

«مقاله پژوهشی»

تأثیر کریستال مایع بر ویژگی‌های پلاسمون پلاریتون‌های سطحی

قاسم فروزانی^{1*}، عاطفه حبیب‌پورمقدم²، الهام نامی³

1. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

2. استادیار، فیزیک، دانشگاه لایبنیتز هانوفر، آلمان

3. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1401/11/01 تاریخ پذیرش: 1401/12/14

The Effect of Liquid Crystal on Surface Plasmon Polariton Properties

Gh. Forozani^{1*}, A. Habibpormoghadam², E. Nami³

1. Associate Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Physics, Leibniz University Hannover, Germany

3. MS.c., Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2023/01/21

Accepted: 2023/03/05

Abstract

The challenges in the miniaturization of photonic integrated circuits due to manufacturing problems and the phenomena that exist in nanoscale systems have caused plasmonic nanostructures and the application of plasmonic waves to attract a lot of attention. The use of liquid crystals in plasmonic devices helps to control the transmission, reflection, scattering and absorption of light waves in plasmonic nanostructures. In this article, the effect of liquid crystal on surface plasmon polariton properties in two cases: a) presence of liquid crystal, b) absence of liquid crystal at the common border of gold metal have been investigated. The results of this study show that gold nanostructures in the presence of liquid crystal can respond to optical light in a more active way, compared to an empty piece of liquid crystal. By shining light on the optical part, due to the strong interaction between surface plasmons at the common boundary of the two environments, we will have an intense absorption spectrum, which is observed in the form of a resonance peak at shorter wavelengths in the homotropic orientation of the liquid crystal. The resonance wavelength of surface plasmons is sensitive to changes in refractive index. In other words, by increasing the refractive index of the surrounding environment, the peak of the absorption spectrum shifts to longer wavelengths.

Keywords

Plasmonic Waves, Plasmon Polariton, Liquid Crystal, Gold Nanostructure

چکیده

چالش‌های موجود در کوچک‌سازی مدارهای مجتمع فوتونیک به دلیل مشکلات ساخت و پدیده‌هایی که در سیستم‌های مقیاس نانو وجود دارند، سبب شده‌اند که نانو ساختارهای پلاسمونیک و کاربرد امواج پلاسمونیک توجه زیادی را به خود جلب کنند. استفاده از کریستال‌های مایع در دستگاه‌های پلاسمونیک به کنترل انتقال، بازتاب، پراکندگی و جذب امواج نوری در نانو ساختارهای پلاسمونیک کمک می‌کند. در این مقاله به بررسی تأثیر کریستال مایع بر ویژگی‌های پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در دو حالت الف) وجود کریستال مایع، ب) عدم وجود کریستال مایع در مرز مشترک فلز طلا، پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نانو ساختارهای طلا در حضور کریستال مایع، در مقایسه با قطعه خالی از کریستال مایع می‌تواند به صورت فعال‌تری به نور اپتیکی پاسخ دهد. با تاباندن نور بر قطعه اپتیکی، بر اثر برهمکنش قوی بین پلاسمون‌های سطحی در مرز مشترک دو محیط، طیف جذبی شدیدی خواهیم داشت که در حالت سمت‌گیری هموتروپیک کریستال مایع به صورت یک قله تشدید در طول موج‌های کوتاه‌تر مشاهده می‌شود. طول موج تشدید پلاسمون‌های سطحی نسبت به تغییرات ضریب شکست حساس است. به عبارتی با افزایش ضریب شکست محیط اطراف، قله طیف جذبی به سمت طول موج‌های بلند جابه‌جا می‌شود.

واژه‌های کلیدی

امواج پلاسمونیک، پلاسمون پلاریتون، کریستال مایع، نانو ساختار طلا

*Corresponding Author: forozani@pnu.ac.ir

* نویسنده مسئول: قاسم فروزانی

مقدمه

حرکت دنیای فناوری به سمت توسعه و تولید مدارهای الکترونیکی نوری، سبب شده است که استفاده از نانوساختارهای پلاسمونیک و امواج پلاسمونیک به منظور رفع چالش‌های موجود در مسیر تولید آنها، مورد توجه قرار بگیرد. عدم محدودیت به لحاظ سرعت در ابزارهای الکترونیکی و عدم محدودیت به لحاظ اندازه در عناصر فوتونیک از مهم‌ترین دلایلی هستند که سبب شده است تا این ابزارها به عنوان یک عامل کمک کننده در این مسیر، شناخته شوند. به عبارت دیگر می‌توان گفت ساختارهای پلاسمونیک می‌توانند در ابعاد نانومتر از سرعت بالای فوتونیک برخوردار باشند [1]. پلاسمونیک شاخه‌ای از علم فوتونیک است که به بررسی شبه ماده‌ای به نام پلاسمون در ساختارهای کوچک‌تر از موج می‌پردازد [2]. تاریخچه علم پلاسمونیک به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد، به طوری که در سال 1902 برای اولین بار دانشمندی به نام رابرت وود¹ ویژگی‌های غیرقابل توجیحی را در مورد نور جذب شده توسط شبکه‌های توری فلزی مشاهده کرد [3]. پس از آن مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شد و برای اولین بار در سال 1968 ریچی² و همکارانش رفتار غیرعادی شبکه‌های توری فلزی را برحسب برانگیختگی‌های پلاسمون‌های سطحی توضیح دادند [4] و پس از آن در سال 1970، در طی یک تحقیق مشترک واکنش الکترونیکی و نوری نانوذرات طلا و نقره با یکدیگر مقایسه شد و برای اولین بار ویژگی‌های نوری نانوذرات فلزی برحسب پلاسمون‌های سطحی توسط اتو³، کرشمان⁴ و ردر⁵ ارائه شد [5]. در حالت کلی می‌توان گفت مطالعات مربوط به پلاسمونیک در دو شاخه، الف) برهمکنش نانوذرات و امواج الکترومغناطیسی، ب) مطالعه نقش پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در ادوات نوین فوتونیک مورد بررسی قرار گرفته است. شاخه اول از این علم را به صورت خلاصه به‌عنوان مد غیرانتشاری بیان می‌کنند که در آن به بررسی اندازه، شکل نانوذرات، مواد احاطه کننده نانوذرات، فاصله و آرایش

