مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۳، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۲

بررسی اثر فاصلهٔ برهم‌کنشی ذرات نانو فلزی در خواص غیرخطی ترکیب اکسید شیشه‌ها با ذرات نانو فلزی با استفاده از روش SPFT

فاطمه ناصری[۱] و حسین شاه‌میرزایی[۲]

۱. گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، فارس
۲. مرکز تحقیقات هوا و دریا، شیراز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۱۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۲/۸/۲۵)

چکیده

نوعی از مواد مرکب وجود دارند که از ترکیب نانوذرات فلزات نجیب، مانند طلا، نقره، مس، با یک مادهٔ دی الکتریک، مانند سیلیکا، تشکیل شده‌اند که این ترکیبات خواص منحصر به فردی دارند و کاندیدای مناسبی برای سیستم‌های اپتیکی می‌باشند. در این مقاله با استفاده از روش نظریهٔ گذردهی نوسانات قوی، ضریب گذردهی مؤثر و ضریب پذیرفتاری مؤثر برای ترکیب شیشه با ذرات نانوی فلزی محاسبه می‌گردد، که در آن ذرات نانو کروی شکل می‌باشند. ضریب گذردهی مؤثر و ضریب پذیرفتاری مؤثر برای نمونه مواد کامپوزیت همگن شده محاسبه می‌شود و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش و مدل‌های دیگر مقایسه می‌گردد و ملاحظه می‌شود که داده‌های به دست آمده برای تخمین مرتبهٔ صفرم تطابق مناسب با نتایج آزمایش ندارد ولیکن با داشتن فاصله برهم‌کنشی مناسب برای تخمین مرتبه دوم و سوم در روش گذردهی نوسانات قوی به ویژه در تخمین مرتبه دوم می‌توان به تطابق مناسب رسید. با توجه به تطابق بسیار مناسب روش گذردهی نوسانات قوی با نتایج آزمایش نسبت به مدل‌های دیگر می‌توان نتیجه گرفت که روش گذردهی نوسانات قوی برای محاسبه ضرایب اپتیک خطی و غیر خطی محیط‌های مرکب مدل بهتری نسبت به مدل‌های دیگر است.

واژه‌های کلیدی: نانو کامپوزیت، ضریب پذیرفتاری مؤثر، نظریهٔ نوسانات قوی، محیط مرکب

۱. مقدمه

خواص دی الکتریک مؤثر برای یک نمونه محیط مرکب همگن (HCM) می‌تواند به کمک نظریهٔ گذردهی نوسانات قوی[۱] تخمین زده شود [۱]. در مقایسه با روش‌های مرسوم‌تر برای محیط‌های مرکب که به طور مثال می‌توان به فرمول‌بندی ماکسول گارنت و همچنین فرمول‌بندی براگمن اشاره کرد [۲-۴]، روش SPFT توصیف جامع‌تری از توزیع آماری فازهای ترکیبی مربوط به محیط مرکب همگن را در خود جای می‌دهد [۵-۶]. باید به این نکته اشاره شود که تقریب مرتبهٔ صفرم SPFT در واقع معادل با فرمول‌بندی همگن براگمن است که در موارد بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که تقریب مرتبهٔ اول SPFT حائز اهمیت نیست به طوری

۱. Strong Permittivity Fluctuation Theory

Archive of SID

www.SID.ir

که این تقریب با تقریب مرتبهٔ صفرم معادل است.

در مقالهٔ حاضر، با استفاده از روش SPFT خواص غیر خطی محیط مرکب متشکل از دو فاز خطی و غیر خطی بررسی می‌شود. هر دو جزء فاز مواد همسانگرد است [۷] و در قالب حوزه‌های الکتریکی کوچک توزیع شده‌اند. از این رو، محیط مرکب همگن (HCM) به عنوان یک مادهٔ غیر خطی همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. پیش بینی SPFT احتمال افزایش خواص غیرخطی برای محیط مرکب است.

