مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شمارهٔ ۵، زمستان ۱۳۹۶

شفافیت القایی الکترومغناطیسی در سیستم پلاسمونیکی متشکل از سه تیغهٔ موازی فلز- دی الکتریک- فلز: برهم‌کنش پلاسمون- پلاسمون

مهسا مرادبیگی، نادر دانش‌فر و طیبه ناصری

گروه فیزیک دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه

پست الکترونیکی: ndaneshfar@razi.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸)

چکیده

در این مقاله شفافیت القایی الکترومغناطیسی در سیستمی شامل آرایهٔ به هم پیوسته‌ای از سه تیغهٔ موازی باهم (فلز- دی الکتریک- فلز) مطالعه می‌شود. ضریب عبور، جذب و بازتاب به صورت تابعی از بسامد نور فرودی با استفاده از روش ماتریس انتقال محاسبه شده و بحث می‌شود. اثر ضخامت و نوع فلز بر شفافیت القایی الکترومغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده می‌شود با کاهش ضخامت تیغهٔ وسط، شفافیت القایی الکترومغناطیسی به علت جفت شدگی قوی پلاسمون- پلاسمون افزایش می یابد.

واژه‌های کلیدی: شفافیت القایی الکترومغناطیسی، جفت شدگی پلاسمون- پلاسمون

۱. مقدمه

نانو ساختارهای فلزی به علت کاربردهای مختلفی که دارند در سال‌های اخیر مورد توجه قرارگرفته‌اند. مسئلهٔ جفت‌شدگی پلاسمون- پلاسمون و پلاسمون- اکسایتون به دلیل به وجودآوردن خواص اپتیکی مناسب همچون شفافیت القایی الکترومغناطیسی[۱] و نور کند گذر[۲] بسیار حائز اهمیت هستند. اخیرا مسئلهٔ جفت شدگی پلاسمون- اکسایتون در سیستم‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]. با این مطالعات، به آسانی اثر شفافیت القایی الکترومغناطیسی در باند طیفی مشخصی بررسی شده است [۱۱]. بررسی سیستم‌هایی که دارای چنین ویژگی‌هایی باشند، به دلیل کاربردهای صنعتی و پزشکی، حائز اهمیت هستند.

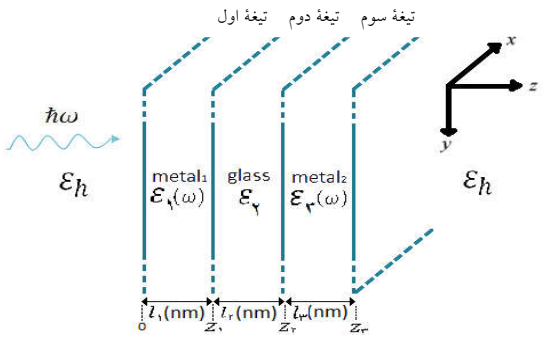
اخیراً مناسا[۳] (۲۰۱۳) الکترودینامیک نانوپوسته‌های سه لایه را بررسی کرده است که جفت‌شدگی اکسایتون- پلاسمون در نانو لایهٔ Ag-CuCl منجر به شکافتگی اکسایتونیک خطی و یک جابه‌جایی در مکان بسامد تشدید پلاسمون سطحی می‌شود [۳]. همچنین وو و همکارش چنگ[۴] (۲۰۱۴)، جفت‌شدگی‌های پلاسمون- اکسایتون در نانو لایه‌های نقره با یک هستهٔ نیمه

۱. Electromagnetically induced transparency (EIT)

۲. Slow Light

۳. Manassah

۴. Wu & Cheng



شکل ۱. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) ساختار سه تیغهٔ موازی متصل به هم واقع در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon_h = 1$.

جدول ۱. معرفی پارامترهای تابع دی‌الکتریک برای فلزات طلا، نقره و آلومینیوم.

نوع ماده	$\varepsilon_{P,\infty}$	ω_p(eV)	γ(eV)
نقره	۳٫۷	۹٫۲	۰٫۰۲
طلا	۶٫۹	۸٫۹	۰٫۰۷
آلومینیوم	۰٫۷	۱۲٫۷	۰٫۱۳

جدول ۲. معرفی نواحی سیستم مفروض.

