بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

طراحی حسگر کوک پذیر ساکارز بر پایه امواج سطحی تم در فصل مشترک بلور فوتونی یک بعدی و لایه فلزی

طیبه گچی لو، سیده مهری حمیدی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده - تم پلاسمون ها نتیجه به دام افتادن انرژی اپتیکی درفصل مشترک بین بلور فوتونی یک بعدی و لایه فلزی هستند.ویژگی های اپتیکی خاص تم پلاسمون ها مثل قرار گرفتن بردار موج در مخروط نوری و وجود داشتن در هر دو قطبش sوp باعث شده که بتوان تم پلاسمون ها را به طور مستقیم و بدون کمک توری یا منشور برانگیخته کرد.در این مقاله وجود تم پلاسمون در مرز بین بلور فوتونی و لایه فلزی نقره به صورت تئوری نشان داده شده و حساسیت تم پلاسمون ها به تغییر ضریب شکست ساکاروز بررسی شده است.نتایج به دست آمده نشان می دهد که با استفاده از این ویژگی تم پلاسمون ها می توان حسگر ضریب شکست بر پایه تم پلاسمون طراحی کرد و ساخت.

کلید واژه-بلور فوتونی یک بعدی، تم پلاسمون، حسگر ضریب شکست.

Design of sucrose sensor based on the Tamm plasmon surface states on one dimensional photonic crystal/ metal interface

Tayebeh Gachilo, Seyedeh Mehri Hamidi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract- Tamm plasmons are the result of trapping optical energy at the interface between a metal film and a one dimensional photonic crystal. Unique optical properties of Tamm plasmons such as having a wavevector within the light cone and existing both S- and P-polarized Tamm plasmons facilitate them for direct optical excitation without the aid of prisms or gratings. In this paper existence of Tamm plasmons at the interface of one dimensional photonic crystal and a metal film (Ag) is shown and sensitivity of TPs on refractive index of sucrose is investigated theoretically. The results shows that a refractive index sensor can be designed and fabricated based on this property of Tamm plasmons.

Keywords: one-dimensional photonic crystal,Tamm plasmon,refractive index sonsor.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

حالت های تم که اولین بار توسط Tamm درباره بلورهای الکترونی معرفی شدند از بنیادی ترین ویژگی های مربوط به مرز هستند که وجود حالت های الکترونی در گاف انرژی بلور را نشان می دهند [۱]. در مقایسه با این حالات سطحی، امواج سطحی در فصل مشترک بلور فوتونی و لایه نازک فلزی تحت عنوان تم پلاسمون شناخته می شوند [۲-۳]. در این حالت، میدان های الکتریکی و مغناطیسی بین بلور فوتونی و لایه فلزی به شدت محدود می شوند که محدود شدن میدان در فلز به خاطر ثابت دی الکتریک منفی فلز و به دام افتادن در دی الکتریک به خاطر گاف نواری بلور فوتونی است.

در مقایسه با پلاسمون پلاریتون های سطحی، تم پلاسمون ها بردار موجی دارند که داخل مخروط نوری قرار می گیرد و بنابراین می توانند بدون کمک توری یا منشور تحریک شوند. به علاوه در هر دو قطبش می توان وجود این امواج سطحی را درک کرد که نقطه قوت دیگری از این دسته امواج به شمار می رود. به همین دلیل، بهره گیری از امواج سطحی تم پلاسمون در راستای ثبت تغییرات ضریب شکست مورد توجه قرار گرفته است.

۲- ساختار حسگر پیشنهادی

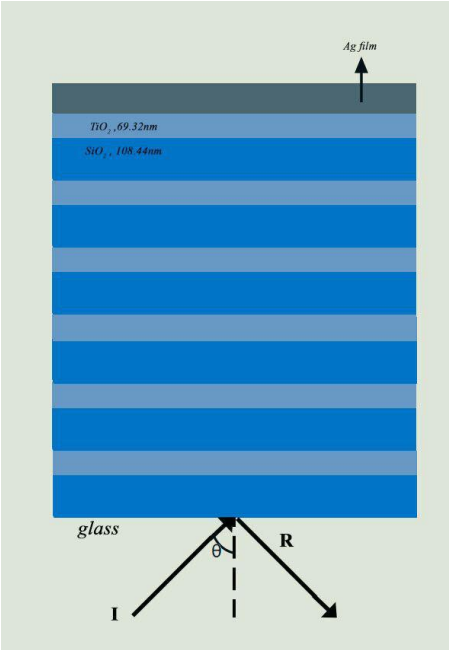
شکل ۱ ساختار حسگر مورد مطالعه را نشان می دهد که شامل یک بلور فوتونی یک بعدی و یک لایه نقره است. بلور فوتونی یک بعدی، با طول موج طراحی ۶۳۲ نانومتر، شامل لایه های متناوب TiO_2 و SiO_2 است که ضخامت این لایه ها به ترتیب ۶۹/۳۲ و ۱۰۸/۴۴ نانومتر می باشد ولایه نقره ۴۵نانومتری بر روی بلور فوتونی و در مجاورت TiO_2 قرار گرفته است.