آنها پرداخته می‌شود و در این حالت مدی به نام پلاسمون سطحی محلی تشکیل می‌شود. این مد با توجه به قطبی شدگی الکترون‌های باند هدایت به وسیله میدان الکتریکی اعمالی به وجود می‌آید. این مد غیر انتشاری در ساختارهایی نظیر دیسک‌ها، حلقه‌ها و شیارهای فلزی به وجود می‌آید [6]. شاخه دوم از این علم به عنوان مد یا حالت انتشار شناخته می‌شود که در مرز بین عایق و فلز به وجود می‌آید. در این حالت قسمت حقیقی ضریب شکست فلز منفی و ضریب شکست عایق مثبت است. این قضیه باعث می‌شود که مد انتشاری به وجود آمده در مرز عایق و رسانا، حالت میرا شونده داشته باشد. برای تحریک این مد انتشاری از روش‌های خاصی نظیر روش کرشمان استفاده می‌شود [7]. عنصر و فلز طلا امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته است که دلیل آن ویژگی‌های منحصر به فرد آن است. بعد از سیلیکون، طلا پرکاربردترین عنصر در علم نانو است و نانوذرات طلا سابقه بسیار طولانی‌تری نسبت به سایر فلزات دارند. پایداری منحصر به فرد آن به عنوان یک فلز خالص مهم‌ترین عامل برای استفاده از این عنصر در علم نانو است. علاوه بر این، نانوذرات طلا خواص اپتیکی و فیزیکی جالب توجه و ویژگی‌های نوری منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند که از جمله می‌توان به نوسانات پلاسمون‌های سطحی اشاره کرد [8]. یکی از مواد بسیار مهم و کارا در علوم اپتیکی، کریستال مایع است. کاربرد رو به گسترش این ماده در صنایع مخابرات، فیبر نوری، ساخت صفحه نمایش، کلیدهای اپتیکی، پنجره‌های نسل آینده و غیره، سبب شده است که محققان توجه خاصی به این ماده داشته باشند. امروزه شرکت‌های تولیدی در زمینه ساخت صفحه نمایش کریستال‌های مایع (LCD) میلیون‌ها دلار از این صنعت کسب کرده اند و در نتیجه می‌توان گفت، این ماده جزو تجاری‌ترین مواد محسوب می‌شود. کریستال مایع توسط یک محقق استرالیایی به نام فریدریچ رینیتزر⁶ در سال 1888 میلادی کشف شد [9]. این ماده غیرهمسانگرد است، از این رو ضریب شکست این ماده با یک تانسور مرتبه یک توصیف می‌شود [10]. بیشتر مولکول‌های کریستال مایع از نوع تک محوری هستند. اما در حالت کلی کریستال‌های

1. Robert W. Wood
2. Ritchie
3. Otto
4. Kretschmann
5. Raether

6. Friedrich Reinitzer

متشکل از یون‌های ثابت مثبت حرکت می‌کنند و الکترون‌های آزاد تحت تأثیر میدان اپتیکی نو سان می‌کنند. تابع دیالکتریک گاز الکترونی را می‌توان از مدل درود-لورنتز⁶ به دست آورد.

در این مدل با در نظر گرفتن گذار بین نواری برای الکترون‌ها، تابع دی الکتریک نهایی به صورت یک تابع مختلط از شرایط $(\epsilon'_{DL}(0)$ و $\epsilon''_{DL}(0)$) به دست می‌آید.

$$\epsilon_{DL} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\epsilon\Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) + j\Gamma_L\omega} \quad (1)$$

$$\epsilon''_{DL} = \left[\frac{\omega_D^2\gamma_D}{\omega(\omega^2 + \gamma_D^2)} + \frac{\Delta\epsilon\Omega_L^2\Gamma_L\omega}{(\omega^2 - \Omega_L^2)^2 + (\Gamma_L\omega)^2} \right] \quad (2)$$

$$\epsilon_{DL} = \epsilon'_{DL} + j\epsilon''_{DL} \quad (3)$$

در روابط بالا ϵ'_{DL} و ϵ''_{DL} به ترتیب بخش حقیقی و موهومی تابع دی الکتریک ϵ_{DL} است. همچنین ω_D فرکانس پلاسما، γ_D ضریب میرایی، Γ_L دامنه طیفی نوسان‌گرهای لورنتز، Ω_L پارامتر قدرت نوسان و $\Delta\epsilon$ یک فاکتور وزنی است.

از این مدل برای الگوریتم تفاضل محدود بازه زمان (FDTD)⁷ در محدوده طول موج 500 تا 1200 نانومتر استفاده شده است [21].