محدودهٔ نواحی	مشخصهٔ مواد تشکیل دهنده
$0 \le z \le z_1$	ماده‌ای با ضریب شکست n_1 و ضخامت l_1
$z_1 \le z \le z_2$	ماده‌ای با ضریب شکست n_2 و ضخامت l_2
$z_2 \le z \le z_3$	ماده‌ای با ضریب شکست n_3 و ضخامت l_3

رسانای CuCl را که می‌تواند منجر به شفافیت القایی شود بررسی کرده‌اند [۴]. همچنین مناسا (۲۰۱۵) سیستم نانو کرهٔ سه لایه‌ای را که به بررسی الکترودینامیک آن پرداخته بود بین دو تیغهٔ موازی ساندویچ شده در نظر گرفته و ماتریس انتقال و ضریب عبور را مورد بررسی قرار داده است [۵]. کار پژوهشی دیگری بر روی جفت‌شدگی پلاسمون- اکسایتون در نانو لوله‌های پلاسمونیک توسط یانگ (۲۰۱۳) بر روی آرایه‌های پیوسته‌ای از آن انجام شده است [۶]. اخیرا جیانگ و همکارانش (۲۰۱۵) به بررسی مسئلهٔ جفت‌شدگی پلاسمون- اکسایتون در نانو لولهٔ نقرهٔ پوشیده شده با لایهٔ CuCl به کمک تئوری پراکندگی و روش المان محدود پرداخته‌اند [۷].

در این مقاله به بررسی پدیدهٔ شفافیت القایی الکترومغناطیسی درسیستمی شامل آرایهٔ به هم پیوسته‌ای از سه تیغهٔ موازی با هم به طوری که کل سیستم در خلأ قرار داده شده، پرداخته شده است. در این سیستم علاوه برتعیین میزان عبور موج الکترومغناطیسی که بیانگر شفافیت القایی الکترومغناطیسی می‌باشد، میزان جذب و بازتاب نیز مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین اثر ضخامت و جنس تیغه‌ها بر میزان عبور، بازتاب و جذب نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. مدل‌بندی و تئوری مسئله

شکل ۱ سیستمی متشکل از سه تیغه با ضرایب شکست n_1، n_2 و n_3 و به ترتیب با ضخامت‌های l_1، l_2 و l_3 را نشان می‌دهد مطابق جدول ۱ که در محیطی با ثابت دی الکتریک $\varepsilon_h = 1$ قرار دارد و تحت تابش الکترومغناطیسی گرفته است. تیغهٔ وسط از جنس شیشه با ثابت دی الکتریک $\varepsilon_2 = 2.25$ و تیغه‌های اول و سوم از جنس فلز هستند. تابع دی‌الکتریک فلز از تقریب درود تبعیت می‌کند که رابطهٔ آن عبارت است از:

$$\varepsilon^{(m)}(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_P^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \qquad (1)$$

که در آن، ε_∞ تابع دی الکتریک در بسامدهای بالا، ω_p بسامد پلاسمایی و γ عکس مدت زمان واهلش می‌باشد. مقادیر پارامترهای ذکر شده برای طلا، نقره و آلومینیوم در جدول ۲ آورده شده است [۸]. لازم به ذکر است که نانو ساختارهای ساخته شده از فلزات طلا، نقره و آلومینیوم، تشدیدهای پلاسمون سطحی با کیفیت بالا را پشتیبانی می‌کنند و مواد خوبی برای حسگرهای نوری و بیولوژیکی هستند.

برای چنین سیستمی ابتدا بایستی ماتریس انتقال موج محاسبه شود. می‌توان ماتریس انتقال برای انتقال موج فرودی در یک تیغه (انتقال در یک محیط) را با بردار موج $k=2\pi n/\lambda$ به شکل فرمول (۲) نوشت که λ طول موج نور فرودی است. ماتریس انتقال برای انتقال موج فرودی از محیطی با بردار موج k_i به محیط دیگری با بردار موج k_o را نیز می‌توان به شکل فرمول (۳) نوشت [۹]، لذا ماتریس انتقال کلی برای این سیستم متشکل از سه تیغهٔ موازی به شکل فرمول (۵) به دست می‌آید.

$$M^P(kl)=\begin{pmatrix} e^{ikl} & 0 \\ 0 & e^{-ikl}\end{pmatrix}, \tag{۲}$$

$$\begin{aligned} M^B(k_o,k_i) &= \frac{1}{2k_o}\begin{pmatrix} k_i+k_o & k_o-k_i \\ k_o-k_i & k_i+k_o\end{pmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{k_o}{k_i}}\left(\cosh(\lambda_{i\to o})I+\sinh(\lambda_{i\to o})\tau_1\right), \end{aligned} \tag{۳}$$

$$\begin{aligned} &\tau_1=\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0\end{pmatrix}, \lambda_{i\to o}=\frac{1}{2}\ln\left(\frac{k_i}{k_o}\right), \\ &\cosh(\lambda_{i\to o})=\frac{k_o+k_i}{2\sqrt{k_o k_i}}, \\ &\sinh(\lambda_{i\to o})=\frac{k_o-k_i}{2\sqrt{k_o k_i}}, \end{aligned} \tag{۴}$$

$$\begin{aligned} M = {} & M^P(k_3l_3).M^B(k_3,k_2). \\ & M^P(k_2l_2).M^B(k_2,k_1).M^P(k_1l_1)\ , \end{aligned} \tag{۵}$$