حال یک حالت الکترومغناطیسی در مرز بلور فوتونی و لایه فلزی را در نظر می گیریم. دو مرز مجازی در یک لایه در نظر می گیریم و با استفاده از روش ماتریس انتقال می نویسیم[4]:

$$A\begin{pmatrix}1\\ n_{\text{left}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\exp(i\,\Phi) & 0\\ 0 & \exp(-i\,\Phi)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}r_{\text{right}}\\ 1\end{pmatrix} \qquad (1a)$$

که در آن، $\phi=\frac{nx\,\omega}{c}$ تغییر فاز موج با فرکانس زاویه ای ω در انتشار در فاصله بین مرزهای مجازی x در لایه با ضریب شکست n است. از معادله (1a) می توانیم بنویسیم:

$$n_{\text{left}}\, r_{\text{right}}\, \exp(2i\,\Phi)=1 \qquad (1b)$$



شکل ۱: ساختار حسگر پیشنهادی.

اگر فاصله مرزها را صفر قرار دهیم (مرزها را یکی کنیم):

$$n_{\text{left}}\, r_{\text{right}}=1 \qquad (1c)$$

بنابراین شرط وجود یک ویژه مد در ساختار لایه ای این است که ضرب دامنه های ضرایب بازتاب برای دو موج که از دو طرف مرز فرود می آیند برابر با ۱ باشد. در نتیجه متصل کردن دو ساختار با ضرایب بازتابی که معادله (1c) را برقرار می کند منجر به یک ویژه حالت می شود. حال نشان می دهیم که این شرط می تواند در اتصال بازتابنده براگ-فلز به دست آید. دامنه ضریب بازتاب یک فلز در فرکانس های زیر فرکانس پلاسما نزدیک به ۱- است و دامنه ضریب بازتاب بازتابنده براگ در نزدیکی فرکانس براگ نزدیک به ۱- می شود در صورتی که ضریب شکست لایه اول (A) بزگتر از لایه دوم (B) باشد. مرز مجازی را در لایه اول بازتابنده براگ(لایه با ضریب شکست n_A) و نزدیک به مرز فلز قرار می دهیم و رابطه (1c) را به این شکل بازنویسی می کنیم:

$$r_M\, r_{BR}=1 \qquad (1d)$$

r_M دامنه ضریب بازتاب برای موج فرودی به فلز از محیط با

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

ضریب شکست n_A است که با رابطه فرنل، $r_M = \frac{(n_A - n_M)}{(n_A + n_M)}$، بر حسب n_M ضریب شکست فلز داده می شود. ضریب شکست لایه فلزی را می توان با مدل درود برحسب ω، ثابت دی الکتریک زمینه ε_b، فرکانس پلاسما ω_p و نرخ برخورد پلاسما γ با رابطه $n_M^2 = \varepsilon_b(1 - \frac{\omega_p}{\omega(\omega + i\gamma)})$ نوشت. در حد $\omega_p >> \omega$ و کوچک شمردنِ نرخ برخورد، n_M به صورت تقریبی به شکل $n_M \approx i\sqrt{\varepsilon_b}\frac{\omega_p}{\omega}$ نوشته می شود. بنابراین

$$r_M \approx -1 - \frac{2in_A\omega}{\sqrt{\varepsilon_b}\omega_p} \approx -\exp(\frac{2in_A\omega}{\sqrt{\varepsilon_b}\omega_p}) = \exp[i(\pi + \frac{2n_A\omega}{\sqrt{\varepsilon_b}\omega_p})] \quad (۲)$$

r_{BR} دامنه ضریب بازتاب برای موج فرودی از محیط با ضریب شکست n_A به بازتابنده براگ است و می توان آن را با استفاده از روش ماتریس انتقال به دست آورد. اگر فرض شود آینه براگ تعداد زیادی لایه دارد، یک موج با فرکانس ω و نزدیک به فرکانس براگ ω_0 ضریب بازتابی دارد که با این رابطه تعریف می شود:

$$r_{BR} = \pm\exp[\frac{i\beta(\omega - \omega_0)}{\omega_0}] \quad (3)$$

می توان با استفاده از روش ماتریس انتقال نشان داد که اگر موج از یک محیط با ضریب شکست n_A فرود آید:

$$\beta = \frac{\pi n_A}{|n_A - n_A|} \quad (4)$$

بررسی معادلات (1a) تا (1d) و ۲ و ۳ نشان میدهد که فقط این امکان وجود دارد که جوابی مطابق بایک حالت فوتونی جایگزیده نزدیک به مرکز اولین گاف نواری بازتابنده براگ به دست آوریم که بازتاب برای یک ساختار واقعی بالاست و بنابراین میرایی تابشی تک پلاسمون کوچک خواهد بود (اگر $n_A > n_B$). در این حالت معادله (1d) تبدیل می شود به :

$$\pi + \beta\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} + \pi + \frac{2n_A}{\sqrt{\varepsilon_b}\omega_p} = 2\pi l \quad (5)$$

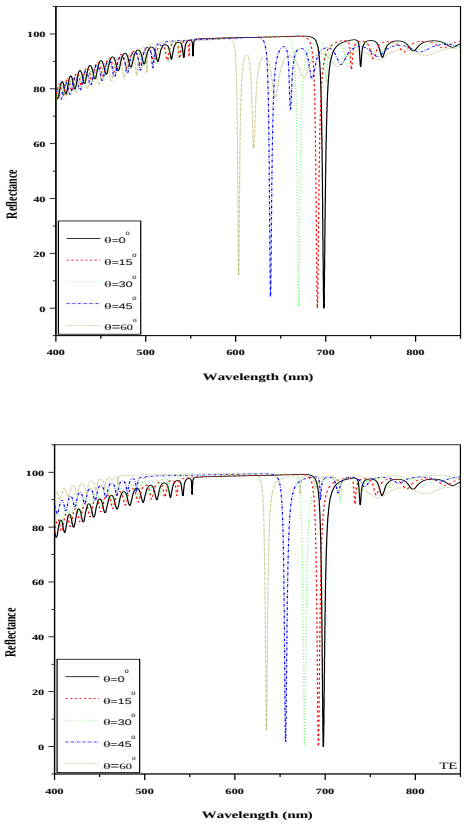
که l صفر یا عددی صحیح است. برای جوابی نزدیک به فرکانس براگ، که میرایی کم است، l باید صفر در نظر گرفته شود. بنابراین:

$$\omega \approx \frac{\omega_0}{(1 + 2n_A\omega_0/\sqrt{\varepsilon_b}\omega_p)} \quad (6)$$

برای مرز بین نقره $\hbar\omega_p = 9/6\,eV$ و یک بازتابنده براگ $(TiO_2/SiO_2)^{20}$ با فرکانس n_A=2.27919 و n_B =1.45708 براگ $\hbar\omega_0$ =1.9618eV، با استفاده از رابطه 6 فرکانس تم پلاسمون $\hbar\omega_{TP}$ =1/86eV به دست می آید.

۳- نتایج

مشاهده حالات سطحی تم پلاسمون در ساختار پیشنهادی ما با تغییر در ضخامت و زوایای برخوردی نور فرودی صورت پذیرفت. با انتخاب ضخامت بهینه ۴۵ نانومتریِ لایه نازک نقره، ضرایب بازتاب ساختار به ازای زوایای برخوردی ۰ تا ۶۰ درجه با گام ۱۵ درجه و به ازای قطبش های فرودی s و p ثبت گردید.



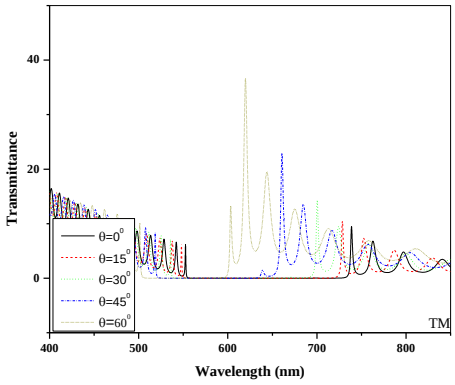
شکل۲: ضرایب بازتاب ساختار پیشنهادی به ازای قطبش های فرودی s و p.