ساختار مطالعه شده در شکل 1 نشان داده شده است. آرایه‌ای از نانو ساختارهای طلا با یک لایه نازک از دی الکتریک که معمولاً از نوع پنتالیوم دی اکسید (Ta_2O_5) است و از لایه نازک ایندیم تین اکسید که نقش الکتروود را دارد، مجزا شده است. قطعه با یک لایه نازک کریستال مایع از نوع نماتیک E با ضخامت کنترل شده پر شده است. نور فرودی از سمت الکتروود شفاف ITO از لایه کریستال مایع عبور کرده و سپس به نانو ساختارها می‌رسد تا مدهای مختلف پلاسمون پلاریتون‌های سطحی را تحریک کند. ضریب شکست مؤثر در مرز کریستال مایع با نانو ساختارهای طلا به سمت گیری کریستال مایع بستگی دارد. تغییر در سمت گیری کریستال مایع منجر به تغییر در رابطه پراکندگی پلاسمون پلاریتون‌های سطحی می‌شود. به این ترتیب می‌توان به مدولاسیون انتقال از طیف نور منعکس شده

مایع را می‌توان بر اساس شکل آرایش مولکول‌ها به سه نوع ترموتروپیک¹ و لیوتروپیک² و متالوتروپیک³ تقسیم بندی کرد [11]. استفاده از کریستال‌های مایع در دستگاه‌های پلاسمونیک به کنترل انتقال، بازتاب، پراکندگی و جذب امواج نوری در نانو ساختارهای پلاسمونیک کمک می‌کند.

شکست دوگانه کریستال مایع به عنوان تفاوت در ضریب شکست، نشان داده شده است و آن را به یک محیط فعال ایده‌آل برای دستگاه‌های پلاسمونیک فعال برای کاربردهای مختلف، مانند سویچ‌های پلاسمونیک [16-12]، فیلترهای رنگی فعال پلاسمونیک [17-19] و موجبر پلاسمونیک [20] تبدیل کرده است. روش‌های مختلفی برای پمپاژ یا هدایت کریستال مایع برای دستیابی به تغییر ضریب شکست قابل توجه وجود دارد. در میان روش‌های موجود، روش‌هایی از قبیل روش اعمال میدان الکتریکی، روش هدایت نوری، روش اعمال موج آکوستیک سطحی، روش گرما محور مهم‌ترین روش‌ها در نمایشگر دستگاه‌های پلاسمونیک فعال مبتنی بر کریستال مایع هستند. در پژوهش حاضر به مطالعه و بررسی عملکرد نانو ساختارهای طلا پرداخته می‌شود. این پژوهش با بررسی لایه قرار گرفته در زیر نانو ساختار و همچنین بهره برداری از یک محیط فعال کریستال مایع به عنوان یک محیط واسطه صورت گرفته است.

محاسبه تابع دی الکتریک طلا با استفاده از مدل درود-لورنتز

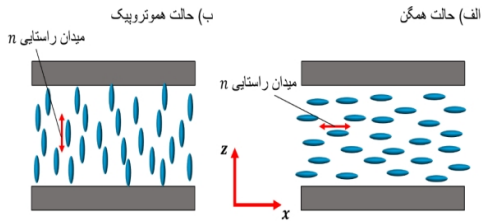
در این مقاله ویژگی‌های فیزیکی و کمی پلاسمون‌های سطحی در یک قطعه اپتیکی تجهیز شده با نانوذرات طلا، که با کریستال مایع نوع نماتیک پر شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نکته قابل ذکر در نظر گرفتن دو سمت گیری مهم کریستال مایع یعنی سمت گیری همگن یا سطحی⁴ و جهت گیری هموتروپیک⁵ یا نرمال بر سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور توصیف ویژگی اپتیکی فلز طلا از مدل پلاسما استفاده شد. در این مدل گاز متشکل از الکترون‌های آزاد با چگالی عددی N در یک محیط زمینه

1. Thermotropic
2. Lyotropic
3. Metallotropic
4. Planar
5. Homeotropic

6. Drude-Lorentz

7. Finite Difference Time Domain (FDTD)

در روابط فوق ϵ'_{Au} قسمت حقیقی ضریب دی الکتریک فیلم طلا و ϵ''_{Au} قسمت موهومی آن است. ϵ_s ضریب دی الکتریک نیمه هادی (ITO) است. به ترتیب مقادیر ϵ'_{Au} و ϵ''_{Au} از روابط (1) و (2) جایگزین شده اند.



شکل 2. الف) سمت گیری سطحی یا همگن میدان راستایی کریستال مایع (در راستای محور x). ب) سمت گیری نرمال یا هموتروپیک میدان راستایی کریستال مایع (در راستای محور z)

محاسبه طول موج انتشار در امتداد محور x

طول موج انتشار در امتداد محور x برای پلاسمون پلاریتون های سطحی در مرز مشترک طلا با محیط دی الکتریک را با استفاده از رابطه زیر می توان محاسبه کرد:

$$\lambda_{spp} = \frac{2\pi}{k'_{spp}} \quad (7)$$

که k'_{spp} قسمت حقیقی رابطه پراکندگی است که از معادله (5) به دست می آید. علاوه بر این از رابطه فوق می توان برای محاسبه طول موج پلاسمون پلاریتون های سطحی در دو حالت سمت گیری مفروض کریستال مایع استفاده کرد.