که در آن k_1 بردار موج تیغهٔ اول، k_2 بردار موج تیغهٔ وسط و k_3 بردار موج تیغهٔ آخر می‌باشد. همچنین I ماتریس واحد و τ_1 ماتریس پائولی می‌باشد. پس ازانجام عملیات جبری، مؤلفه‌های ماتریس $M=\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22}\end{pmatrix}$ به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} M_{11} = {} & \left(\cos(k_1l_1)+i\sin(k_1l_1)\right) \\ & \left(\cosh(\lambda_1)\cosh(\lambda_2)\right. \\ & \left(\cos(k_2l_2)+i\sin(k_2l_2)\right) \\ & \left(\cos(k_3l_3)+i\sin(k_3l_3)\right) \\ & +\left(\cos(k_2l_2)-i\sin(k_2l_2)\right) \\ & \left(\cos(k_3l_3)+i\sin(k_3l_3)\right)\sinh \\ & \left.(\lambda_1)\sinh(\lambda_2)\right), \end{aligned} \tag{۶}$$

$$\begin{aligned} M_{12} = {} & \left(\cos(k_1l_1)-i\sin(k_1l_1)\right) \\ & \left(\cosh(\lambda_2)\left(\cos(k_2l_2)+i\sin(k_2l_2)\right)\right. \\ & \left(\cos(k_3l_3)+i\sin(k_3l_3)\right)\sinh(\lambda_1) \\ & +\cosh(\lambda_1)\left(\cos(k_2l_2)-i\sin(k_2l_2)\right) \\ & \left.\left(\cos(k_3l_3)+i\sin(k_3l_3)\right)\sinh(\lambda_2)\right), \end{aligned} \tag{۷}$$

$$\begin{aligned} M_{21} = {} & \left(\cos(k_1l_1)+i\sin(k_1l_1)\right) \\ & \left(\cosh(\lambda_2)\left(\cos(k_2l_2)-i\sin(k_2l_2)\right)\right. \\ & \left(\cos(k_3l_3)-i\sin(k_3l_3)\right)\sinh(\lambda_1) \\ & +\cosh(\lambda_1)\left(\cos(k_2l_2)+i\sin(k_2l_2)\right) \\ & \left.\left(\cos(k_3l_3)-i\sin(k_3l_3)\right)\sinh(\lambda_2)\right), \end{aligned} \tag{۸}$$

$$\begin{aligned} M_{22} = {} & \left(\cos(k_1l_1)-i\sin(k_1l_1)\right) \\ & \left(\cosh(\lambda_1)\cosh(\lambda_2)\left(\cos(k_2l_2)-i\sin(k_2l_2)\right)\right. \\ & \left(\cos(k_3l_3)-i\sin(k_3l_3)\right) \\ & +\left(\cos(k_2l_2)+i\sin(k_2l_2)\right) \\ & \left.\left(\cos(k_3l_3)-i\sin(k_3l_3)\right)\sinh(\lambda_1)\sinh(\lambda_2)\right), \end{aligned} \tag{۹}$$

که در آن $\lambda_2=\frac{1}{2}\mathrm{Ln}\left(\frac{n_2}{n_3}\right)$ و $\lambda_1=\frac{1}{2}\mathrm{Ln}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ است.

حال اگر فرض کنیم که این سیستم به صورت یک آرایهٔ n بار تکرار شود و این سیستم جدید در محیط خلأ قرار داده شود، می توان ماتریس انتقال چنین سیستمی را مطابق رابطهٔ ماتریسی (۱۰) به شکل فرمول (۱۱) نوشت، که در آن k_0 بردار موج در خلأ و $\theta=\mathrm{Arccos}(\frac{1}{2}(M_{11}+M_{22}))$ می‌باشد [۱۰].

$$M^n=\begin{pmatrix} \dfrac{M_{11}sin(n\theta)-sin((n-1)\theta)}{sin(\theta)} & \dfrac{M_{12}sin(n\theta)}{sin(\theta)} \\ \dfrac{M_{21}sin(n\theta)}{sin(\theta)} & \dfrac{M_{22}sin(n\theta)-sin((n-1)\theta)}{sin(\theta)}\end{pmatrix}, \tag{۱۰}$$

$$M_T=M^B(k_0,k_3).\,M^n.M^B(k_1,k_0)\,. \tag{۱۱}$$

اکنون با داشتن آرایه‌های ماتریس انتقال کلی، $M_T=\begin{pmatrix} (M_T)_{11} & (M_T)_{12} \\ (M_T)_{21} & (M_T)_{22}\end{pmatrix}$ می‌توان دامنه‌های عبور و بازتاب را به دست آورد [۱۱].

