بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

حالت‌های تام غیرخطی در فراماده پلاسمونیک نانوساختار بی‌نهایت

سجاد جنتی[۱]، محسن حاتمی[۲] و مهدی شریفیان[۱]

[۱]گروه اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، صندوق پستی: ۷۴۱- ۸۹۱۹۵ ، یزد، ایران

[۲]دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - ما به تجزیه و تحلیل مدهای سطحی غیر خطی در یک فراماده پلاسمونیک نانوساختار پرداخته و را بطه پاشندگی را برای دو قطبش *TE* و *TM* در یک ساختار بی‌نهایت بدست آوردیم که می‌تواند به عنوان یک آنالوگ اپتیکی حالت‌های تام الکتریکی در نظر گرفته شود. چنین حالتهای تام غیر خطی حتی در مواردی که مدهای سطحی خطی وجود ندارند نیز می‌تواند ظاهر شوند.

کلید واژه- فراماد پلاسمونیک،

Nonlinear Tamm states in plasmonic metamaterials for infinit nanostructured

Janati, Sajad[1]; Hatami, Mohsen[2]; Sharifian, Mehdi[1]

[1]Atomic & Molecular Group, Department of Physics, University of Yazd, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

[2]Department of Physics, Technical University of Shiraz, Shiraz, Iran

Abstract- We analyze nonlinear surface modes supported by a metal-dielectric nanostructured metamaterial with a nonlinear surface layer.We demonstrate that such a infinite structure can support both TE and TM polarized surface modes with the subwavelength localization, which can be regarded as an optical analog of the electronic Tamm states. Such nonlinear Tamm states may appear even in the cases when linear surface modes do not exist.

Keywords: plasmonic metamaterials

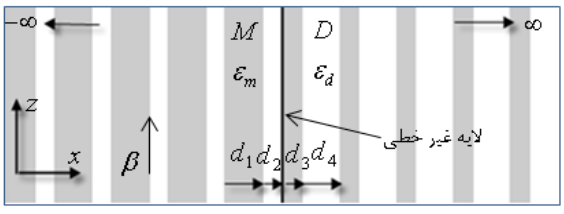
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

در اپتیک وجود امواج الکترومغناطیس خطی روی سطح فلز، در فصل مشترک جدا کننده بین دو محیط همگن و دی‌الکتریک دوره‌ای به خوبی شناخته شده است [۱]. مطالعه امواج سطحی الکترومغناطیس غیرخطی مورد توجه ریادی قرار گرفته. به صورت نظری و به صورت تجربی نشان داده شده که خود به دام افتادگی نور در نزدیک لبه‌های یک آنتن موجبر یک بعدی برای تشکیل حالت‌های تام غیرخطی امکان‌پذیر می‌باشد[۲]. نتایج تحقیقات در این زمینه نشان داده است که مدهای سطحی مانند وجود امواج غیر خطی خود به دام افتاده بالای یک شدت آستانه معین، از برخی ویزگی‌های غیرخطی بدست می‌آیند.

به تازگی نشان داده شده که مدهای سطحی پلاسمونیک محدود شده قوی می‌توانند در فرامادہ دی‌الکتریک-فلز به وجود آیند[۳] . چنین مدهای سطحی همواره با یک اتلاف پایین نسبت به پلاسمون‌های دیگر همراه هستند که آنها را می‌توان تحت کنترل قرار داد و به وسیله یک طرح‌یابی ساده از لایه‌های فلز، محدود کرد.

بررسی مدهای سطحی در یک ساختار نیمه بی‌نهایت فلز-دی‌الکتریک بایه لایه غیر خطی انجام شده است[۴]. در این مقاله ما چگونگی انتشار مدهای سطحی غیرخطی و تجزیه و تحلیل حالت‌های تام غیر خطی برای دو نوع قطبش TE و TM در یک ساختار بینهایت فلز-دی-الکتریک با یک لایه غیرخطی را شرح می‌دهیم. به این ساختار فلز-دی‌الکتریک فرامادہ پلاسمونیک گفته میشود. در قسمت (۱-۲) به شرح چگونکی انتشار مدهای سطحی غیر خطی با قطبش TE پرداخته و در قسمت (۲-۲) مد-های سطحی غیر خطی با قطبش TM را مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل۱: تصویری از یک ساختار بینهایت فلز-دی‌الکتریک با یک لایه غیرخطی

۲- مدهای سطحی غیر خطی

شکل۱ یک ساختار بینهایت فلز-دی الکتریک را بایک لایه غیر خطی نشان میدهد. به گونه‌ای که $d_2/d_1 = d_3/d_4$. حال دو ساختار TE و TM را به طور جداگانه بررسی میکنیم.