باید توجه داشت که مدل‌های غیرشبه استاتیک نیز برای محیط‌های مرکب با ذرات خطی وجود دارند، مانند: مدل ماکسول گارنت و مدل براگمن [۸] و روش تی- ماتریس[۱] [۹] و همچنین دیگر مرتبهٔ بالاتر مانند روش‌های چند قطب [۱۰].

به طور کلی مدل‌هایی مانند: مدل ماکسول گارنت و مدل محیط مؤثر، خواص اپتیکی خطی محیط‌های مرکب را توصیف می‌کنند [۱۱] و مدل‌های که خواص اپتیکی غیرخطی محیط‌های مرکب را تشریح می‌نماید عبارت‌اند از: مدل زنگ، مدل سایپ، مدل استوکمن و مدل تی – ماتریس، که در این مدل‌ها از بر هم‌کنش ذرات صرف نظر گردیده است.

در مدل زنگ خاصیت غیر خطی به صورت یک جملهٔ اختلال فرض شده است [۱۲] و با بسط تابع ضریب دی‌الکتریک، پذیرفتاری محیط مرکب به دست می‌آید. در این مدل بایستی تابع ضریب دی الکتریک خطی محیط مرکب از ابتدا معلوم باشد و دقت آن وابسته به دقت تابع ضریب دی الکتریک خطی محیط مرکب که برای به دست آوردن ضریب پذیرفتاری محیط مرکب استفاده می‌شود.

در مدل تی – ماتریس با حل معادلات ماکسول روابطی برای ضریب دی الکتریک و ضریب پذیرفتاری غیرخطی محیط مرکب به دست آمده است [۱۳]. به وسیله این مدل می‌توان رفتار خطی و غیرخطی محیط مرکب را بررسی نمود و ضریب پذیرفتاری مرتبهٔ سوم و بالاتر محیط مرکب را به دست آورد. این مدل را می‌توان برای ذرات به شکل بیضی گون و ذرات مدرج بسط داد و می‌توان در این مدل بر هم‌کنش بین ذرات را نیز در نظر گرفت و ضریب دی الکتریک و ضریب پذیرفتاری غیر خطی با در نظر گرفتن بر هم‌کنش بین ذرات به دست آورد.

در مدل سایپ و بوید با استفاده از رابطه بین بردار قطبش محیط، p و میدان الکتریکی، E ضریب پذیرفتاری غیر خطی مرتبه سوم محیط مرکب در حالت‌های ذرات میهمان با خاصیت غیرخطی و محیط میزبان با رفتار خطی و ذرات میهمان با خاصیت خطی و محیط میزبان با رفتار غیرخطی به دست آمده است و ضریب پذیرفتاری محیط مرکب در حالتی که میزبان و میهمان هر دو خاصیت غیرخطی دارند، به دست آمده‌اند که نتایج دو حالت با یکدیگر جمع می‌شوند [۱۴].

در مدل استوکمن ضریب پذیرفتاری محیط مرکب در دو حالت جداگانه، ذرات میهمان با خاصیت غیرخطی و محیط میزبان با رفتار خطی و ذرات میهمان با خاصیت خطی و محیط میزبان با رفتار غیرخطی به دست آمده است و برای حالتی که دو مؤلفه خاصیت غیرخطی دارند بحثی صورت نگرفته است [۱۵].

در جدول ۲ مقایسه ضریب پذیرفتاری مرتبه سوم حاصل از روش SPFT (برای تخمین مرتبهٔ صفرم) با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های مختلف آورده شده است.

۲. مروری بر روش نظری SPFT

در پیاده سازی روش SPFT یک محیط مرکب همگن دو فازی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۶]، محیط مرکب شامل دو مؤلفه فازی است، که با a و b نمایش داده می‌شود. فاز a، یک محیط دی الکتریک همسانگرد با گذر دهی نسبی زیر است:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^l + \chi_a \left|\underline{\mathrm{E}_a}\right|^2, \qquad (۱)$$

که در آن ε_a^l گذر دهی خطی نسبی، χ_a ضریب پذیرفتاری غیر خطی مرتبهٔ سوم و $\underline{\mathrm{E}_a}$ میدان الکتریکی القاء شده درون کره از فاز a می‌باشد که به وسیله یک میدان الکتریکی که به محیط مرکب اعمال می‌شود، ایجاد می‌گردد.

