

محاسبه گاف انرژی و ثابت گذردهی موثر چند لایه ای های متجانس و نامتجانس ساخته شده از مواد پلاسمونی و غیر پلاسمونی در فرکانس های بالا

مجتبی گودرزی^{*}، کامبیز هدایتی

گروه علوم پایه، دانشگاه صنعتی اراک

چکیده

در این مقاله، با استفاده از فرمول بندی کلاوسیوس و موسوتی ثابت گذردهی موثر ناشی از چندلایه ای هایی متشکل از مواد پلاسمونی و غیر پلاسمونی را برای دو حالت متجانس و نامتجانس از لایه های $ZnO-Ag-ZnO-Ag$ ، $ZnO-Ag-ZnS-Ag$ ، $ZnO-Ag-ZnO-Al$ و $ZnS-Ag-ZnS-Al$ و ... با استفاده از شبیه سازی محاسبه شده است. در ادامه به محاسبه گاف انرژی مربوط به هر یک از ترکیب های اشاره شده پرداخته و با تحلیل نمودارهای بدست آمده نشان داده می شود که در محدوده های فرکانسی مختلف، خواص چند لایه ای ها تغییر کرده و این چند لایه ای ها از خود خاصیت مقاومتی، القايدگی و خازنی نشان می دهند، همچنین میزان تاثیر، تغییر مواد پلاسمونی نسبت به غیر پلاسمونی در اندازه گیری کمیت های اشاره شده نیز بررسی شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده، طراحی مدار های مجتمع حاصل از ترکیب نانو لایه های پلاسمونی و غیر پلاسمونی قابل شبیه سازی و تحلیل می باشد.

واژه های کلیدی: پلاسمون، گذردهی موثر، گاف انرژی و شبیه سازی

ایمیل نویسنده مسئول: m.goodarzi@arakut.ac.ir

۱-مقدمه

امروزه از نانو ساختارها در شاخه های مختلف علوم پایه و مهندسی به خصوص در مخابرات و ساخت قطعات الکترونیکی استفاده های فراوان میشود، گذردهی موثر ϵ_{eff} ، نفوذ پذیری مغناطیسی موثر μ_{eff} ، ضریب شکست موثر n_{eff} و گاف انرژی از پارامترهای مهم برای تعیین ساختار مواد محسوب می شود. همچنین باتوجه به اینکه در ساخت قطعات الکترونیکی (مقاومتها، خازنها، القاگرها و...) اندازه قطعات و سرعت عمل آنها در انتقال اطلاعات از اهمیت بالایی برخوردار است، لذا شاخه ای تحت عنوان پلاسمونیک از سال ۲۰۰۰ به بعد ایجاد شد که باتوجه به ساختار کوچک و سرعت بالا، نسبت به سایر شاخصه ها مانند الکترونیک (با سائز قطعات کوچک و سرعت عمل پایین) و فوتونیک (سرعت عمل بالا ولی با سائز بزرگ) دارای مزیت بیشتری می باشد. در این مقاله مطالعات بر پایه تئوری موثر ترکیب نانو کره هایی با شعاع های مختلف طرح ریزی شده است که با استفاده از محاسبات رابطه کلاوسیوس و موسوتی (Claussius-Mossotti) به پیدا کردن ضریب گذردهی موثر ϵ_{eff} پرداخته و این پارامتر با انجام شبیه سازی برای محیطی مرکب از کره هایی با خاصیت نیمه رسانا (غیر پلاسمونیک) و رسانا (پلاسمونیک) محاسبه می شود. بعضی از پارامتر های مهم مواد، به خصوص ترکیبی از دو یا چند نانو کره که تشکیل لایه های

در ابعاد نانو می دهند در شناسایی خواص آن از اهمیت بالایی برخوردار است، به عنوان نمونه می توان از ترکیب نانو کره هایی که قسمت حقیقی ضریب گذردهی موثر آنها مثبت باشد در میدان الکتریکی به عنوان يك نانو خازن استفاده نمود. همچنین ترکیب نانو کره هایی که قسمت حقیقی ضریب گذردهی موثر آنها منفی باشد را در میدان الکتریکی قرار دهیم، می توان از آن به عنوان القاگر بهره برد. این نتایج، خود منجر به ساخت نانو مدارها در الکترونیک و مخابرات خواهد شد. برای نمونه اگر از سه یا چهار لایه متشکل از نانو کره هایی با مقدار حقیقی ضریب گذردهی موثر مثبت و منفی بر روی یکدیگر لایه نشانی شوند، نانو شبکه ای جهت خطوط انتقال داده ها ساخته خواهد شد [۱-۸].

با توجه به اینکه با دو گروه از نانو ذرات با خواص متفاوت از لحاظ الکتریکی و مغناطیسی کار خواهیم کرد، جهت محاسبه ضریب گذردهی موثر برای يك ماده متشکل از نانو کره های پلاسمونی و غیر پلاسمونی از رابطه کلاوسیوس و موسوتی استفاده شده است.