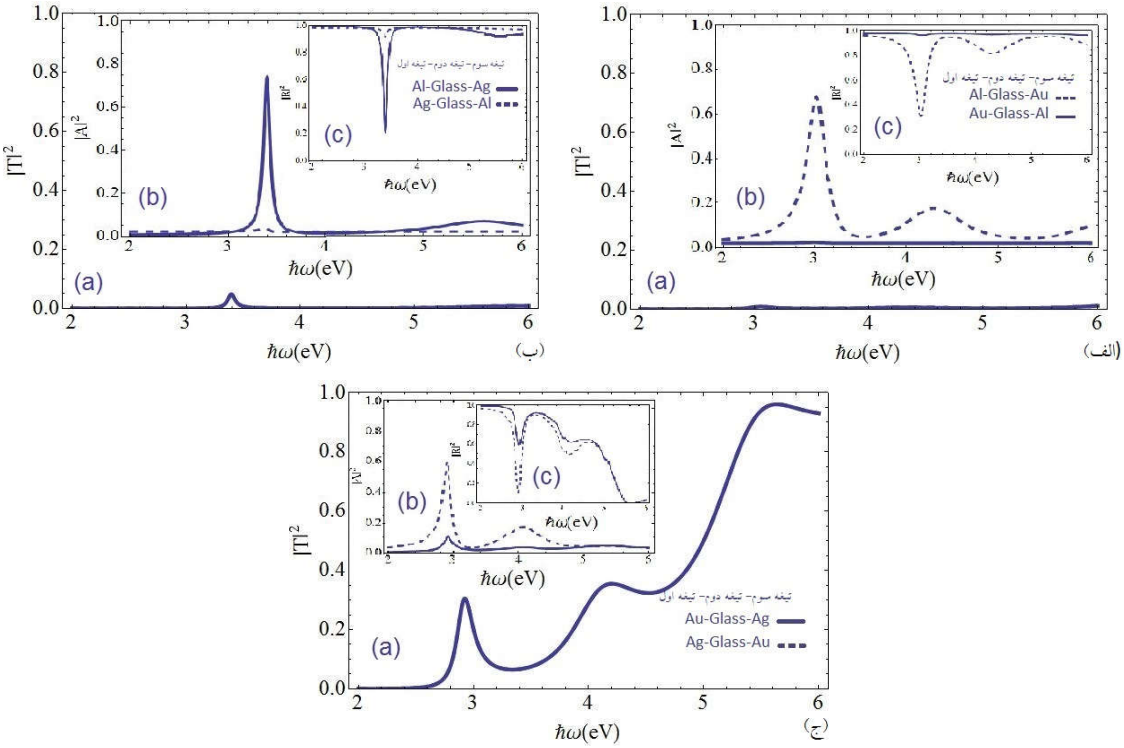
$$|R|=\left|\frac{(M_T)_{12}}{(M_T)_{22}}\right|, |T|=\left|\frac{1}{(M_T)_{22}}\right|, \tag{۱۲}$$

که ضرایب انتقال و بازتاب معادل با $|T|^2$ و $|R|^2$ می‌باشند. بدین ترتیب ضریب جذب نیز از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$|T|^2+|R|^2+|A|^2=1 \tag{۱۳}$$

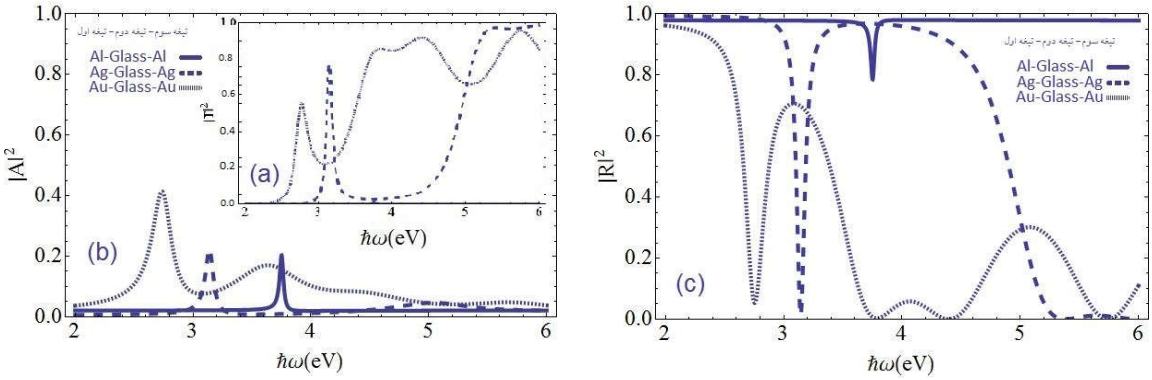
۳. بحث و بررسی نتایج عددی

در شکل ۲ نمودارهای مربوط به میزان عبور، جذب و بازتاب نور فرودی برای یک سیستم شامل تیغهٔ شیشه‌ای با ضخامت $l_2=80\ nm$ ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی غیر هم جنس، با