فرض می‌شود مقدار قسمت غیر خطی خیلی کوچک است یعنی $\varepsilon_a^l \gg \chi_a \left|\underline{\mathrm{E}_a}\right|^2$. یک محیط دی الکتریک خطی نیز با گذردهی ε_b برای فاز b انتخاب شده است.

کسر حجمی نسبی برای دو فاز a و b با f_a و f_b نمایش

۱. T-matrix

Archive of SID

www.SID.ir

داده می‌شود، که همواره $f_a + f_b = 1$ است. در تخمین مرتبهٔ صفرم، ضریب گذردهی مؤثر تخمین مرتبهٔ صفرم، $\varepsilon_{eFF}^{(0)}$ برای محیط مرکب به صورت زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$\varepsilon_{eFF}^{(0)} = \frac{f_a\varepsilon_a^l(\varepsilon_b + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}) + f_a\varepsilon_a(\varepsilon_a^l + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)})}{f_a(\varepsilon_b + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}) + f_b(\varepsilon_a^l + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)})}, \qquad (۲)$$

به طور کلی می‌توان گفت که در تخمین مرتبهٔ صفرم و مرتبهٔ اول SPFT این گونه عمل می‌شود که با حذف جملات عمومی معین در تقریب SPFT برای گذردهی مؤثر محیط مرکب همگن، همان نتیجه‌ای را می‌دهد که برای SPFT مرتبهٔ صفرم به دست می‌آید. یعنی داریم $\varepsilon_{eFF}^{(0)} = \varepsilon_{eFF}^{(1)}$ از طرفی $\varepsilon_{eFF}^{(0)}$ برابر با مقدار تخمین زده شده برای گذردهی محیط مرکب همگن است که با روش براگمن به دست می‌آید [۱۷]. ضریب پذیرفتاری مؤثر تخمین مرتبهٔ صفرم ($\chi_{eFF}^{(0)}$) در روش SPFT برای محیط مرکب به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\chi_{eFF}^{(0)} = g\chi_a \times \frac{f_a\varepsilon_{eFF}^{(0)}(\varepsilon_b + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)})}{f_a\varepsilon_a^{(l)}(\varepsilon_b + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)})^2 + f_b\varepsilon_b(\varepsilon_a^l + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)})^2}, \qquad (۳)$$

که در آن

$$g = \frac{d\left|\underline{\mathrm{E}}_a\right|^2}{d\left|\underline{\mathrm{E}}_{HCM}\right|^2} \qquad (۴)$$

در معادلهٔ (۳)، $\chi_{eff}^{(0)}$ ضریب پذیرفتاری مؤثر تخمین مرتبهٔ صفرم است، g نیز به عنوان فاکتور میدان موضعی است، و $\underline{\mathrm{E}}_{HCM}$ میدان الکتریکی اعمالی در محیط مرکب همگن است [۱۶].

بیشترین و مرسوم‌ترین موارد استفاده از SPFT، استفاده از تخمین مرتبهٔ دوم SPFT است که البته تحت عنوان تقریب دو موضعی SPFT نیز شناخته شده است، که در آن L به عنوان طول همبستگی در نظرگرفته شده است. در روش SPFT در تقریب دو موضعی همبستگی دو ذرهٔ مجاور با فاصلهٔ برهم‌کنش L با یک تابع کواریانس، مطابقت دارد. ضریب گذردهی مؤثر و ضریب پذیرفتاری مؤثر برای تقریب مرتبهٔ دوم به صورت زیر به دست می‌آید [۱۸]

$$\varepsilon_{eFF}^{(2-0)l} = (k_aL)(\varepsilon_{eFF}^{(0)l})^2(3 + i2k_0L\sqrt{\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) \times \left[f_a(\frac{\varepsilon_a^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}})^2 + f_b(\frac{\varepsilon_b^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_b^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}})^2 \right], \qquad (۵)$$