در این کار از دو نوع نانو کره نیمه رسانا مختلف ZnS و ZnO و دو نوع نانو کره رسانای مختلف Ag و Al استفاده می شود، نانو کره ها به صورت لایه لایه بر روی یکدیگر قرار گرفته و چند مدل ترکیب متجانس و نامتجانس از نحوه چیدمان خود تولید می کنند، در این مقاله ترکیب های

در نزدیکی فرکانس تشدید معمولاً صرف نظر کردن از α_m باعث ایجاد خطای محاسباتی زیادی نمی‌شود اما در خود فرکانس تشدید خطای حاصل کاملاً قابل توجه است. همچنین به ترتیب قابلیت قطبش پذیری α_e به قطبش پذیری الکتریکی برای $r = r_e$ و قابلیت قطبش پذیری مغناطیسی α_m برای $r = r_m$ مربوط می‌شود.

قطبش پذیری الکتریکی و مغناطیسی دوقطبی‌ها به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\alpha_e = \frac{\epsilon_p r^2 \epsilon_b (\epsilon_b - \epsilon_i f(\theta_e))}{2\epsilon_b + \epsilon_i f(\theta_e)} \quad (2)$$

و

$$\alpha_m = \frac{4\pi r^3 (1 - \mu_i f(\theta_m))}{(2 + \mu_i f(\theta_m))} \quad (3)$$

که در آن

$$f(\theta_{e,m}) = \frac{2(\sin \theta_{e,m} - \theta_{e,m} \cos \theta_{e,m})}{(\theta_{e,m}^2 - 1) \sin \theta_{e,m} + \theta_{e,m} \cos \theta_{e,m}} \quad (4)$$

و

$$\theta_{e,m} = K_o r_{e,m} \sqrt{\epsilon_i \mu_i} \quad (5)$$

همچنین گاف انرژی و ضریب گذردهی مؤثر نیز توسط رابطه زیر با یکدیگر مرتبط می‌شوند [۲۰]:

$$\epsilon_{eff} = 1 + \left(\frac{E_p}{E_g} \right)^2 \left(1 - \frac{E_g}{4E_f} + \frac{1}{3} \left(\frac{E_g}{4E_f} \right)^2 \right) \quad (6)$$

که در این رابطه E_p و E_g, E_f به ترتیب انرژی فرمی، گاف انرژی و انرژی پلاسما می‌باشند. در بخش بعد به بحث و بررسی در خصوص ضریب گذردهی مؤثر چند لایه ای‌ها و گاف انرژی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش ضریب گذردهی مؤثر لایه‌هایی از نانو کره‌های عایق ZnO و ZnS که با دو

ترکیب‌های متجانس حاصل از رسا و دو عایق رسم و تحلیل می‌شود. همانطور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، قسمت حقیقی ϵ_{eff} بر حسب فرکانس در محدوده GHz برای ترکیب‌های مشخص شده در نمودارها رسم شده است.

$ZnO - Ag - ZnO - Ag$ ، $ZnO - Ag - ZnS - Ag$ ، $ZnO - Ag - ZnO - Al$ و $ZnO - Ag - ZnS - Al$ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با استفاده از شبیه سازی بدست می‌آید.

مقادیر ثابت گذردهی مؤثر، در حالتی که مقدار قسمت حقیقی آن بزرگتر از صفر و یا کوچکتر از صفر باشد، به ترتیب خاصیت خازنی و القاگری و همچنین در حالتی که مقدار موهومی ثابت گذردهی مؤثر مخالف صفر باشد، از خود خاصیت مقاومتی نشان می‌دهد [۹-۱۸]. با توجه به نوع قرارگیری نانو ذرات در ترکیب‌های اشاره شده، خواص متفاوتی قابل پیش‌بینی می‌باشد که در نتایج حاصل از این مقاله به آنها اشاره شده است. از دیگر پارامترهای مهم در شناسایی خواص اپتیکی و الکترونیکی مواد، گاف انرژی است [۱۸]، در این مقاله با استفاده از رابطه بین ضریب گذردهی مؤثر و گاف انرژی [۱۶]، به محاسبه گاف انرژی پرداخته و نمودارهای تغییرات آن بر حسب طول موج با استفاده از شبیه سازی رسم شده است.