۱-۱-مدهای با قطبش TE

ما به دنبال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستیم که دامنه آنها به صورت $\left(E_y, H_x\right) e^{i(\beta z-\omega t)}$ باشد. با توجه به معادلات ماکسول معادله غیر خطی دامنه میدان برای لایه غیر خطی در حالت TE به صورت زیر بدست می آید[۴].

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}+\left(\varepsilon k_0^2-\beta^2\right)E_y=0 \qquad (۱)$$

که $k_0=\omega/c$ و β بردار انتشار موج و ε ثابت دی-الکتریک برای قطبش TE در حالت کر غیرخطی می‌باشد.

$$\varepsilon=\varepsilon_{lin}+\chi_3\left|E_y\right|^2 \qquad (۲)$$

در این محاسبات ما فرض می‌کنیم که لایه غیر خطی نازک است ($d=2nm$) و همچنین تغییرات ثابت دی‌الکتریک غیر خطی را ناچیز فرض می‌کنیم که این به معنای خاصیت غیر خطی ضعیف است ($\delta\varepsilon_{nl}/\varepsilon \ll 1$). در این حالت رابطه زیر یک راه حل معقول برای معادله (۲) می‌باشد.

$$E_y=A\sin\left[q(x+d)\right]+B\cos\left[q(x+d)\right] \qquad (۳)$$

که $q=\sqrt{\varepsilon k_0^2-\beta^2}$ و d ضخامت لایه غیر خطی است. امپدانس سطحی برای یک ساختار فلز-دی‌الکتریک به صورت $Y_{TE}=H_z/E_y$ معرفی می‌شود که به صورت تابعی از مولفه‌های ماتریس انتقال میباشد.[1]

$$Y_{TE}=\frac{e^{iKD}-T_{11}^{TE}}{T_{12}^{TE}} \qquad (۴)$$

K و D به ترتیب بردار موج بلوخ و طول دوره بلوخ می‌باشند. با درنظر گرفتن شرایط مرزی در لایه‌های نازک [۵] و رابطه (۷) رابطه پاشندگی به صورت زیر به‌دست

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

می‌آید.

$$Y_{TE}^{L} - Y_{TE}^{R} = ik_0 d\,(\varepsilon - \frac{\beta^2}{k_0^2} - Y_{TE}^{R} Y_{TE}^{L}) \qquad (۵)$$

که در آن Y_{TE}^{R} و Y_{TE}^{L} به ترتیب امپدانس سطحی طرف راست و چپ ساختار میباشد.اگر طرف راست رابطه (۸) را برابر صفر قرار دهیم این رابطه به رابطه پاشندگی خطی تبدیل میشود. درواقع طرف راست به خاطر ظاهر شدن اثر غیر خطی می‌باشد. با توجه به اینکه $\varepsilon - \varepsilon_{lin} = \chi_3 \left|E_y\right|^2 = \chi_3 I_0$، معادله (۸) به صورت تابعی از شدت موج I_0 ، فرکانس ω و بردار انتشار β بیان می‌شود. ما در این مقاله تنها حالت غیر خطی متمرکز ($\chi_3 > 0$)را مورد بررسی قرار میدهیم. و دامنه میدان را به گونه ای نرمالیزه می‌کنیم که $\chi_3 = 1$.

برای محاسبه شار انرژی از انتگرال بردار بوینگ تینگ در طول ساختار استفاده می‌کنیم. برای قطبش TE داریم

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} dx S_z = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{Re}(E_y H_x^*)dx \qquad (۶)$$

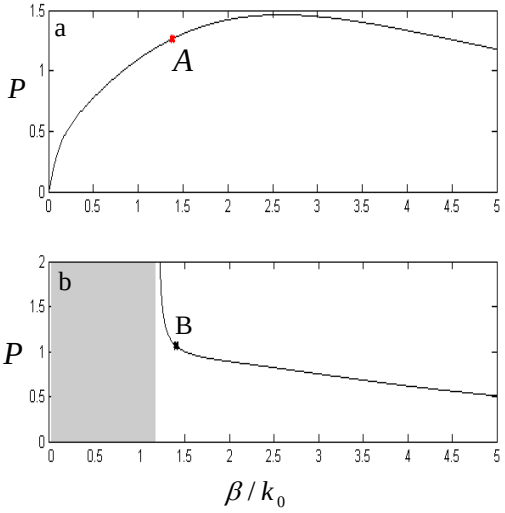
$$= \frac{\beta}{2k_0}\left|E_y(0)\right|^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left|u(x)\right|^2 dx$$