محاسبه طول انتشار موج در جهت محور x

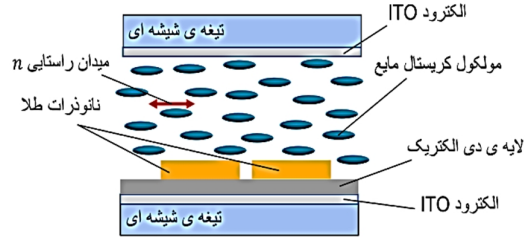
با استفاده از قسمت موهومی رابطه پراکندگی، طول انتشار در امتداد محور x برای دو حالت حضور و عدم حضور کریستال مایع از رابطه زیر به دست می آید:

$$L_i = \frac{2\pi}{k''_{spp}} \quad (8)$$

محاسبه رابطه پراکندگی در راستای محور z

رابطه پراکندگی در راستای محور z عبارت است از:

دست یافت و مدهای پلاسمون پلاریتون های سطحی را به طور فعال کنترل کرد [22].



شکل 1. سمت گیری های مفروض میدان راستایی کریستال های مایع

در اینجا کریستال مایع در دو سمت گیری همگن و هموتروپیک مطالعه شده است. این دو سمت گیری به صورت شماتیک در شکل 2 نشان داده شده است. در قسمت (الف) سمت گیری سطحی یا همگن میدان راستایی کریستال مایع (در راستای محور x) و در قسمت (ب) سمت گیری نرمال یا هموتروپیک میدان راستایی کریستال مایع (در راستای محور z) نشان داده شده است. کریستال مورد مطالعه در این تحقیق از نوع E7 است که دارای دو ضریب شکست متعارف n_o و غیر متعارف n_e است که به ترتیب دارای مقادیر $1/52$ و $1/75$ هستند.

محاسبه رابطه پراکندگی

ابتدا به محاسبه رابطه پراکندگی در دو حالت مختلف یعنی در حضور و عدم حضور کریستال مایع در مرز مشترک نانوساختارهای طلا می پردازیم.

عدد موج پلاسمون پلاریتون k_{spp} در جهت محور x را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$k_{spp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon'_{Au}(w)\epsilon_s}{\epsilon'_{Au}(w)+\epsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

رابطه پراکندگی را می توان به صورت مختلط یعنی $k_{spp} = k'_{spp} + ik''_{spp}$ نوشت. به این ترتیب با تفکیک قسمت حقیقی و موهومی تابع عدد موج پلاسمون های سطحی داریم:

$$k'_{spp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon'_{Au}\epsilon_s}{\epsilon'_{Au}+\epsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$k''_{spp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon'_{Au}\epsilon_s}{\epsilon'_{Au}+\epsilon_s} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\epsilon''_{Au}}{2(\epsilon'_{Au})^2} \quad (6)$$

عمق نفوذ میدان

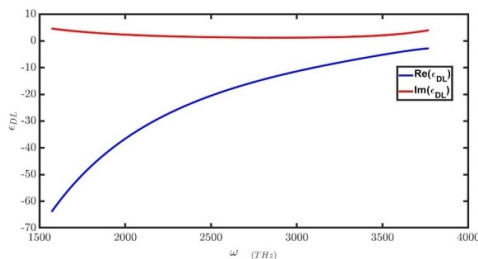
عمق نفوذ میدان پلاسمون پلاریتون را می‌توان در فاصله قائم نسبت به سطح مشترک که میدان به $\frac{1}{e}$ مقدار بیشینه خود می‌رسد تعریف کرد. عمق نفوذ با استفاده از رابطه زیر برای دو حالت مفروض، محاسبه می‌شود:

$$z = \frac{1}{|k_{zi}|} \quad (10)$$

نتایج و بحث

محاسبه تابع دی‌الکتریک طلا با استفاده از مدل درود-لورنتز

نتایج حاصل از حل عددی تابع دی‌الکتریک طلا بر حسب فرکانس در شکل (3) نشان داده شده است. در این تصویر هر دو قسمت حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک با توجه به شرایط بیان شده در بخش قبل رسم شده‌اند. در این تصویر کردار آبی رنگ مربوط به قسمت حقیقی ضریب دی‌الکتریک و رنگ قرمز مربوط به قسمت موهومی آن است. همان طور که در تصویر مشاهده می‌شود قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک دارای مقادیر منفی است که بیانگر این موضوع است که این قسمت از تابع منجر به عمق نفوذ کوتاه در فلز در طیف نور مرئی می‌گردد.



شکل 3. کردار تابع دی‌الکتریک طلا. رنگ آبی مربوط به قسمت حقیقی ضریب دی‌الکتریک و رنگ قرمز مربوط به قسمت موهومی است

محاسبات عددی و بررسی رابطه‌های پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در نانو ذرات طلا در مجاورت یک محیط دی‌الکتریک همسانگرد با فرض اینکه نانو ساختارهای طلا بر روی یک لایه نازک دی‌الکتریک همسانگرد با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_s = 3/3$ لایه نشانی شده‌اند انجام گرفته است.

$$k_{zi} = \left[\epsilon_i \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

که اندیس i بیانگر محیط مفروض انتشار است که می‌تواند طلا یا محیط دی‌الکتریک مجاور باشد. در محیط طلا با فرض $i=1$ ، رابطه (9) را می‌توان با توجه به تعریف $\epsilon_1 = \epsilon_1' + i\epsilon_1''$ و $k_x = k_x' + ik_x''$ به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$k_{z1} = \left[\epsilon_1' + i\epsilon_1'' \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - (k_x' + ik_x'')^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

در اینجا $k_{z1} = k_{z1}' + ik_{z1}''$ یک تابع مختلط است. ϵ_1 ضریب دی‌الکتریک مختلط طلا است که با رابطه‌های (2) و (3) به صورت تفکیک شده معرفی شده‌اند. k_x رابطه مختلط پراکندگی در راستای محور x است که با رابطه‌های (5) و (6) معرفی شده است [23-24]. در محیط دی‌الکتریک مجاور به طلا با فرض $i=2$ ، رابطه (9) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$k_{z2} = \left[\epsilon_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - k_x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

در اینجا ϵ_2 گذردهی دی‌الکتریک است و k_x تابع مختلط عدد موج در راستای محور x است. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای عدد موج در امتداد محور Z در محیط طلا و دی‌الکتریک می‌توان دامنه میدان پلاسمون پلاریتون‌های سطحی را به دست آورد.