و

$$\chi_{eFF}^{(2-0)} = (k_0L)^2\left\{2(\chi_{eFF}^{(2)l})^2(3 + i2k_0L\sqrt{\chi_{eFF}^{(0)l}}) \times \left[f_a(\frac{\varepsilon_a^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}})^2 \times (\frac{g\chi_a - \chi_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}} - \frac{\chi_a - 2\chi_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) + f_b(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_b - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}})^2(\frac{-\chi_{eFF}^{(0)}}{\varepsilon_b - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}} - \frac{2\chi_{eFF}^{(0)}}{\varepsilon_a^l + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) \right] + \varepsilon_{eFF}^{(0)l}\chi_{eFF}^{(0)}(6 + i5k_0L\sqrt{\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) \times \left[f_a(\frac{\varepsilon_a^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}})^2 + f_b(\frac{\varepsilon_b^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_b^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}})^2 \right] \right\}, \qquad (۶)$$

که در آن $\varepsilon_{eFF}^{(2-0)}$ ضریب گذردهی مؤثر تخمین مرتبهٔ دوم محیط مرکب و $\chi_{eFF}^{(2-0)}$ ضریب پذیرفتاری مؤثر تخمین مرتبهٔ دوم محیط مرکب و k_0 عدد موج در خلاء می‌باشد [۱۶]. در تخمین مرتبهٔ سوم ضریب گذردهی مؤثر و ضریب پذیرفتاری مؤثر محیط مرکب همانند تخمین مرتبهٔ دوم روش SPFT به دست می‌آید، که $\varepsilon_{eFF}^{(3-2)l}$ ضریب گذردهی مؤثر تخمین مرتبهٔ سوم می‌باشد و $\chi_{eFF}^{(3-2)}$ نیز ضریب پذیرفتاری مؤثر برای تخمین مرتبهٔ سوم است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]

$$\varepsilon_{eFF}^{(3-2)l} = \frac{2}{3}(\frac{1}{f_a} - \frac{1}{f_b})(k_0L)^2(\varepsilon_{eFF}^{(0)l})^2 \times (3 + i2k_0L\sqrt{\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) \times \left[f_a^3(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_{eFF}^{(0)}}{\varepsilon_a - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}})^3 - f_b^3(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{eFF}^{(0)}}{\varepsilon_b - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}})^3 \right], \qquad (۷)$$

و

$$\chi_{eFF}^{(3-2)} = 2(k_0L)^2(\frac{1}{f_a} - \frac{1}{f_b}) \times \left\{(\varepsilon_{eFF}^{(0)l})^2(3 + i2k_0L\sqrt{\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) \times \left[f_a^3(\frac{\varepsilon_a^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}})^3(\frac{g\chi_a - \chi_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}} - \frac{\chi_a^l - 2\chi_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}}) - f_b^3(\frac{\varepsilon_b^l - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_b^l + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}})^3 \times (\frac{-\chi_{eFF}^{(0)}}{\varepsilon_b - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}} - \frac{2\chi_{eFF}^{(0)}}{\varepsilon_b^l - 2\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}) \right] + \varepsilon_{eFF}^{(0)l}\chi_{eFF}^{(0)}(2 + \frac{i5k_0L\sqrt{\varepsilon_{eFF}^{(0)l}}}{3}) \times \left[f_a^3(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}})^3 - f_b^3(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{eFF}^{(0)l}}{\varepsilon b + 2\varepsilon_{eFF}^{(0)}})^3 \right] \right\}. \qquad (۸)$$

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. مقایسهٔ ضریب پذیرفتاری مؤثر غیر خطی مرتبهٔ صفرم ، دوم و سوم حاصل از روش SPFT و نتایج به دست آمده آزمایشگاهی.