که $u(x)$ دامنه موج نرمالیزه شده بر روی شدت میدان در فصل مشترک لایه غیر خطی می‌باشد. جواب انتگرال را میتوان با توجه به ناچیز بودن ضخامت لایه غیر خطی به صورت زیر به دست آورد[۱].

$$P = \frac{I^L}{1-\exp(-2\,\mathrm{Im}(K^L))} + \frac{I^R}{1-\exp(-2\,\mathrm{Im}(K^R))} \qquad (۷)$$

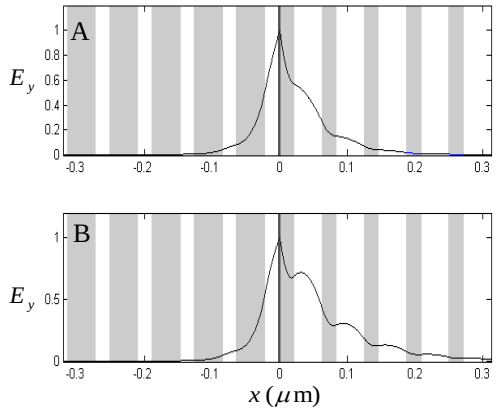
. که I^L و I^R با محاسبه عددی با استفاده از ماتریس انتقال بدست می‌آید.

حال می‌توان شار انرژی بر واحد طول P را به صورت تابعی از فرکانس ω و بردار انتشار β بیان کرد. با انتخاب $D = 62.5nm$ و $d_2/d_1 = d_4/d_3 = 1/3$ و با نادیده گرفتن قسمت مربوط به جذب در ناحیه فلزی رابطه پاشندگی β بر حسب P را در فرکانسهای مختلف میتوان بدست آورد. در شکل‌های (۲-a) و (۲-b)ما رابطه پاشندگی را در دو فرکانس $\omega = 2ev$ و $\omega = 4ev$ و $\varepsilon_d = 4$ ترسیم کرده‌ایم قسمت خاکستری ناحیه مجاز مربوط به حالتهای خطی را نشان می‌دهد.



شکل۲:نمودار پاشندگی برای $\omega = 2eV$ (a) و $\omega = 2eV$ (**b**)

نمودارهای شکل (۳) تغییرات دامنه میدان را در نقاط A و B نشان میدهد.



شکل۳: تغیرات دامنه میدان در نقاط A و B در شکل۲ (ناحیه خاکستری فلز و ناحیه سفید دی‌الکتریک)

۱-۲ مدهای با قطبش TM

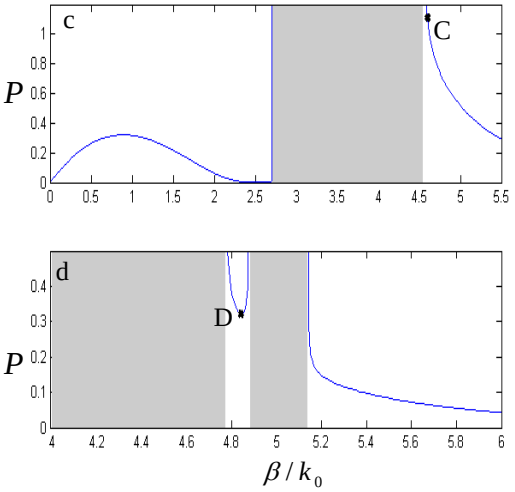
در اوموج با قطبش TE ثلبت دی‌الکتریک تنها یک مولفه میدان الکتریکی داشت اما در قطبش TM ثابت دی‌الکتریک دو مولفه میدان الکتریکی دارد که به صورت زیر می‌باشد.