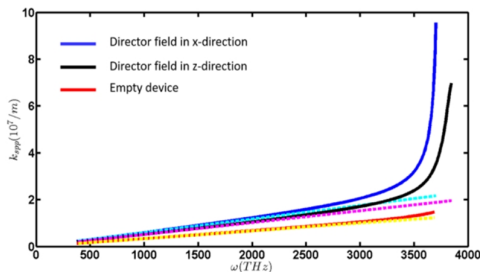
محاسبه تغییرات دامنه میدان پلاسمون پلاریتون‌های

سطحی در محیط طلا و محیط دی‌الکتریک مجاور

تغییرات دامنه‌های میدان‌های پلاسمون سطحی در امتداد محور Z که نسبت به فصل مشترک به صورت $\exp(-|k_{zi}||z|)$ افت می‌کند را برای دو حالت در حضور و عدم حضور کریستال مایع را می‌توان با استفاده از رابطه (9) که با رابطه‌های (10) و (11) بسط داده شده است محاسبه کرد.

محور x ها بیشتر است. مشابه با شکل (4)، هر دو کردار عدد موج به صورت نمایی تغییر می‌کند و با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. هنگامی که ضریب گذردهی طلا به سمت ضریب گذردهی کریستال مایع میل می‌کند، حالت حدی رخ می‌دهد.

عدد موج نور فرودی در حضور کریستال مایع با رابطه $k_x = \frac{n\omega}{c}$ توصیف می‌شود که با خطوط مورب خط چین ترسیم شده‌اند. با تغییر ضریب شکست که به سمت‌گیری کریستال مایع بستگی دارد، عدد موج نور فرودی تغییر می‌کند. در حالت سمت‌گیری همگن ضریب شکست مؤثر مقدار بزرگ‌تری دارد. بنابراین خط مورب عمود بر منحنی عدد موج‌داری شیب بزرگ‌تری نسبت به حالت هموتروپیک است. در صورت خالی بودن قطعه از کریستال مایع (حضور هوا در مجاورت نانوساختارهای طلا)، عدد موج نور فرودی به دلیل کوچک بودن ضریب شکست ($n=1$) کمینه است. منحنی عدد موج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی به سمت منحنی عدد موج نور فرودی میل می‌کند.



شکل 4. کردار حقیقی رابطه پراکندگی در امتداد محور x . منحنی آبی رنگ مربوط به حالت سمت‌گیری میدان راستایی کریستال مایع در راستای محور x است. منحنی مشکی رنگ مربوط به سمت‌گیری نرمال کریستال مایع یعنی سمت‌گیری در راستای محور z است. منحنی قرمز رنگ مربوط به قطعه خالی از کریستال مایع است که نانوساختارها در مجاورت با هوا قرار دارند.

الف) محاسبه طول موج انتشار در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا با محیط دی‌الکتریک همسانگرد

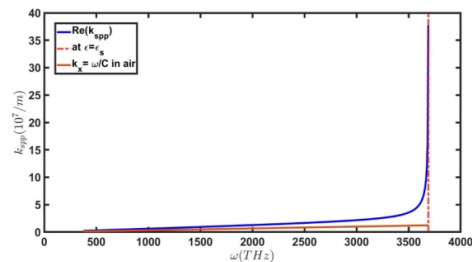
زیرین در امتداد محور x

نتایج محاسبات این بخش در شکل‌های (5) و (6) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (5) مشاهده می‌شود طول موج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی دارای رابطه غیرخطی (نمایی) با فرکانس نور فرودی است. با افزایش

محاسبه رابطه پراکندگی

الف) در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا و محیط دی‌الکتریک همسانگرد

در شکل (4) قسمت حقیقی رابطه پراکندگی پلاسمون پلاریتون‌های سطحی ترسیم شده است. این منحنی دارای یک حد بالای فرکانسی است که با خط چین قرمز نشان داده شده است. در فرکانس‌های کوچک‌تر از این حد بالا، پلاسمون پلاریتون‌های سطحی نمی‌توانند به نور تابشی تبدیل شوند و به صورت غیر تابشی هستند (خط ممتد قرمز).

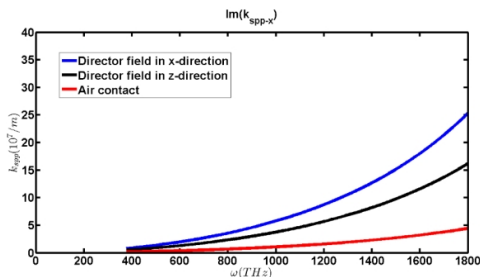
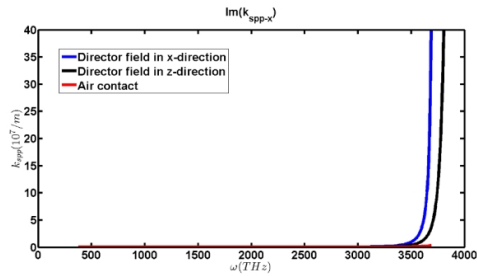


