاهرتز[۳]، در نظر گرفته شده‌اند. سپس با استفاده از رابطه ۱، خط جذبی اتم روبیدیوم در مجاورت یک مد پلاسمون-پلاریتون سطحی در زاویه‌های مختلف در شکل‌های ۳ تا ۶ رسم شده است. در رسم نمودارها برای درک بهتر، انرژی گذار D_2 اتم روبیدیوم صفر در نظر گرفته شده و تغییرات بسیار کم انرژی نسبت به آن رسم شده است. دقت در سیر نمودارها نشان می‌دهد که در شکل ۳ و زاویه فرود نور معادل با کمینه بازتاب پلاسمونی، شاهد پدیده‌ی EIT و در سایر نمودارهای شکل ۴، شاهد خط جذب غیرمتقارن موسوم به فانو می‌باشیم.

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

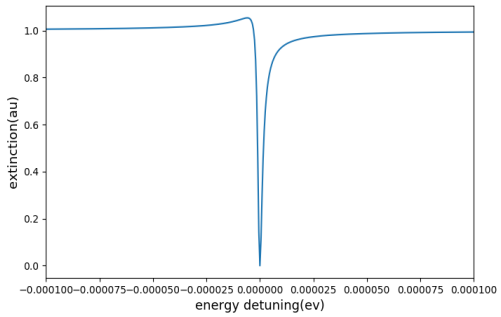
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



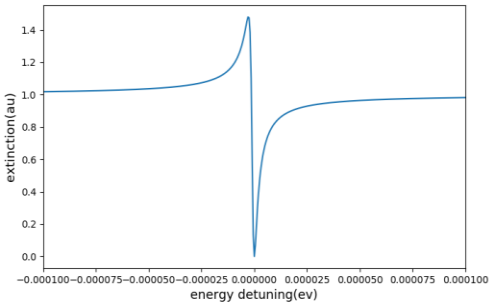
شکل۳: خط جذب متقارن EIT اتم روبیدیوم در ساختارهیبریدی اتمی-پلاسمونی در زاویه فرود ۴۳/۷ درجه نور لیزر.



الف)



ب)



ج)

شکل ۴: جذب غیرمتقارن فانو شکل اتم روبیدیوم در ساختار هیبریدی اتمی-پلاسمونی و در زاویه فرود الف) ۴۳/۶ ب) ۴۳/۸ و ج) ۴۴ درجه.

نتیجه‌گیری

تشدید فانو یکی از پدیده‌های مهم فیزیکی است که در کابردهای بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله قابلیت کوک‌پذیری تشدید فانو در ساختار هیبریدی لایه نازک طلا-بخار روبیدیوم با زاویه خط جذب اتم روبیدیوم مورد بررسی قرار گرفت. با وارد کردن پارامترهای مربوط به دو مد پلاسمونی و اتمی، پدیده‌های EIT و فانو در مجاورت مد پلاسمون-پلاریتونی لایه نازک فلز مشاهده شد. با استفاده از این روش می‌توان عوامل مؤثر بر تشدید فانو را پیش از ساخت سامانه تجربی مورد بررسی قرار داده و بهینه ساخت.

مرجع‌ها

[1] U. Fano, "Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts", Phys. Rev., Vol. 124, No. 6, pp. 1866-1878, 1961.

[2] Y. Deng, G. Cao, H. Yang, G. Li, X. Chen, W. Lu, “Tunable and high-sensitivity sensing based on Fano resonance with coupled plasmonic cavities”, Sci. Rep., Vol. 7, No. 1, pp. 10639(1-8), 2017.

[3] L. Stern, M. Grajower and U. Levy, "Fano resonances and all-optical switching in a resonantly coupled plasmonic–atomic system", Nat. Commun, Vol. 5, pp.4865 (1-9), 2014.

[4] S. A. Aljunid, E. A. Chan, G. Adamo, M. Ducloy, D. Wilkowski and N. I. Zheludev, "Atomic Resp onse in the Near-field of Nanostructured Plasmonic Metamaterial", Nano. Lett., 2016.

[5] Pochi YehAmnonYariv, Chi Shain Yang, "electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory ", J. Opt. Soc. Am, 1977.

[6] Yong S JoeArkadyM Satanin, and Chang Sub Kim, "Classical analogy of Fano resonances", Phys. Scr, 2006.

[7] Vincenzo GianniniYanFrancescato, Hemmel Amrania, Chris C. Phillips, and Stefan A. Maier, " Fano Resonances in Nanoscale Plasmonic Systems: A Parameter-Free", Nano .Lett., 2011.

[8] H, Raether, "surface plasmons on smooth and rough surfaces", springer-verlag, 1986.

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

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