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

$$\varepsilon = \varepsilon_{lin} + \chi_3(|E_x|^2 + |E_z|^2) \qquad (۸)$$

با در نظر گرفتن شرایط گفته شده در قسمت (۲-۱) و معادلات ماکسول رابطه دامنه میدان مغناطیسی برای لایه غیر خطی به صورت زیر می‌باشد.

$$H_y = A\sin[q(x+d)] + B\cos[q(x+d)] \qquad (۹)$$



شکل۴: نمودار پاشندگی در $\omega = 3eV$ (c) و $\omega = 3.5eV$ (b)

امپدانس سطحی بزای قطبش TM نیز به صورت زیر است

$$Z_{TM} = \frac{\partial E_y}{\partial H_z} = \frac{T_{12}^{TM}}{e^{iKD} + T_{11}^{TM}} \qquad (۱۰)$$

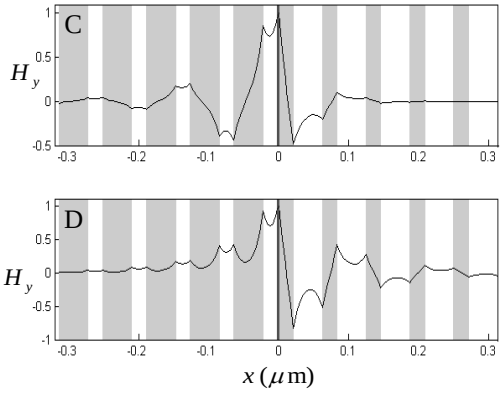
حال با در نذر گرفتن شرایط مرزی و رابطه (۱۰) رابطه پاشندگی بدست می‌آید.

$$Z_{TM}^R - Z_{TM}^L = ik_0 d\,(1 - \frac{\beta^2}{\varepsilon k_0^2} + Z_{TM}^R Z_{TM}^L \varepsilon) \qquad (۱۱)$$

که Z_{TM}^R و Z_{TM}^L به ترتیب امپدانس سطحی در طرف راست و چپ لایه غیر خطی می‌باشند. باتوجه به اینکه $E_x = -\beta H_y / k_0 \varepsilon$ و با در نظر گرفتن رابطه (۱۳) و (۱۱) داریم

$$\varepsilon - \varepsilon_{lin} = \chi_3(\frac{\beta^2}{\varepsilon^2} + |Z_{TM}|^2) \qquad (۱۲)$$

رابطه (۱۴) یک معدله درجه ۲ از ε میباشد که در نتیجه دو مقدار برای ε به ما میدهد. ما ثابت دی-الکتریکی انتخاب میکنیم که شرایط غیر خطی ضعیف را محقق کند[۴]. شار انرژی در واحد طول نیز همانند روش گفته شده در TE به دست می آید.



شکل۵: تغیرات دامنه میدان در نقاط C وD در شکل۴ (ناحیه خاکستری فلز و ناحیه سفید دی‌الکتریک)

شکل‌های (c-۴) و (d-۴) نمودار پاشندگی در فرکانس-های $\omega = 3eV$ و $\omega = 3.5eV$ نشان می‌دهد. محدوده خاکستری و نقاطی که در $P = 0$ قرار دارند مربوط به حالت خطی و قسمت‌های دیگر پهنای باند مجاز در حالت غیر خطی می‌باشد.

نتیجه گیری

رابطه پاشندگی برای یک ساختار نیمه بینهایت مورد بررسی قرار گرفته است. ما دراین مقاله رابطه پاشندگی را برای یک ساختار فلز-دی الکتریک بینهایت بایک لایه نازک غیر خطی برای دو نوع قطبش TE و TM بدست آورده و نشان دادیم که اثر غیر خطی با ایجاد پهنای باند مجاز امکان انتشار مدهای سطحی را میدهد که انتشار آنها درحالت خطی امکان پذیر نمی‌باشد.

مراجع

[1] P. Yeh, A. Yariv, *Optical surface waves in periodic layered media*, and A. Y. Cho, Appl. Phys. Lett. 32, 104 (1978).

[2] I. Iorsh, P. A. Belov, I. V. Shadrivov, and Yu. S. Kivshar, *Nonlinear Tamm states in layered metal–dielectric metamaterial* , Phys.Status Solidi: Rapid R. Lett. 6, 43 (2012).

[3] S. H. Nam, E. Ulin-Avila, G. Bartal, and X. Zhang, *General properties of surface modes in binary metal-dielectric metamaterials* , Opt. Express 18, 25627 (2010).

[4] Ivan V. Iorsh, Pavel A. Belov, Alexander A. Zharov, *Nonlinear Tamm states in nanostructured plasmonic metamaterials*, PHYSICAL REVIEW A 86, 023819 (2012)

[5] A. Karlsson, *Approximate Boundary Conditions for Thin Structures*, IEEE Trans. Antennas Propag. 57, 144 (2009).

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