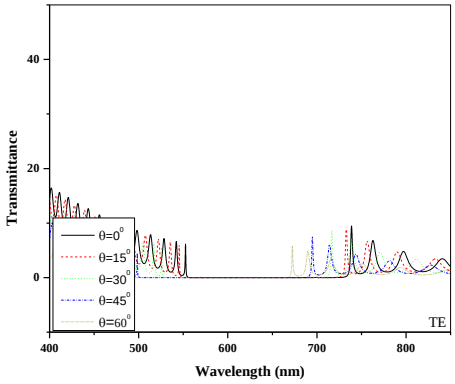
وجه مشخصه اصلی امواج پلاسمونی در طول موج تشدیدی، کم شدن میزان ضریب بازتاب از ساختار است که در مورد امواج پلاسمونی تم نیز این واقعیت قابل مشاهده است. مطابق با انتظار، این مدهای سطحی در محدوده باند نواری

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

بلور مشاهده می شوند که می توان با مقایسه ضرایب بازتاب و عبور به این مهم دست یافت. به علاوه این امواج باید علاوه بر دو قطبش فرودی، به ازای زاویه برخوردی صفر درجه نیز قابل مشاهده باشند که از شکل های ۲ و ۳ قابل اثبات است.

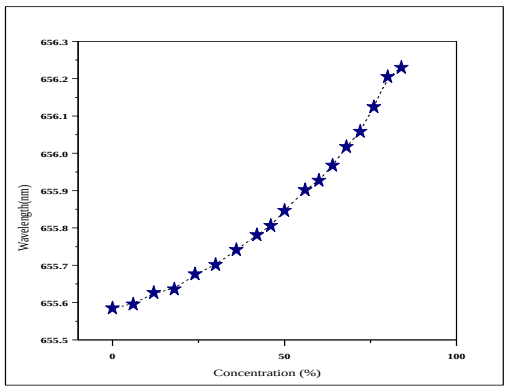




شکل۳: ضرایب عبور ساختار پیشنهادی به ازای قطبش های فرودی s و p.

از سوی دیگر، وجود بلور فوتونی در ساختار پیشنهادی ما می تواند توانایی کوک پذیری طول موج تشدیدی امواج سطحی را ایجاد نماید که مشاهده می شود با تغییر زاویه نور فرودی، مکان بیشینه نمودار عبور و کمینه نمودار بازتاب دچار جابجایی آبی می شود.

در نهایت با قرار دادن ساختار پیشنهادی در مجاورت محلول آب و ساکاروز با ضرایب شکست مختلف، توانایی ثبت تغییرات ضریب شکست را در طول موج اصلی تحریک تم پلاسمون بررسی نمودیم (شکل ۴).



شکل ۴: بازتاب از ساختار در زاویه برخوردی ۴۵ درجه در مجاورت محلول آب و ساکارز.

می توان مشاهده نمود که کمینه اصلی ضریب بازتاب در ساختار پیشنهادی ما به تغییر غلظت محلول آب و ساکارز و در نتیجه تغییر ضریب شکست محیط حساس است و درنتیجه می تواند به عنوان حسگر مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

دراین مقاله حسگر ضریب شکست بر پایه تم پلاسمون در فصل مشترک بلور فوتونی یک بعدی و لایه فلزی نقره معرفی شد .فرکانس پلاسمون تم در این ساختار به صورت عددی محاسبه شده و حساسیت حسگر به تغییر زاویه نور فرودی و همچنین تغییر ضریب شکست در نتایج شبیه سازی مشاهده شد.

مراجع

[1] Hai-Xia Da, Zi-Qiang Huang and Z. Y. Li, "Electrically controlled optical Tamm states in magnetophotonic crystal based on nematic liquid crystals", *Optics Letters* 34(11), pp. 1693-1695, 2009.

[2] Chen Y, Zhang D, Qiu D, Zhu L, Yu S, Yao P, Wang P, Ming H, Badugu R, Lakowicz JR. "Back focal plane imaging of Tamm plasmons and their coupled emission". *Laser & photonics reviews.* 8(6),pp.933-40,2014.

[3] Chen, Y., Zhang, D., Zhu, L., Fu, Q., Wang, R., Wang, P., Ming, H., Badugu, R. and Lakowicz, J.R. "Effect of metal film thickness on Tamm plasmon-coupled emission". *Physical Chemistry Chemical Physics*, *16*(46), pp.25523-25530,2014.

[4] Kaliteevski, M., Iorsh, I., Brand, S., Abram, R. A., Chamberlain, J. M., Kavokin, A. V., & Shelykh, I. A. "Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror". Physical Review B, 76(16), 165415,2007.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]