ترکیب	λ (nm)	f_a کسرحجمی نانو ذرات	$\chi^{(0)}$ (esu) SPFT (تخمین مرتبهٔ صفرم)	$\chi^{(2-0)}$ (esu) SPFT (تخمین مرتبهٔ دوم)	$\chi^{(3-2)}$ (esu) SPFT (تخمین مرتبهٔ سوم)	$\chi^{(3)}$ (esu) آزمایش
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۰۸	$\mathrm{Im}\,\chi^{(0)} = -0{/}21\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(2-0)} = -0{/}51\times10^{-7}$ $L = 0{/}32\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3-2)} = -0{/}51\times10^{-7}$ $L = 0{/}26\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{/}5\times10^{-7}$ [۲۳]
سیلیکا و مس	۵۳۲	۰٫۶۰	$0{/}60\times10^{-9}$	2×10^{-9} $L = 1{/}6\times10^{-9}$	$2{/}25\times10^{-9}$ $L = 2{/}5\times10^{-9}$	2×10^{-9} [۲۳]
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۲۳	$\mathrm{Im}\,\chi^{(0)} = -0{/}85\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(2-0)} = 0{/}31\times10^{-7}$ $L = 0{/}36\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3-2)} = -0{/}30\times10^{-7}$ $L = 0{/}59\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = 0{/}3\times10^{-7}$ [۲۵]
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۰۸	$0{/}47\times10^{-7}$	$1{/}21\times10^{-7}$ $L = 0{/}32\times10^{-7}$	$0{/}63\times10^{-7}$ $L = 0{/}26\times10^{-7}$	$1{/}38\times10^{-7}$ [۲۶]
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۲۰	$0{/}10\times10^{-7}$	$2{/}20\times10^{-7}$ $L = 0{/}73\times10^{-7}$	$2{/}02\times10^{-7}$ $L = 1{/}06\times10^{-7}$	$2{/}2\times10^{-7}$ [۲۷]

۳. نتایج عددی

در روش SPFT که ضریب گذردهی مؤثر برای تخمین مرتبهٔ دوم و سوم و ضریب پذیرفتاری مؤثر برای تخمین مرتبهٔ دوم و سوم به صورت تابعی از پارامترهای f_a و Lk_0 به دست آمد، را برای دو نمونهٔ ترکیبات سیلیکا و طلا، سیلیکا و مس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این ضرایب خطی و غیر خطی شیشهٔ سیلیکا از مرجع [۱۹] و ضرایب خطی نانو ذرات طلا و مس نیز از مرجع [۲۰] استخراج شده‌اند و ضرایب غیر خطی نانو ذرات طلا از مرجع [۲۱] و ضریب غیر خطی نانو ذرات مس از مرجع [۲۲] به دست آمده‌اند. تمامی محاسبات در طول موج ۵۳۲ نانومتر انجام شده است، زیرا برای مدلسازی نیاز است خواص خطی و غیرخطی اپتیکی شیشهٔ سیلیکا و ذرات فلزی نانو در طول موج خاص وجود داشته باشد که با توجه به منابع در دسترس این اطلاعات در طول موج ۵۳۲ نانومتر جمع آوری گردیدند، چنانچه این اطلاعات در طول موج‌های دیگر نیز وجود داشته باشد می‌توان این مقایسه را انجام داد.

۴. مقایسهٔ نتایج به دست آمده از روش SPFT با مقادیر آزمایشگاهی و مدل‌های دیگر

همگرایی SPFT غیر خطی مرتبهٔ سوم را با محاسبه $\varepsilon_{eFF}^{(3-2)}$ و $\varepsilon_{eFF}^{(2-0)}$ به صورت تابعی از هر دو پارامتر f_a و L برای سه نمونهٔ عددی معین ترکیبات طلا وسیلیکا، مس و سیلیکا مورد بررسی قرارمی دهیم. به منظور ایجاد امکان مقایسهٔ مستقیم با مقالهٔ [۱۶]، مقادیر زیر را برای پارامترهای ساختاری مؤلفه‌های فازی محیط کامپوزیت همگن انتخاب می‌کنیم. (ε_b ضریب گذردهی برای سیلیکا است و ε_a^l ضریب گذردهی برای نانو ذرهٔ فلزی معیین است.)