شکل 4. قسمت حقیقی رابطه پراکندگی که به صورت نمایی با فرکانس اپتیکی تغییر می‌کند (خط ممتد آبی رنگ)

هنگامی که ضریب گذردهی طلا به سمت ضریب گذردهی دی‌الکتریک یا نیمه‌هادی میل کند؛ یعنی در $\epsilon_g = \epsilon_0$ پلاسمون پلاریتون‌های سطحی رفتاری مشابه نوسانات موضعی گاز پلاسمای الکترونی دارند (خط نقطه چین). خط مورب ممتد قرمز رنگ عدد موج نور فرودی $k_x = \frac{\omega}{c}$ را نشان می‌دهد. در فرکانس‌های پایین (در محدوده نور مرئی) منحنی عدد موج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی به سمت منحنی عدد موج نور فرودی میل می‌کند.

ب) در فصل مشترک نانو ذرات طلا با کریستال مایع

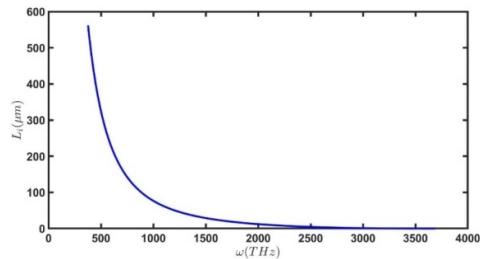
رابطه پراکندگی در مرز نانوساختار طلا و کریستال مایع را می‌توان با استفاده از رابطه‌های (5) و (6) محاسبه کرد. شکل 5 کردار پراکندگی (قسمت حقیقی عدد موج) در امتداد محور x را در دو حالت سمت‌گیری کریستال‌های مایع در راستای محور x و محور z نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (9) مشاهده می‌شود، به دلیل حضور کریستال مایع عدد موج در راستای محور x تقویت شده است. با مقایسه دو منحنی آبی و مشکی رنگ می‌توان نتیجه گرفت که در حالت همگن تقویت میدان پلاسمون پلاریتون‌ها در راستای



شکل 7. کردارهای موهومی تابع پراکندگی در راستای محور X در دو حالت مفروض سمت گیری کریستال مایع و در قطعه خالی از کریستال مایع نشان داده شده است. الف) در کل بازه عملی فرکانسی ب) در بازه فرکانسی 0 تا 1800 هرترز برای مشاهده بهتر، نشان داده شده اند.

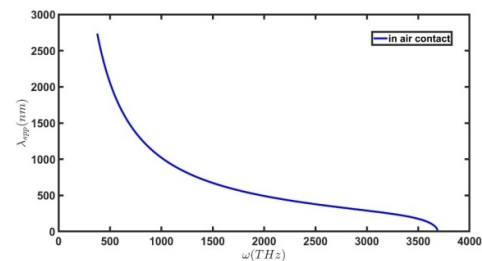
محاسبه طول انتشار موج در جهت محور X الف) در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا و محیط دی الکتریک همسانگرد

کردار طول انتشار در امتداد محور X در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا با محیط دی الکتریک همسانگرد در شکل (8) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، طول انتشار با افزایش فرکانس کاهش می یابد و به سمت صفر میل می کند. طول انتشار در فرکانس های نور مرئی در محدوده چند صد نانومتر است که قابلیت کاربردی قطعات طراحی شده در طیف نور مرئی را افزایش می دهد.

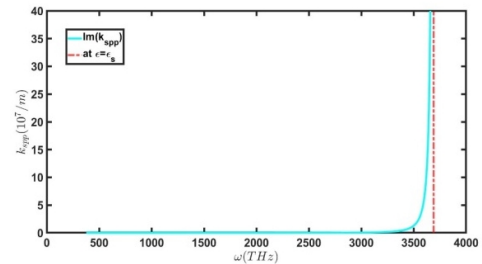


شکل 8. کردار طول انتشار در امتداد محور Xها در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا با محیط دی الکتریک همسانگرد

فرکانس (یا کاهش طول موج نور فرودی) طول موج انتشار به سمت صفر میل می کند. همان گونه که در شکل (6) مشاهده می شود، منحنی قسمت موهومی عدد موج پلاسمون پلاریتون های سطحی مانند منحنی حقیقی دارای یک حد بالایی به ازای $\epsilon = \epsilon_c$ است که در مقادیر بالای فرکانسی به سمت آن میل می کند. در فرکانس های پایین قسمت موهومی عدد موج پلاسمون پلاریتون های سطحی دارای مقدار قابل چشم پوشی در مقایسه با بخش حقیقی آن است که نشانگر میرایی ضعیف در امتداد محور X است.

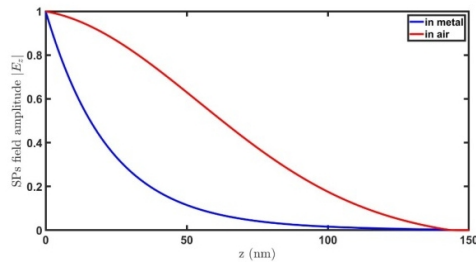


شکل 5. طول موج انتشار در امتداد محور X. قطعه اپتیکی خالی از کریستال مایع فرض شده است.



شکل 6. خط ممتد مقدار موهومی رابطه پراکندگی پلاسمون پلاریتون های سطحی را نشان می دهد.