شکل ۲. میزان عبور (الف)، جذب (ب) و بازتاب (ج) برای یک سیستم شامل تیغهٔ شیشه‌ای ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی غیر هم جنس با ضخامت‌های برابر با $l_1 = l_3 = 50\,nm$ و $l_2 = 80\,nm$.

ضخامت‌های $l_1 = l_3 = 50\,nm$ رسم شده است. نمودار (الف) و (ب) به ترتیب برای زمانی است که تیغه‌های فلزی از جنس طلا- آلومینیوم، آلومینیوم- نقره باشند و نمودار (ج) نیز برای حالتی است که تیغه‌های فلزی از جنس نقره- طلا است. همان طور که از نمودارها مشهود است میزان عبورنور فرودی برای انتخاب سیستمی به شکل: تیغهٔ اول (فلز نوع ۱)- تیغهٔ دوم (شیشه)- تیغهٔ سوم (فلز نوع ۲)، با سیستمی به فرم: تیغهٔ اول (فلز نوع ۲)- تیغهٔ دوم (شیشه)- تیغهٔ سوم (فلز نوع ۱)، تقریباً یکسان است، اما درمیزان جذب و بازتاب نور تفاوت وجود دارد. از نمودار (الف) چنان بر می‌آید که با عبور موج ابتدا از تیغهٔ آلومینیومی با ضخامت ۵۰ نانومتر و پس از آن از تیغهٔ شیشه‌ای با ضخامت ۸۰ نانومتر و در آخر تیغهٔ طلا با ضخامت ۵۰ نانومتر، حدود ۷۵٪ از نور فرودی با انرژی ۳ eV جذب شده و با صرف نظر از میزان اندک عبور، ۲۵٪ از نور فرودی در این انرژی به بازتاب اختصاص یافته است و این در حالی است که اگر نور ابتدا از تیغهٔ طلا و سپس از تیغه‌های شیشه‌ای و آلومینیومی بگذرد، به علت میزان اندک جذب و عبور، تمامی نور از سیستم بازتاب می‌شود، به عبارتی در چنین سیستمی بهرهٔ EIT نزدیک به صفر خواهد بود. هنگامی که جنس تیغهٔ فلزی اولیه از آلومینیوم و تیغهٔ انتهایی نقره (با همان ضخامت‌های ذکر شده) باشد، در بسامد تشدید حدود ۳/۴ eV، ۷۵٪ از نور فرودی جذب، ۲۰٪ بازتاب و ۵٪ باقیمانده عبور می‌کند، یعنی بهره ۵٪ خواهد بود. در حالی که با جابه‌جا کردن جنس تیغهٔ اول و سوم حدود ۹۵٪ از نور بازتاب شده و درصد باقیمانده در همان انرژی بین میزان جذب و عبور تقسیم می‌شود. همچنین با انتخاب جنس تیغهٔ اول از طلا و سومین تیغه از نقره در انرژی کمتر از ۳ eV، ۳۰٪ از نور فرودی عبور، ۱۰٪ جذب و باقیمانده بازتاب می‌شود که با عوض کردن جنس تیغه‌های فلزی بدون تغییر در بهرهٔ EIT، میزان جذب به ۶۰٪ افزایش یافته و باقیماندهٔ نور فرودی بازتاب می‌شود. همان گونه که نتایج نشان