ضرایب خطی و غیر خطی برای ترکیبات سیلیکا و طلا:

$$\varepsilon_a^l = -3{/}95 + 2{/}58i\,,$$

$$\chi_a = 1\times10^{-8}(esu)\,.$$

ضرایب خطی و غیر خطی برای ترکیبات سیلیکا و مس:

$$\varepsilon_a^l = -5{/}41 + 6{/}15i\,,$$

$$\chi_a = 0{/}4\times10^{-8}(\mathrm{esu})\,,$$

$$\varepsilon_b = 2{/}13\,.$$

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. مقایسهٔ ضریب پذیرفتاری مؤثر غیر خطی مرتبهٔ سوم حاصل از روش SPFT (تخمین مرتبهٔ صفرم) با آزمایش و مدل‌های دیگر.

ترکیب	λ (nm)	f_a کسرحجمی نانو ذرات	$\chi^{(3)}$ (esu) SPFT (تخمین مرتبهٔ صفرم)	$\chi^{(3)}$ (esu) تی- ماتریس	$\chi^{(3)}$ (esu) سایب و بوید	$\chi^{(3)}$ (esu) زنگ	$\chi^{(3)}$ (esu) استوکمن	$\chi^{(3)}$ (esu) آزمایش
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۰۸	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}21\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}62\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}2\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = 0{,}12\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = 0{,}66\times10^{-8}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}5\times10^{-7}$ [۲۳]
سیلیکا و مس	۵۳۲	۰٫۶۰	$0{,}60\times10^{-9}$	$2{,}35\times10^{-9}$	$0{,}8\times10^{-9}$	$0{,}14\times10^{-7}$	$0{,}32\times10^{-8}$	2×10^{-9} [۲۴]
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۲۳	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}85\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}24\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}8\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = 0{,}15\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}25\times10^{-7}$	$\mathrm{Im}\,\chi^{(3)} = -0{,}3\times10^{-7}$ [۲۵]
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۰۸	$0{,}47\times10^{-7}$	$1{,}02\times10^{-7}$	$0{,}34\times10^{-7}$	$0{,}16\times10^{-7}$	$0{,}14\times10^{-7}$	$1{,}38\times10^{-7}$ [۲۶]
سیلیکا و طلا	۵۳۲	۰٫۲۰	$0{,}10\times10^{-7}$	$-2{,}31\times10^{-7}$	$0{,}77\times10^{-7}$	$0{,}16\times10^{-7}$	$0{,}3\times10^{-7}$	$2{,}2\times10^{-7}$ [۲۷]

تمامی مقادیر به دست آمده و همچنین محاسبات پیش رو در طول موج ۵۳۲ نانومتر هستند.

در جدول ۱ ضریب پذیرفتاری مؤثر غیر خطی مرتبهٔ سوم حاصل از روش SPFT (برای تخمین مرتبهٔ صفرم، دوم و سوم) و نتایجی که به صورت تجربی و آزمایشگاهی برای ترکیبات شیشهٔ سیلیکا و نانو ذرات فلزی طلا و مس به دست آمده است مقایسه شده است [۲۳-۲۷].

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در مقایسهٔ تخمین مرتبهٔ صفرم SPFT با نتایج آزمایش خطا دیده می‌شود. ولی در تخمین مرتبهٔ دوم و سوم با انتخاب فاصله برهم‌کنشی مناسب (L) می‌توان به جواب مناسب رسید و به تطابق مناسب روش SPFT با جواب‌های آزمایشگاهی رسید.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتایج مدل تی - ماتریس با آزمایش بهتر از نتایج مدهای دیگر است، البته این برای زمانی که رفتار محیط میزبان را خطی و رفتار ذرات میهمان غیرخطی در نظر گرفته شود، تطابق خوبی دیده می‌شود. در صورتی که رفتار ذرات میهمان را خطی و رفتار محیط میزبان غیرخطی در نظر گرفته شود اختلاف و مقدار خطای بسیار زیادی در این مدل دیده می‌شود.