۲- اصول و فرمولبندی نظری

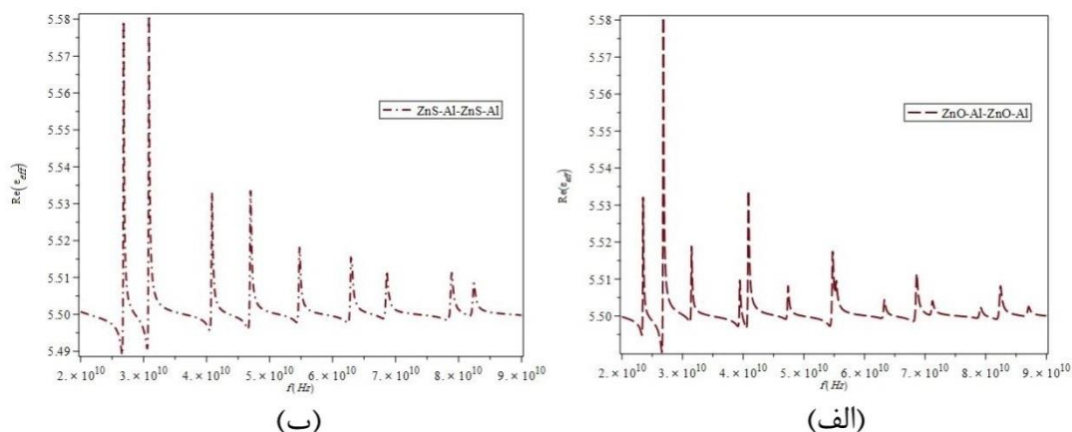
رابطه کلاسیوس-موسوتی بکار گرفته شده برای این فرمول بندی خیلی نزدیک به مد‌های تشدیدي Mie می‌باشد. در این فرمالیسم، فلزات غیر مغناطیسی و دی‌الکتریک‌ها بصورت کره‌هایی در ابعاد نانو فرض شده است.

شکل کلی رابطه کلاسیوس-موسوتی ثابت گذردهی مؤثر برای یک ماده با تعداد K کره در تشدید الکتریکی و N کره در تشدید مغناطیسی از نانو کره‌های پلاسماونیک و غیر پلاسماونیک به شکل زیر معرفی می‌شود [۱۸]:

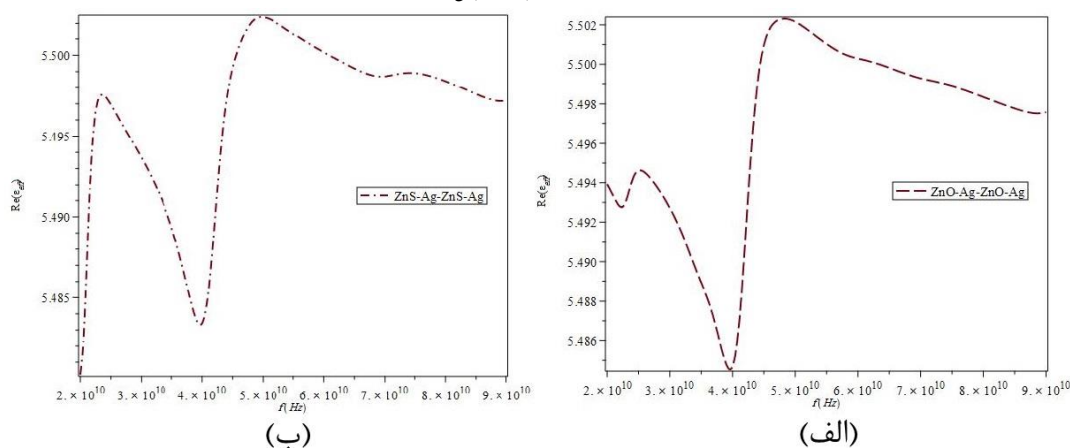
$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_b}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_b} = \frac{1}{2\epsilon_b} \left(\sum_{k=1}^K n_{ek} \alpha_{ek} \right) + \left(\sum_{n=1}^N n_{mn} \alpha_{mn} \right) \quad (1)$$

به طوری که $\alpha_m, \alpha_e, n_m, n_e$ به ترتیب تعداد کره‌ها بر واحد حجم در تشدید الکتریکی، تعداد کره‌ها بر واحد حجم در تشدید مغناطیسی، قابلیت قطبش پذیری الکتریکی کره‌ها در تشدید الکتریکی و قابلیت قطبش پذیری الکتریکی کره‌ها در تشدید مغناطیسی است. همچنین ϵ_b ضریب گذردهی زیر لایه می‌باشد.

لایه از نانو کره‌هایی از جنس رسا Ag و Al به شیوه متجانس و نامتجانس تشکیل چند لایه ای‌های متفاوتی را داده‌اند، محاسبه شده است و با ضرایب پراکندگی Mie مربوط به آن‌ها شبیه سازی شده‌اند. در ابتدا نمودارهای مربوط به قسمت حقیقی و موهومی ضریب دو ماده گذردهی مؤثر