ب) در فصل مشترک نانو ذرات طلا با کریستال مایع در شکل (7) کردار تابع موهومی پراکندگی در راستای محور Xها در دو حالت مفروض سمت گیری کریستال مایع نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود قسمت موهومی عدد موج در راستای محور Xها در حالت سمت گیری کریستال مایع به صورت همگن تقویت شده است که منجر به کاهش طول انتشار امواج پلاسمون پلاریتونی در این راستا می شود. در حالت مجاورت با هوا ائتلاف در امتداد محور Xها کمینه است.

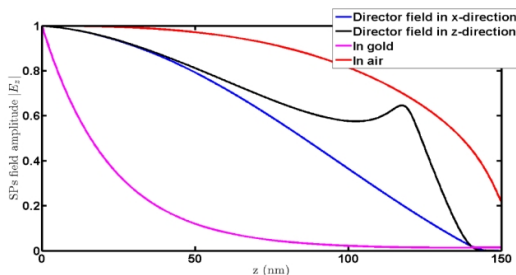


شکل 10. دامنه تغییرات میدان E_z نسبت به سطح مشترک که به صورت نمایی تغییر می کند. این تغییرات در فلز (آبی رنگ) و در هوا (قرمز رنگ) نشان داده شده است.

ب) در فصل مشترک نانو ذرات طلا با کریستال مایع

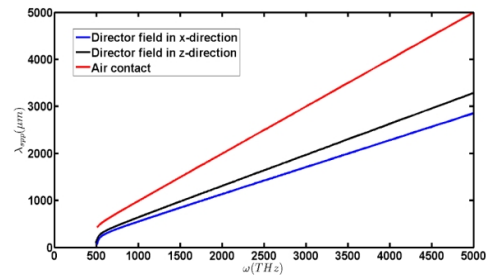
در شکل (11) دامنه های میدان پلاسمونی E_z در دو حالت سمت گیری مفروض میدان راستایی کریستال مایع نشان داده شده است. همچنین دامنه های میدان در طلا و در هوا (با فرض خالی بودن قطعه) ترسیم شده اند. با مقایسه منحنی های به دست آمده می توان نتیجه گرفت که تغییرات (افت) دامنه میدان پلاسمونی E_z در طلا بیشینه است؛ دامنه میدان در طلا به صورت نمایی با افزایش فاصله کاهش می یابد و به سمت صفر میل می کند. افت میدان پلاسمونی در محیط هوا به دلیل اتلاف پایین کمینه است.

در مقایسه با محیط طلا، با فرض کریستال مایع به عنوان محیط دی الکتریک، افت میدان تضعیف می شود به طوری که شاهد تقویت میدان به ویژه در حالت سمت گیری هموتروپیک هستیم. در حالت هموتروپیک که میدان راستایی در امتداد محور Z قرار دارد دامنه میدان E_z و طول انتشار میدان هر دو تقویت می شوند و در این حالت تشدید پلاسمون های سطحی در طول موج های پایین رخ می دهد.



شکل 11. تغییرات دامنه میدان پلاسمونی E_z نسبت به فصل مشترک در دو حالت همگن (منحنی آبی رنگ) و هموتروپیک (منحنی مشکی رنگ). دو منحنی دیگر دامنه میدان در طلا (منحنی صورتی رنگ) و دامنه میدان در هوا (منحنی قرمز رنگ) را نشان می دهند.

ب) در فصل مشترک نانو ذرات طلا با کریستال مایع همان طور که در شکل (9) مشاهده می شود در طول موج های نزدیک به طول موج آستانه احتمال جفت شدگی طول موج فرودی با پلاسمون های سطحی کاهش می یابد. همچنین می توان نتیجه گرفت که طول موج انتشار پلاسمون های سطحی در مرز نانو ذرات طلا با کریستال مایع از طول موج انتشار پلاسمون های سطحی قطعه تهی از کریستال مایع (تماس با هوا) کوچک تر است. در صورت پر بودن قطعه اپتیکی با کریستال مایع، در حالت جهت گیری میدان راستایی در امتداد محور Z، پلاسمون های سطحی با طول موج بزرگ تر برانگیخته می شوند.



شکل 9. طول موج پلاسمون پلاریتون های سطحی به صورت تابعی از طول موج نور فرودی. منحنی آبی رنگ مربوط به سمت گیری میدان راستایی در امتداد محور X و منحنی مشکی رنگ مربوط به سمت گیری میدان راستایی در امتداد محور Z هستند. منحنی قرمز رنگ نتیجه مربوط به قطعه خالی از کریستال مایع را نشان می دهد.

محاسبه تغییرات دامنه میدان پلاسمون پلاریتون های سطحی در محیط طلا و محیط دی الکتریک مجاور

الف) در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا و محیط دی الکتریک همسانگرد

تغییرات دامنه میدان پلاسمون پلاریتون های سطحی در محیط طلا و محیط دی الکتریک مجاور در شکل (10) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود در $Z=0$ دامنه میدان پلاسمون پلاریتون ها بیشترین مقدار خود را دارد و با دور شدن از سطح دامنه میدان به صفر میل می کند. همان طور که انتظار می رود در یک فرکانس معین دامنه میدان در هوا بزرگ تر از دامنه میدان در فلز است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر کریستال مایع بر ویژگی‌های پلاسمون پلاریتون‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور محاسبات در این مطالعه با در نظر گرفتن دو حالت، الف) وجود کریستال مایع، ب) عدم وجود کریستال مایع در مرز مشترک فلز طلا انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که نانوساختارهای طلا در حضور کریستال مایع، در مقایسه با قطعه خالی از کریستال مایع می‌توانند به صورت فعال‌تر به نور اپتیکی پاسخ دهند. با تاباندن نور بر قطعه اپتیکی، در اثر برهمکنش قوی بین پلاسمون‌های سطحی در مرز مشترک دو محیط، طیف جذبی شدیدی خواهیم داشت که در حالت سمت گیری هموتروپیک کریستال مایع به صورت یک قله تشدید در طول موج‌های کوتاه تر مشاهده می‌شود. طول موج تشدید پلاسمون‌های سطحی نسبت به تغییرات ضریب شکست حساس است. به عبارتی با افزایش ضریب شکست محیط اطراف، قله طیف جذبی به سمت طول موج‌های بلند جابه جا می‌شود.