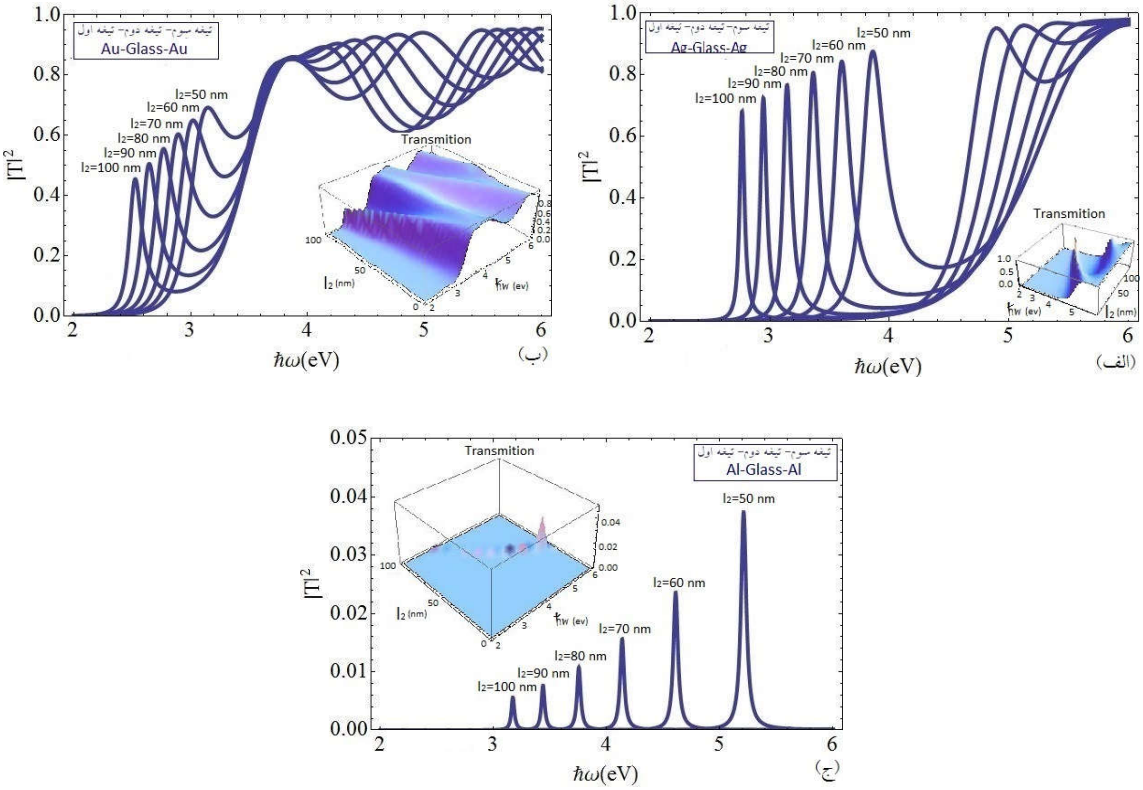
شکل ۳. میزان عبور(a)، جذب (b) و بازتاب (c) برای یک سیستم شامل تیغهٔ شیشه‌ای ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی هم جنس با ضخامت های برابر با $l_1 = l_3 = 50\,nm$ و $l_2 = 80\,nm$.

می‌دهند، اگر جنس تیغهٔ فلزی از آلومینیوم باشد بهره بیشترین کاهش را خواهد داشت و کمترین افت مربوط به نقره خواهد بود [۸]، زیرا طلا و نقره نزدیک‌ترین بسامد پلاسمایی به ناحیهٔ مرئی طیف را نشان می‌دهند و مواد خوبی برای کاربردهای پلاسمونیکی هستند. لذا با انتخاب جنس تیغه‌ها از نقره می‌توان بهرهٔ EIT را افزایش داد.

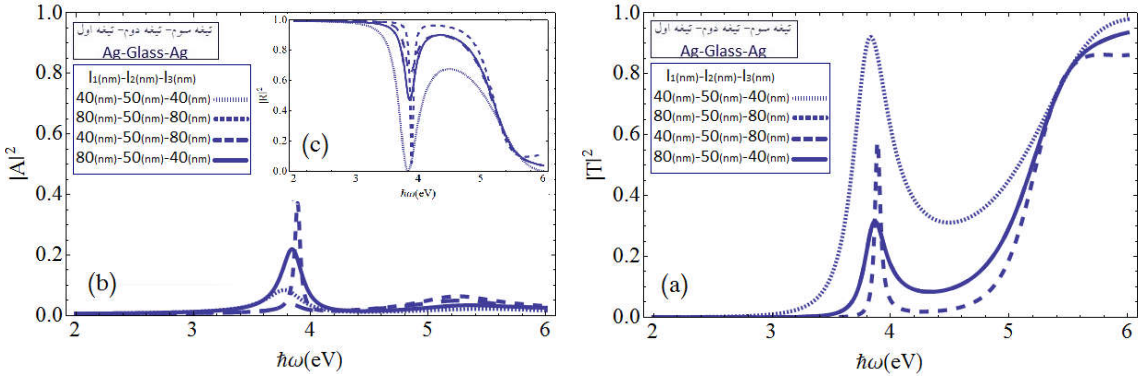
شکل ۳ میزان عبور، جذب و بازتاب نور فرودی برای یک سیستم شامل تیغهٔ شیشه‌ای با پهنای $l_2 = 80\,nm$ ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی هم جنس، با ضخامت‌های $l_1 = l_3 = 50\,nm$، را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۳ پیداست، اگر جنس هر دو تیغهٔ فلزی از آلومینیوم باشد، در تمامی انرژی ها به جز ۳/۷۵ eV، صد درصد نور فرودی بازتاب می‌شود و در این انرژی(۳/۷۵ eV)، ۸۰٪ از نور در برهم‌کنش با سیستم، بازتاب و ۲۰٪ جذب می‌شود، بنابراین بهره حداقل خواهد بود. با انتخاب جنس تیغه‌ها از طلا، در انرژی ۲/۷۵ eV، ۵۱٪ از نور فرودی عبور،۴۴٪ جذب و حدود ۵٪ بازتاب می‌شود. با تغییرجنس تیغه‌های فلزی به فلز نقره، در انرژی ۳/۱۱ eV، ۲۰٪ از نور جذب و ۸۰٪ عبور می‌کند، لذا با این انتخاب می‌توان بهره را به ۸۰٪ افزایش داد که این مورد به سبب افت کم نقره در این بازهٔ انرژی است.