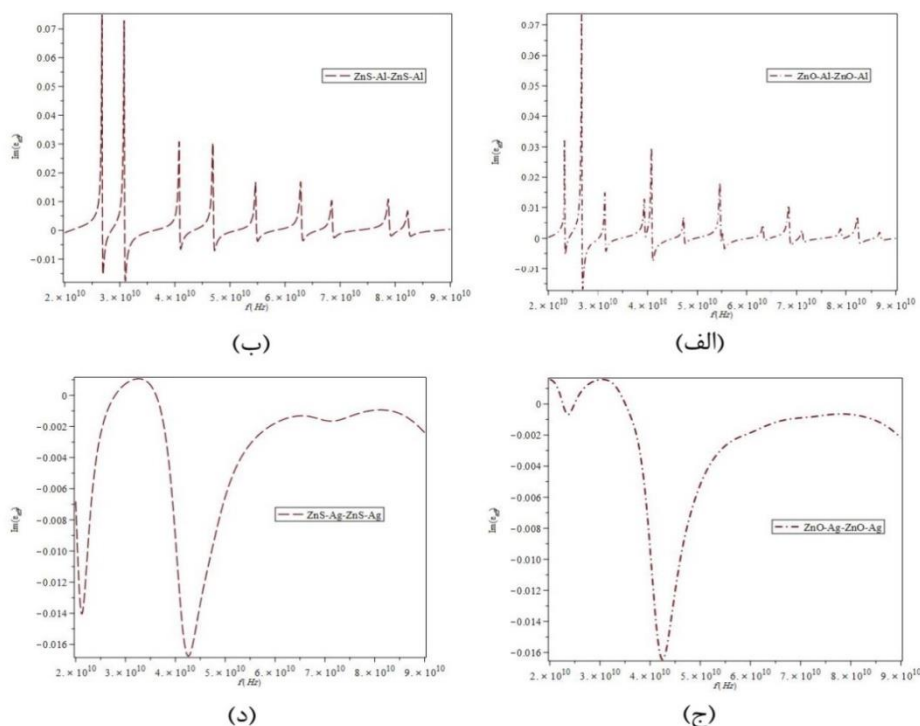
شکل ۱: نمودار مقدار حقیقی ثابت گذردهی موثر ترکیب لایه های مرکب از دو لایه عایق یکسان که بین دو لایه از جنس رسانا یکسان به صورت متوالی قرار گرفته، محور افقی بر حسب فرکانس می باشد، مقادیر مورد استفاده در رسم نمودار عبارتند از: $r_e(\text{ZnO}) = 40\text{nm}$ ، $r_m(\text{Zl}) = 23\text{nm}$ ، $r_e(\text{ZnS}) = 20\text{nm}$



شکل ۲: نمودار مقدار حقیقی ثابت گذردهی موثر ترکیب لایه های مرکب از دو لایه عایق یکسان که به صورت متناوب بین دو لایه رسانا از جنس Ag با شعاع $r_{Ag} = 10\text{nm}$ (ترکیب متجانس) قرار گرفته، بر حسب فرکانس رسم شده است، سایر اطلاعات مطابق شکل ۱ می باشد.

ϵ_{eff} نسبت به تغییرات فرکانس، دارای نوسانات کمتری می-باشد. همانطور که مشاهده می شود، رفتار هر دو ترکیب با حاصل از لایه های متشکل از نانو ذرات پلاسمونی کوچکتر واضح تر می باشد. جهت مقایسه بهتر میان ترکیب های ارائه شده در شکل های ۱ و ۲ نمودارهای مقایسه ای با ماده رسانا یکسان در هر نمودار رسم شده است. در شکل ۳ نمودارهای مربوط به قسمت موهومی ϵ_{eff} بر حسب فرکانس در بازه ۲۰ تا ۹۰ گیگا هرتز رسم شده است.

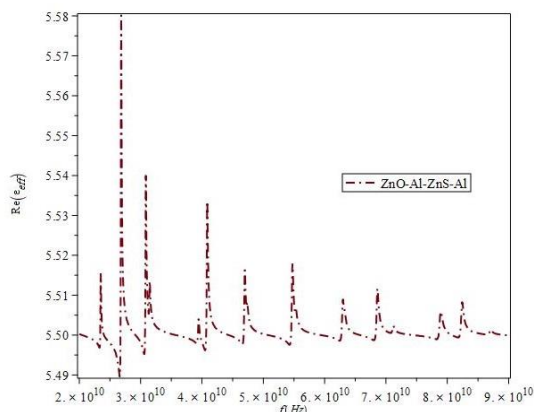
در شکل ۱ قسمت حقیقی ϵ_{eff} بر حسب فرکانس در بازه ۲۰ تا ۹۰ گیگا هرتز رسم شده است، همانطور که مشاهده می شود، ثابت گذردهی موثر به شدت وابسته به ابعاد نانو ذرات رسانا بوده، اما وابستگی آن نسبت به نانو ذرات عایق ناچیز می باشد، همانطور که در نمودار ها مشاهده می شود، ثابت گذردهی موثر بزرگتر از صفر می باشد، این مطلب بیان کننده آن است که ترکیب حاصل از نانو لایه ها خاصیت خازنی دارد، [۸]، زمانی که از نانو ذرات پلاسمونی با ابعاد کوچکتر استفاده می کنیم، افزایش فرکانس، دارای همخوانی بیشتری با یکدیگر می باشند، این رفتار در ترکیب های تغییرات قسمت حقیقی