عمق نفوذ میدان

الف) در مرز مشترک نانو ساختارهای طلا و محیط دی الکتریک همسانگرد

بر اساس نتایج به دست آمده عمق نفوذ میدان در طلا و هوا به ترتیب برابر با $22/5$ نانومتر و $75/8$ نانومتر است.

ب) در فصل مشترک نانو ذرات طلا با کریستال مایع

با توجه به نتایج به دست آمده از محاسبات انجام شده در حالت وجود کریستال مایع می‌توان عمق نفوذ میدان E_z را در کریستال مایع در دو حالت سمت‌گیری مفروض میدان راستایی محاسبه کرد. عمق نفوذ میدان در امتداد محور Z ها به ترتیب دارای مقادیر $99/3$ نانومتر و $127/5$ نانومتر برای حالت همگن و هموتروپیک است. این داده‌ها تقویت میدان پلاسمونی در امتداد عمود بر سطح در حالت سمت‌گیری قائم کریستال مایع نسبت به سمت‌گیری سطحی را نشان می‌دهد.

منابع

- [1]. M.L. Brongersma, and V.M. Shalaev, The case for plasmonics. Science, 2010. 328(5977): p. 440-441.
- [2]. W. L. Barnes, A. Dereux, and T.W. Ebbesen, Surface plasmon subwavelength optics. Nature 424 (2003) 824-830.
- [3]. R.W.Wood, XLII. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4 (1902) 396-402.
- [4]. R.H. Ritchie, et al., Surface-plasmon resonance effect in grating diffraction. Physical review letters, 21 (1968) 1530.
- [5]. U. Kreibitz, U. and P. Zacharias, Surface plasma resonances in small spherical silver and gold particles. Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei, 231 (1970) 128-143.
- [6] J.Z. Zhang, and C. Noguez, Plasmonic optical properties and applications of metal nanostructures. Plasmonics, 3 (2008) 127-150.
- [7] E. Kretschmann, and H. Raether, Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light, in Zeitschrift für Naturforschung A. (1968) 2135-2136.
- [8] M. O. Stetsenko, S.P. Rudenko, L.S. Maksimenko, B.K. Serdega, O. Pluchery and S.V. Snegir, Optical Properties of Gold Nanoparticle Assemblies on a Glass Surface, Nanoscale Research Letters, 12 (2017) Article number: 348.
- [9] B.E.A. Saleh, and M.C. Teich, Fundamentals of photonics. John Wiley & Sons. (1991) 313.
- [10]. D.K. Yang, and S.T. Wu, Fundamentals of liquid crystal devices. John Wiley & Sons.(2014)
- [11]. I.C. Khoo, Liquid crystals: physical properties and nonlinear optical phenomena. John Wiley & Sons, (1995).
- [12]. K.Chu, et al., Electrically controlled surface plasmon resonance frequency of gold nanorods. Applied physics letters, 89 (2006) 103107,1-3.

- [13]. V.K. Hsiao, et al., Light-driven plasmonic switches based on au nanodisk arrays and photoresponsive liquid crystals. *Advanced Materials*, 20 (2008) 3528-3532.
- [14]. Y.J. Liu, et al., A frequency-addressed plasmonic switch based on dual-frequency liquid crystals. *Applied Physics Letters*, (2010) 091101.
- [15]. Y.J.Liu, et al., Optically switchable gratings based on azo-dye-doped, polymer-dispersed liquid crystals. *Optics letters*, 34 (2009) 2351-2353.
- [16] D. Zografopoulos, and R. Beccherelli, Long-range plasmonic directional coupler switches controlled by nematic liquid crystals. *Optics express*, 21(2013) 8240-8250
- [17] Y.J. Liu, et al., Light-driven plasmonic color filters by overlaying photoresponsive liquid crystals on gold annular aperture arrays. *Advanced Materials*, 24 (2012) 131-135.
- [18] S. Guangyuan, et al., Annular aperture array based color filter. *Applied Physics Letters*, 99 (2011) 033105.
- [19] S. Guangyuan, et al., Reflective plasmonic color filters based on lithographically patterned silver nanorod arrays. *Nanoscale*, 5 (2013) 6243-6248.
- [20] D.C. Zografopoulos, and R. Beccherelli, Liquid – crystal - tunable metal–insulator – metal plasmonic waveguides and Bragg resonators. *Journal of Optics*, 15 (2013) 055009.
- [21]A. Vial, et al., Improved analytical fit of gold dispersion: Application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method. *Physical Review B*, 71 (2005) 085416.
- [22] L. De Sio, et al., Double active control of the plasmonic resonance of a gold nanoparticle array. *Nanoscale*, 4 (2012) 7619-7623.
- [23] C. Powell, and J. Swan, Effect of oxidation on the characteristic loss spectra of aluminum and magnesium. *Physical Review*, 180 (1960) 640.
- [24] R.H. Ritchie, Plasma losses by fast electrons in thin films. *Physical review*, 106 (1957) 874.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)