همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

رابطه پاشندگی پلاسمون برای محیط پلاسمونی با تابع دی‌الکتریک متغیر

سعیده گلزاری ضمیر، علیرضا عبدی کیان*

گروه فیزیک و فوتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر

چکیده: در این مقاله، رابطه پاشندگی پلاسمونی در مد TM برای سطح مشترک تخت بین یک محیط دی‌الکتریک یکنواخت با ثابت ε_d و یک محیط پلاسمونی با تابع دی‌الکتریک متغیر $\varepsilon_p(z)$ (که در آن z راستای عمود بر سطح مشترک است) به دست می‌آید. معلوم می‌شود که این رابطه به مقدار مشتق $\varepsilon_p(z)$ در سطح مشترک بستگی دارد و وقتی که ε_p مقدار ثابتی باشد و یا مشتق آن در مرز صفر باشد به رابطه شناخته شده برای محیط یکنواخت پلاسمونی تبدیل می‌شود. برای موردی که تابع $\varepsilon_p(z)$ وابستگی خطی به z داشته باشد رابطه پاشندگی به دست آمده ترسیم می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که غیر یکنواخت بودن تابع دی‌الکتریک محیط پلاسمونی می‌تواند آزادی عمل خوبی در کنترل معادله پاشندگی و فرکانس تشدید پلاسمونی در اختیار قرار دهد.

کلید واژگان: پلاسمون؛ رابطه پاشندگی؛ تابع دی‌الکتریک متغیر.

Plasmonic dispersion relation for a plasmonic medium with variable dielectric constant

Saeideh Golzari Zamir, Alireza Abdikian

Department of physics and photonics, Malayer university, Malayer, Iran.

Abstract- In this paper, the plasmonic dispersion relation in TM mode for the plane interface between a homogeneous dielectric medium with a constant ε_d and a plasmonic medium with a variable dielectric function $\varepsilon_p(z)$ (in which 'z' is the normal coordinate to the interface) is obtained. It is revealed that the dispersion relation is related to the value of the derivative of $\varepsilon_p(z)$ at the interface and when the ε_p becomes constant or its derivative at the interface is zero then the well-known dispersion relation for homogeneous plasmonic medium is obtained. For the case where $\varepsilon_p(z)$ depends linearly on z, the dispersion relation is obtained and plotted. The results show that non-homogeneity of the plasmonic medium offers a good freedom to control dispersion relation and the plasmonic resonance frequency.

Keywords: Plasmon; dispersion relation; variable dielectric function.

* abdykian@gmail.com

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

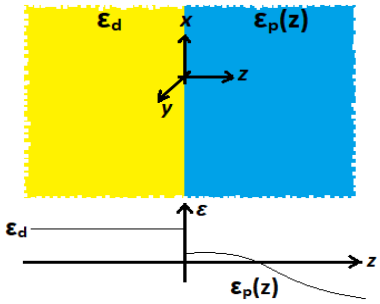
۱- مقدمه

پلاسمون سطحی به نوسان جمعی الکترون‌ها در سطح مشترک یک محیط دی‌الکتریک و یک محیط پلاسمونی گفته می‌شود. علم پلاسمونیک کاربردهای بسیاری در بحث حسگرها، آشکارسازها و فنّاوری‌های نوین به ویژه نانوفنّاوری دارد [۱].

کارهای نظری که در مراجع برای مطالعه پلاسمون و یافتن رابطه پاشندگی آن انجام شده است عمدتاً به سطح مشترک تخت بین دو محیط با ضریب شکست های ثابت مربوط می‌باشند [۴-۲]. به نظر می‌رسد که متغیّر گرفتن ضریب شکست محیط پلاسمونی می‌تواند منجر به تغییر رابطه پاشندگی شود و آثار جالبی در پی داشته باشد. در این مقاله، به رابطه پاشندگی پلاسمون در مرز تخت بین یک محیط دی الکتریک با تابع دی‌الکتریک ثابت ε_d و یک محیط پلاسمونی با تابع دی‌الکتریک وابسته به مکان $\varepsilon_p(z)$ پرداخته می‌شود.

۲- رابطه پاشندگی پلاسمون

دو محیط نیمه نامتناهی با تابع دی‌الکتریک نسبی ε_d و $\varepsilon_p(z)$ در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱- دو محیط نیمه نامتناهی که با یک سطح مشترک تخت از هم جدا شده‌اند. شکل پایین نیمرخ تابع دی‌الکتریک را نشان می‌دهد.

برای یافتن مدهای پلاسمونی، میدان‌های الکترومغناطیسی (برای مد TM) در دو محیط مذکور به صورت زیر لحاظ می‌گردند [۲]:

$$\vec{E}(z)=\begin{cases}(E_x(0),0,E_z(0))e^{ik_x x}e^{\alpha_d z} & , \quad z<0\\ (E_x(0),0,\dfrac{\varepsilon_d}{\varepsilon_p(0)}E_z(0))e^{ik_x x}f(z) & , \quad z>0\end{cases} \quad , \quad \vec{H}(z)=\begin{cases}(0,H_y(0),0)e^{ik_x x}e^{\alpha_d z} & , \quad z<0\\ (0,H_y(0),0)e^{ik_x x}g(z) & , \quad z>0\end{cases} \tag{۱}$$