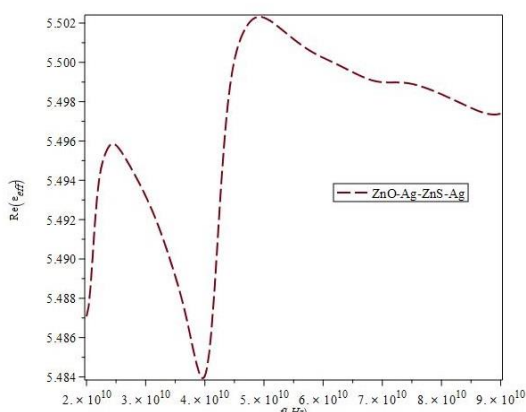
شکل ۳: مقایسه نمودار مقدار موهومی ثابت گذردهی موثر ترکیب لایه‌های مرکب از یک لایه عایق که بین دو لایه از رسانا ها قرار گرفته، محور افقی بر حسب فرکانس می باشد، سایر پارامتر ها مطابق شکل ۱ می باشد.

نوسانات کمتری می باشد. در ادامه ترکیب های نامتجانس از چند لایه ای های مرکب از مواد پلاسمونی و غیر پلاسمونی مورد بررسی قرار می گیرد. همانطور که در نمودار های شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود، نمودار های مربوط به ترکیب های نامتجانس از قرار گرفتن لایه-هایی در ابعاد نانو از ذرات متفاوت می باشند، مشاهده می گردد که رفتار محیط های تولید شده، همانند مطالبی که قبلا ارائه گردید، وابسته به تغییرات نوع ذرات پلاسمونی و غیر پلاسمونی می باشد. این تغییرات در حالتی که نوع ماده پلاسمونی تغییر می کند نسبت به حالتی که نوع ماده غیر پلاسمونی تغییر می کند، دارای نوسانات بیشتری می باشد.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، مشابه نمودار های نشان داده شده در شکل ۱ و ۲، قسمت موهومی ثابت گذردهی موثر نیز مشابه مقدار حقیقی آن به شدت وابسته به ابعاد نانو ذرات رسانا می باشد، اما وابستگی آن نسبت به نانو ذرات عایق ناچیز می باشد، همانطور که مشاهده می شود، بر خلاف مقدار حقیقی ϵ_{eff} ، مقدار موهومی با تغییر فرکانس مرتباً تغییر علامت داده و در بازه هایی از فرکانس مقدار آن مخالف صفر می باشد، این مطلب نشان می دهد که لایه های تشکیل شده از خود خاصیت مقاومتی نشان می دهند، [۹]، زمانی که از نانو ذرات پلاسمونی با ابعاد کوچکتر استفاده می کنیم، تغییرات قسمت موهومی ϵ_{eff} نسبت به تغییرات فرکانس، دارای

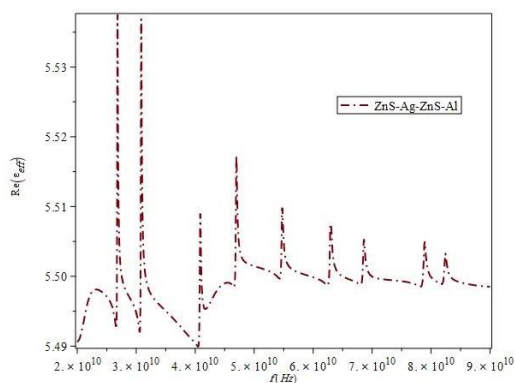


(ب)

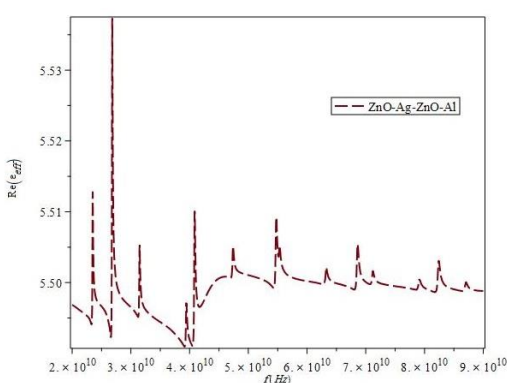


(الف)

شکل ۴: نمودار مقدار حقیقی ثابت گذردهی موثر ترکیب لایه های مرکب از دو لایه عایق متفاوت که به صورت متناوب بین دو لایه از یک نوع رسانا خاص (ترکیب نامتجانس) قرار گرفته، بر حسب فرکانس رسم شده است، سایر اطلاعات مطابق شکل ۱ می باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۵: نمودار مقدار حقیقی ثابت گذردهی موثر ترکیب لایه های مرکب از دو لایه رسانا متفاوت که به صورت متناوب بین دو لایه از یک نوع عایق خاص (ترکیب نامتجانس) قرار گرفته، بر حسب فرکانس رسم شده است، سایر اطلاعات مطابق شکل ۲ می باشد.