شکل ۴ تأثیر ضخامت تیغهٔ شیشه‌ای (فاصلهٔ بین دو تیغهٔ فلزی) بر میزان عبور برای سیستم شامل سه تیغهٔ متصل به هم را که در خلأ واقع شده است، نشان می‌دهد. در انتخاب سیستمی به شکل: تیغهٔ اول (فلز نوع ۱)- تیغهٔ دوم (شیشه)- تیغهٔ سوم (فلز نوع ۱)، با افزایش پهنای محیط ۲ (افزایش ضخامت تیغهٔ شیشه‌ای)، میزان عبور به علت کاهش جفت شدگی پلاسمون- پلاسمون بین ناحیهٔ ۱ و ۳ که فلز می‌باشد، کاهش یافته و همچنین یک جابه‌جایی بسامدی به سمت بسامدهای کمتر (انتقال قرمز) برای بسامد تشدید وجود دارد.

در شکل ۵ اثر ضخامت تیغه‌های فلزی از جنس فلز نقره با فرض ثابت بودن ضخامت تیغهٔ شیشه‌ای ۵۰ نانومتری بر میزان عبور، جذب و بازتاب را برای سیستمی شامل سه تیغهٔ متصل به هم که در خلأ واقع شده است، نشان می‌دهد. یک ضخامت بهینه برای دسترسی به بیشترین بهره وجود دارد. در $l_1 = l_3 = 40\,nm$ با فرض ثابت بودن $l_2 = 50\,nm$ بهرهٔ EIT تا ۹۰٪ افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت تیغه‌های فلزی تا۸۰ نانومتر به دلیل افزایش میزان جذب در فلزات، میزان عبور نور فرودی کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت تیغهٔ ابتدایی به ۸۰ نانومتر با فرض $l_2 = 50\,nm$ و $l_3 = 40\,nm$ به علت افزایش میزان جذب و بازتاب نور فرودی در لایهٔ ابتدایی، بهره تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد. اگر ضخامت لایه‌ها به شکل $l_1 = 40\,nm$، $l_2 = 50\,nm$ و $l_3 = 80\,nm$ انتخاب شوند نسبت به مورد قبل، نور فرودی در گذر از لایهٔ اول کمتر جذب شده اما به علت افزایش میزان بازتاب، بهرهٔ EIT همان ۳۰٪ خواهد بود. (نمودارهای میزان عبورنور فرودی این دو مورد بر هم منطبق شده‌اند.)

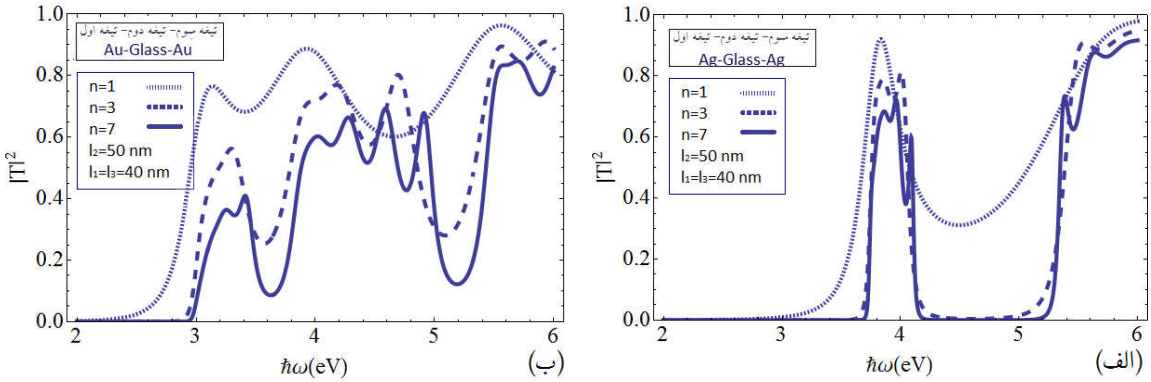


شکل ۴. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تأثیر ضخامت تیغهٔ شیشه‌ای برای یک سیستم شامل تیغهٔ شیشه‌ای ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی هم جنس با ضخامت های برابر $l_1 = l_3 = 50\ nm$، بر میزان عبور.