که در آنها $f(z)$ و $g(z)$ توابعی نامعلوم و نزولی هستند که با داشتن $\varepsilon_p(z)$ می‌توان آنها را پیدا کرد. پیوستگی مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی و مغناطیسی در $z=0$ ایجاب می‌کند که $f(0)=g(0)=1$ باشد. α_d نیز ضریب میرایی نمایی در محیط دی‌الکتریک است. با اعمال معادلات کِرل ماکسول به میدان‌های رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}&\alpha_d H_y(0)=i\omega\varepsilon_0\varepsilon_d E_x(0)\\ &H_y(0)\frac{dg(z)}{dz}=i\omega\varepsilon_0\varepsilon_p(z)E_x(0)f(z) \quad , \quad E_x(0)\frac{df(z)}{dz}=i\omega\mu_0\left(1-\frac{c^2k_x^2}{\varepsilon_p(z)\omega^2}\right)H_y(0)g(z)\end{aligned} \tag{۲}$$

از دو معادله اول رابطه (۲) و نیز به کارگیری قانون گاوس (یا همان معادله چهارم ماکسول در عدم حضور بارهای خارجی) داریم:

$$\frac{dg(z)}{dz}\Big|_{z=0}=\alpha_d\frac{\varepsilon_p(0)}{\varepsilon_d} \quad , \quad \frac{df(z)}{dz}\Big|_{z=0}=\alpha_d\frac{\varepsilon_p(0)}{\varepsilon_d}-\frac{1}{\varepsilon_p(0)}\frac{d\varepsilon(z)}{dz}\Big|_{z=0} \tag{۳}$$

از طرف دیگر، با اعمال معادله موج به میدان‌های رابطه (۱) و ساده‌سازی آنها خواهیم داشت:

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

$$\alpha_d^2 = k_x^2 - \varepsilon_d \frac{\omega^2}{c^2} \quad , \quad \left(\frac{df(z)}{dz}\Big|_{z=0}\right)\left(\frac{dg(z)}{dz}\Big|_{z=0}\right) = k_x^2 - \varepsilon_p(0)\frac{\omega^2}{c^2} \tag{۴}$$

با جای‌گذاری از رابطه (۳) در رابطه (۴) و حذف α_d از آنها معادله پاشندگی پلاسمونی به صورت کلی زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{c^2 k_x^2 \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_p(0)}{\varepsilon_d \varepsilon_p(0)} + \gamma} \quad , \quad \gamma = c\frac{\sqrt{c^2k_x^2 - \varepsilon_d\omega^2}}{\varepsilon_p(0)(\varepsilon_d - \varepsilon_p(0))}\frac{d\varepsilon_p(z)}{dz}\Big|_{z=0} \tag{۵}$$

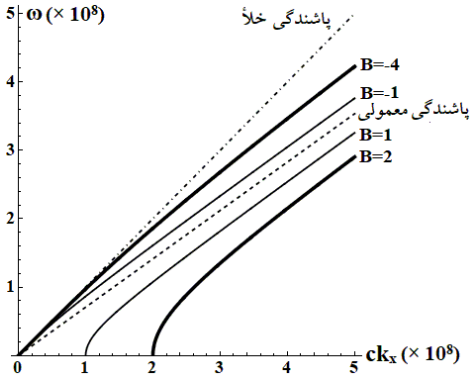
رابطه پاشندگی فوق برای وقتی که ε_p مستقل از z باشد (یعنی $\gamma=0$) به رابطه آشنا برای پلاسمون سطحی تبدیل می‌شود [۲].

۳- محاسبات، بحث و بررسی و نتیجه گیری

به عنوان یک مثال فرض می‌شود که $\varepsilon_d=1$ باشد و ثابت دی‌الکتریک محیط پلاسمونی نیز به صورت خطی زیر بر حسب z تغییر کند:

$$\varepsilon_p(z) = \varepsilon_p(0) + Bz \tag{۶}$$

که در آن B می‌تواند مثبت، صفر یا منفی باشد. نمودار پاشندگی برای $\varepsilon_p(0)=-2$ و B های مختلف در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- نمودار پاشندگی برای وقتی که تابع دی‌الکتریک محیط پلاسمونی به صورت خطی با شیب B بر حسب z تغییر کند.

از شکل ۲ کاملاً مشخص است که نمودار پاشندگی پلاسمونی به اینکه محیط پلاسمونی دارای تابع دی‌الکتریک ثابت یا متغیر باشد بستگی دارد. برای مورد B=0 نیز پاشندگی شناخته شده پلاسمونی ظاهر می‌گردد ولی برای B≠0 نمودار پاشندگی تغییر می‌کند. جالب اینجاست که برای تغییرات مثبت ضریب شکست (یعنی B>0) یک عدد موج قطع ظاهر می‌شود که مقدار آن به B بستگی دارد.

چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با وابسته بودن (یا کردن) تابع دی‌الکتریک پلاسمونی به z بتوان روی نمودار پاشندگی و رفتار پلاسمونی چیدمان فوتونیکی کنترل ایجاد کرد و انعطاف‌پذیری ویژگی‌های اپتیکی آن را افزایش داد. پیش‌بینی می‌شود که در محیط پلاسمای گازی با چگالی متغیر بتوان تابع دی‌الکتریک پلاسمونی وابسته به مکان ایجاد کرد و یافته های فوق را تحقیق نمود.

مراجع

1. T. V. Shahbazyan, M. I. Stockman, *Plasmonics: Theory and applications*, New York: Springer, Ch. 1, (2013).

۲- ناصر پیغمبریان، استفان کوچ، آندره میزیروویچ، *مقدمه ای بر نورشناخت نیمرسانا*، ترجمه: حمیدرضا مهاجری مقدم و حبیب تجلی، به نشر (انتشارات آستان قدس رضوی)، فصل ۳، (۱۳۹۱).

3. M. Kaliteevski, I. Iorsh, S. Brand et al, **Physical Review B 76** 165415, 2007.

۴- فرزانه باقر، رعد چگل، مسعود رضوانی جلال، "شبیه سازی تحریک پلاسمون تام در داخل یک موجبر،" **مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران**، دانشگاه رازی،

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]