تغییرات محیطی وابسته به انتخاب مواد پلاسمونیک و غیر پلاسمونیک به ما می دهد.

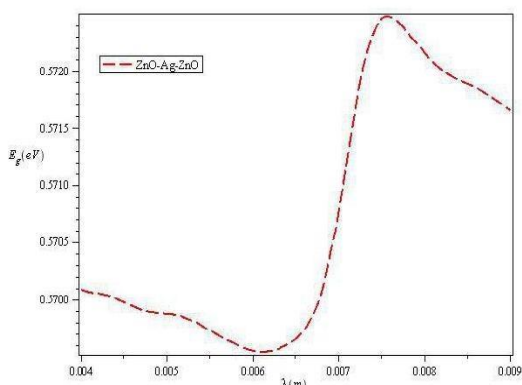
جدول ۱. مقدار عددی ضریب گذر دهی موثر در بازه ۳۵ تا ۴۰ گیگاهرتز.

نوع ترکیب لایه ها	$\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}})$	$\text{Im}(\epsilon_{\text{eff}})$
$\text{ZnO} - \text{Ag} - \text{ZnO} - \text{Ag}$	$\epsilon_{\text{eff}} > 0$	$\epsilon_{\text{eff}} < 0$
$\text{ZnS} - \text{Ag} - \text{ZnS} - \text{Ag}$	$\epsilon_{\text{eff}} > 0$	$\epsilon_{\text{eff}} < 0$
$\text{ZnO} - \text{Al} - \text{ZnO} - \text{Al}$	$\epsilon_{\text{eff}} > 0$	$\epsilon_{\text{eff}} > 0$
$\text{ZnS} - \text{Al} - \text{ZnS} - \text{Al}$	$\epsilon_{\text{eff}} > 0$	$\epsilon_{\text{eff}} > 0$

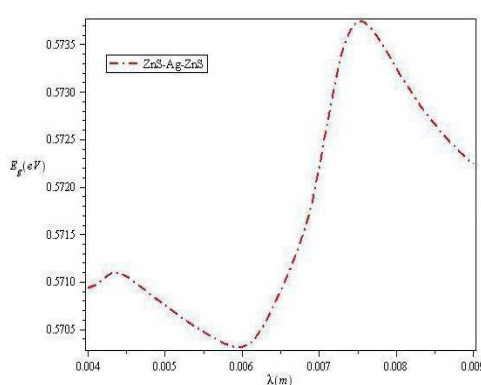
جهت بررسی عددی مقدار گذردهی موثر، در جدول شماره ۱ رفتار ترکیب های متجانس بر حسب مقدار ϵ_{eff} مورد بررسی قرار گرفته است. از نقطه نظر انتخاب ترکیبات مواد پلاسمونی، پراکندگی قسمت حقیقی پلاسمون و غیر پلاسمون نقش مهمی را در پاسخ به طول موج با تغییر ضریب شکست محیط بازی می کند. زمانی که قسمت حقیقی دی الکتریک تابعی از مواد پلاسمونی Al و Ag باشد، به طور کلی دارای یک سهم غالب در پراکندگی اپتیکی و جذب می باشد. زمانی که قسمت حقیقی منحنی های دی الکتریک و فلز یک تغییر اندک را با افزایش غلظت رسانا نشان می دهد، قسمت موهومی کاهش را با افزایش رسانا از خود نشان می دهد. انتظار می رود که با افزایش پراکندگی نسبی میزان جذب در رسانا ها افزایش یابد. به طور مشابه می توان برای پهنای قله SPR بحث مشابهی را انجام داد، که این بحث یک راهنمایی در مورد چگونگی پاسخ SPR به

رسانندگی آن‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود، اندازه نانو ذرات نیز باعث تغییر پیک مقدار انرژی می‌گردد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای ترکیب های ۴ لایه ای، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان حضور نانو ذرات پلاسمونی در ترکیب ها، گاف انرژی به میزان قابل‌ملاحظه ای کاهش پیدا کرده و این خاصیت باعث بهبود رسانندگی و کاربرد وسیع‌تر مدارهای مجتمع تولیدی می‌گردد. با توجه به اینکه نمودار ها برحسب طول‌موج رسم شده‌اند، اغلب ترکیب‌ها در بازه فرکانسی گیگاهرتز دارای پیک انرژی بوده و لذا با خواص اپتیکی، به‌خصوص ضریب گذردهی و ضریب شکست مؤثر همخوانی بالایی دارد.