شکل ۵. تأثیر ضخامت تیغه‌های فلزی با فرض ثابت بودن ضخامت تیغهٔ شیشه‌ای $l_2 = 50\ nm$ برای یک سیستم شامل تیغهٔ شیشه‌ای ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی هم جنس (از جنس نقره)، بر میزان عبور (a)، جذب (b) وبازتاب (c).

شکل ۶ اثر تعداد دفعات تکرار سیستمی شامل سه تیغهٔ متصل به هم را بر میزان عبور نشان می‌دهد. با گذر نور از تعداد تیغه‌های بیشتر که شامل تیغه‌های فلزی نیز هستند به سبب افزایش میزان جذب نور فرودی، بهرهٔ EIT کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن سه تیغهٔ متصل به هم به عنوان یک سلول واحد، مشاهده می‌شود که وقتی۳ و۷ سلول واحد ($n = 7$ و $n = 3$) داشته باشیم تعداد نوسانات تشدیدی افزایش می‌یابد که این مورد به علت جفت شدگی پلاسمون- پلاسمون می‌باشد.



شکل ۶. اثر تعداد دفعات تکرار سیستمی شامل تیغهٔ شیشه‌ای۵۰ نانومتری ساندویچ شده بین دو تیغهٔ فلزی از جنس یکسان با ضخامت‌های برابر۴۰ نانومتر بر میزان عبور.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله پدیدهٔ شفافیت القایی الکترومغناطیسی در سیستمی شامل آرایهٔ به هم پیوسته‌ای از سه تیغهٔ موازی با هم که این سیستم کلی در خلأ قرار داده شده، بررسی شد. هنگامی که یک آرایه از این سیستم، شامل تیغهٔ شیشه‌ای قرار گرفته در بین دو تیغهٔ فلزی مورد بررسی قرار گرفت، به علت میزان بیشترین افت در آلومینیوم نسبت به طلا و نقره، اگر جنس تیغهٔ فلزی از آلومینیوم باشد بهره بیشترین کاهش را خواهد داشت و کمترین افت مربوط به نقره خواهد بود، لذا با انتخاب جنس تیغه‌های فلزی از نقره می‌توان بهرهٔ EIT را افزایش داد. همچنین می‌توان با انتخاب ضخامت مناسبی از تیغه‌های فلزی و فاصلهٔ میان آنها به واسطهٔ حداکثر جفت شدگی پلاسمون- پلاسمون، بهرهٔ EIT را تا ۹۰٪ افزایش داد. نتیجهٔ دیگر آنکه با تغییر جنس و ضخامت تیغه‌ها، جابه‌جایی در بسامد تشدیدی و میزان شفافیت القایی الکترومغناطیسی رخ می‌دهد، لذا می‌توان از این سیستم به عنوان حسگرهای پلاسمونیکی و زیستی استفاده کرد.

مراجع

1. W Zhang, A O Govoro, and G W. Bryant, *Phys. Rev. Lett*, **97** (2006) 146804.
2. P Tassin, L Zhang, Th Koschny, E N Economou, and C M Soukoulis, *Phys. Rev. Lett*, **102** (2009) 053901.
3. J T Manassah, *Phys. Rev*. A, **87** (2013) 053845.
4. D J Wu, Y Cheng, X W Wu, and X J Liu, *J. Opt. Soc.Am*. B, **31** (2014) 2273.
5. J T Manassah, Springer Science+Business Media New York 2015, **9** (2015) 11468.
6. J Y Yang, *Opt. Express*, **21** (2013) 25607.
7. S M Jiang, Q Y Xie, and D J Wu, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015, **3** (2015) 6083.
8. P West, S Ishii, G Naik, N Emani, V Shalaev, and A Boltasseva, *Laser Photonics Rev*, **4** (2010) 795.
9. R Friedberg, J T Manassah, *Physics Letters* A, **372** (2008) 4164.
10. J T Manassah, Springer Science+Business Media New York 2015, **3** (2015) 11468.
11. L Li, *Optical Sciences Center*, University of Arizona, Tucson, (1995) 85721.