با توجه به اینکه میزان انرژی مصرفی از اهمیت بالایی در ساخت تجهیزات الکترونیکی برخوردار می باشد. در بخش آخر این مقاله به بررسی مقدار گاف انرژی و نمودارهای مربوط به آن بر حسب طول موج پرداخته می شود. در نمودار های شکل های ۶ تا ۸ گاف انرژی بر حسب طول موج ترکیب‌های اشاره شده در بخش های قبلی رسم شده است. در شکل ۹ جهت درک بهتر تاثیرات افزایش لایه‌های پلاسمونی و غیر پلاسمونی، نمودار گاف انرژی مربوط به ترکیب متشکل از سه لایه رسم شده است. با مقایسه میان این دو دسته نمودار (شکل ۷)، مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد لایه‌های مواد پلاسمونی، میزان گاف انرژی به شدت کاهش پیدا کرده و خاصیت

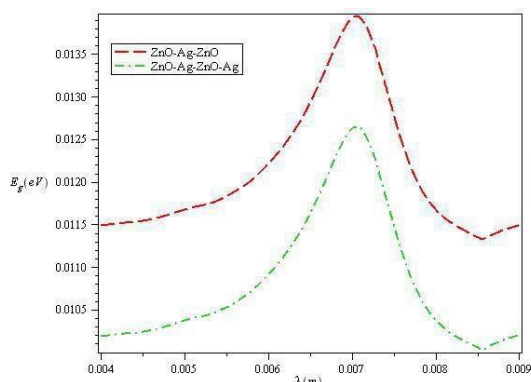


(ب)

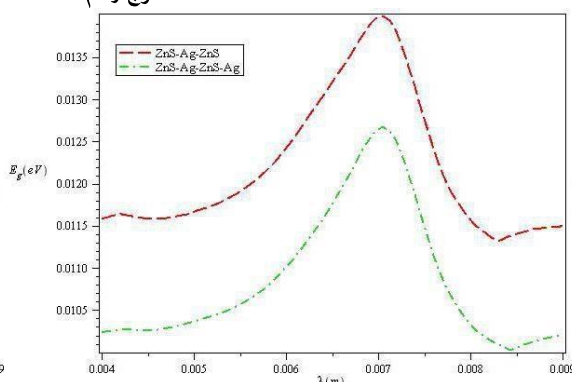


(الف)

شکل ۶: نمودار گاف انرژی ترکیب لایه های مرکب از دو لایه عایق یکسان که به صورت متناوب بین یک لایه رسانا از جنس Ag قرار گرفته، بر حسب طول موج رسم شده است.

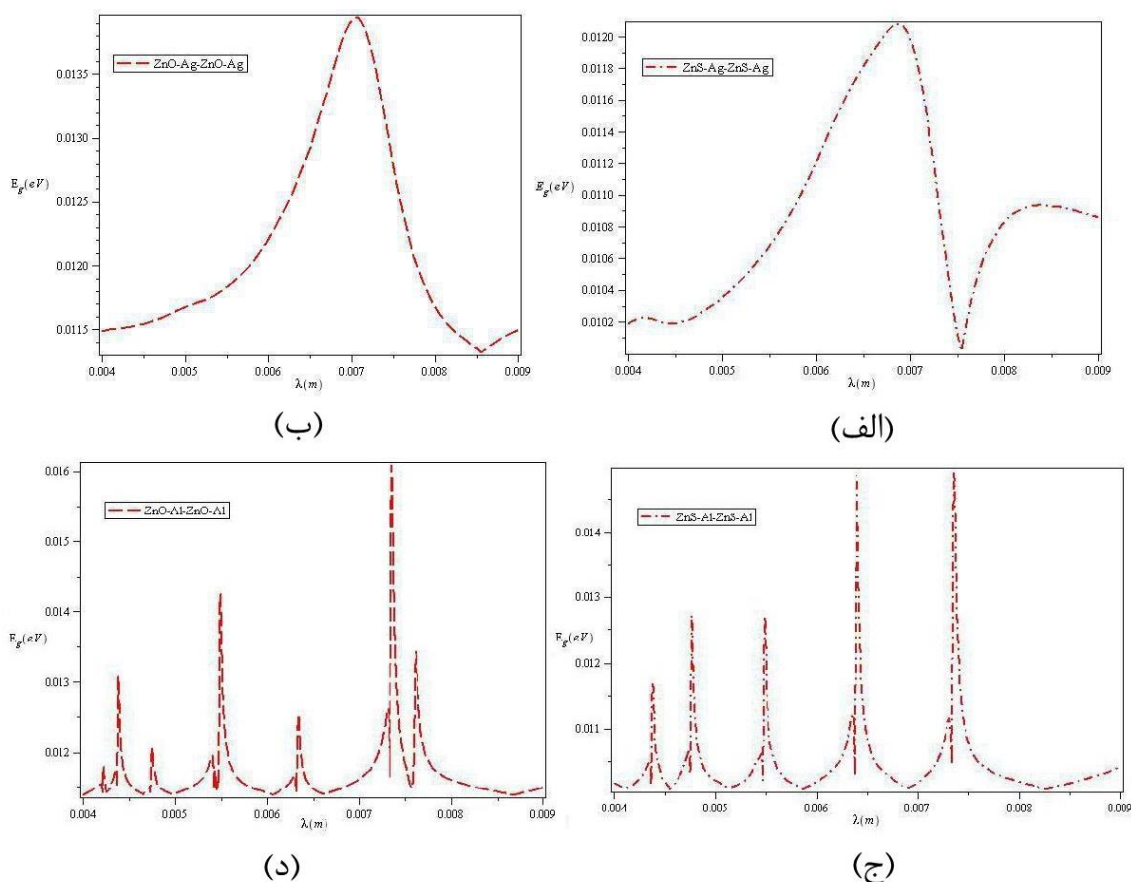


(ب)



(الف)

شکل ۷: مقایسه نمودار گاف انرژی ترکیب لایه های مرکب از سه و چهار لایه ای، بر حسب طول موج رسم شده است.



شکل ۸: نمودار گاف انرژی ترکیب لایه های مرکب از دو لایه عایق یکسان که به صورت متناوب بین دو لایه رسانا از جنس Ag و Al (ترکیب متجانس) قرار گرفته، بر حسب طول موج رسم شده است.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله از دو نوع نانو کره دی الکتریک مختلف ZnO و ZnS با دو رسانای مختلف Ag و Al که به صورت لایه لایه بر روی یکدیگر قرار گرفته و چند مدل ترکیب متجانس و نامتجانس از نحوه چیدمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهد که تغییرات ثابت گذردهی موثر به شدت وابسته به تغییر ابعاد نانو کره های پلاسمونی می باشد. اما تغییر نانو ذرات غیر پلاسمونی و همچنین جنس آن ها دارای تغییرات کمتری در محاسبات است. نتایج شبیه سازی خاصیت خازنی، القاگری و مقاومتی را به خوبی نشان می دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، همخوانی های مورد انتظار در خاصیت تولید شده توسط لایه های ساخته شده مشهود می باشد. نتایج به دست آمده نشان دهنده قابلیت بالا این گونه ترکیب ها در بروز خواص عناصر الکترونیکی می باشد. وقتی خواص اپتیکی این ترکیب ها در بازه مشخصی از فرکانس، بررسی و مقادیر حقیقی و موهومی پارامترها به دست آید. می توان با توجه به مقادیر

حاصل شده، تنها با تغییر فرکانس، مدار مجتمع تولید شده دارای خاصیت متفاوتی خواهد شد. به عبارتی، با ساخت یک مدار می توان کاربردهای متفاوتی از آن داشت که این موضوع باعث اهمیت این نوع ساختارها می شود. همچنین اندازه گیری گاف انرژی نیز یکی از پارامترهای مهم در شناسایی خواص مواد و ترکیبات می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در این مقاله، استفاده از نانو مواد پلاسمونی، باعث بهبود سرعت انتقال اطلاعات و همچنین کوچک شدن ابعاد مدارهای مجتمع در ساخت قطعات الکترونیکی می گردد.

۵. منابع

- [1] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. B. Baker-Jarvis, and P. Kabos, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 51, 2596, (2003).
- [2] L. Lewin, Proc. Inst. Elec. Eng. Part 3, 94, 65, (1947).
- [3] W. Knoll, Annu. Rev. Phys. Chem., 49, 569, (1998).
- [4] E. Ozbay, Science, 311, 189, (2006).
- [5] J. Homola, Chem. Rev., 108, 462, (2008).



- [13] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and A. J. Stewart, IEEE Trans. Microwave TheoryTech. 47, 2075, (1999).
- [14] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, Science 292, 77, (2001).
- [15] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P. C. Kremer, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 50, 2702, (2002).
- [16] H. Sadeghi, H. Khalili and M. Goodarz, CHIN. PHYS. LETT., 29, 096201, (2012).
- [17] H. Sadeghi and et al, Plasmonics, 9, 415–425, (2014).
- [18] Y. H. Yu and et al, Journal of the Korean Physical Society, 42, 682-685, (2003).
- [6] B. P. Nelson, A. G. Frutos, J. M. Brockman, R. M. Corn, Anal. Chem., 71, 3928, (1999).
- [7] A. W. Wark, H. J. Lee, R. M. Corn, Anal. Chem. 77, 3904, (2005).
- [8] U. Kreibig, M. Vollmer, Optical Properties of Metal Clusters. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (1995).
- [9] N. Engheta, A. Salandrino and A. Alu, PRL, 95, 095504, (2005)
- [10] A. K. Sarychev, D. A. Genov, A. Wei, and V. M. Shalaev, Beyond Linear Isotropic Dielectrics Vol. 5218, 81– 92, (2003).
- [11] V. G. Veselago, Sov. Phys. Usp. 10, 509, (1968).
- [12] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, Phys. Rev. Lett. 76, 4773, (1996).