در مدل سایپ و بوید نیز خطا دیده می‌شود، دلیلی که برای عدم تطابق مناسب این مدل با نتایج آزمایش می‌توان بیان کرد این است که ضریب پذیرفتاری محیط مرکب در دو حالت جداگانهٔ ذرات میهمان با خواص غیرخطی و محیط میزبان با خواص غیرخطی استخراج شده است و برای حالت ذرات و میزبان هر دو با خواص غیرخطی نتایج دو حالت با یکدیگر جمع شده است [۱۴]. به نظر می‌رسد اگر به طور هم زمان ضریب پذیرفتاری محیط مرکب با در نظرگرفتن خاصیت غیرخطی در ذرات و میزبان به دست می‌آمد، نتایج بهتری حاصل می‌شد. در مدل سایپ و بوید بر خلاف مدل تی - ماتریس نمی‌توان ضریب دی الکتریک خطی محیط مرکب را بررسی نمود و ضریب پذیرفتاری بالاتر از مرتبهٔ سوم نیز به دست نیامده است. در این مدل شکل ذرات فقط کروی در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل سایپ و بوید در حالتی که بین ذرات برهم کنش وجود دارد، هیچ بررسی صورت نگرفته است.

در جدول ۲ نتایج مدل زنگ و محیط مؤثر نیز آورده شده

Archive of SID

www.SID.ir

است، عدم تطابق مدل زنگ و آزمایش بسیار زیاد است [۱۲]، که ناشی از روش استخراج ضریب پذیرفتاری (روش اختلال) در این مدل می‌باشد. این مدل علاوه بر محدودیت‌های مدل سایپ و بوید مدل مستقلی نمی‌باشد، و بایستی برای به دست آوردن ضریب پذیرفتاری مرتبهٔ سوم ضریب دی الکتریک خطی محیط مرکب را از یکی از مدل‌های موجود استفاده نمود، و داده‌های این مدل وابسته به مدلی است که ضریب دی الکتریک از آن مدل استفاده شده است. و نیز در همین جدول نتایج مدل استوکمن آورده شده است [۱۵]. عدم تطابق داده‌های این مدل و نتایج آزمایش بسیار زیاد است، که در این مدل رابطه‌ای برای ضریب پذیرفتاری در حالتی که ذرات و میزبان خواص غیرخطی دارند، ارائه نشده است و در دو حالت ارائه شده در این مدل خواص غیرخطی میزبان و خواص غیرخطی ذرات جداگانه در نظر گرفته شده است. علاوه بر عدم تطابق داده‌های این مدل با آزمایش، محدودیت بیان شده برای مدل سایپ و بوید را نیز دارد. نکتهٔ قابل توجه این است که نتایج این مدل در حالتی که خواص غیرخطی ذرات درنظر گرفته شده است، که ناشی از این است که خواص غیرخطی ذرات از خواص غیر خطی میزبان بزرگ‌تر است.

همان‌طور که بیان شد، در نتایج تخمین مرتبهٔ صفرم روش SPFT با نتایج آزمایش نیز خطا دیده می‌شود. چنان که در جدول ۱ مشاهده می‌شود می‌توان در تخمین مرتبهٔ دوم و سوم با انتخاب فاصلهٔ برهم‌کنشی مناسب بدون هیچ خطایی به جواب دلخواه رسید، و به تطابق کامل روش SPFT با جواب‌های آزمایشگاهی دست یافت.

۵. نتیجه‌گیری

با استفاده از روش SPFT ضریب دی الکتریک مؤثر و ضریب پذیرفتاری مؤثر محیط مرکب شیشه و نانو ذرات میهمان کروی شکل در حالتی که میزبان دارای خواص اپتیکی خطی و ذرات میهمان دارای خواص اپتیکی غیرخطی‌اند، برای تخمین مرتبهٔ صفرم، دوم و سوم محاسبه شد و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش مطابقت داده شد. ملاحظه می‌شود که زمانی که داده‌های به دست آمده برای تخمین مرتبهٔ صفرم تطابق دلخواه را با نتایج آزمایش ندارد و مشخص شد که می‌توان با وارد کردن فاصلهٔ برهم‌کنشی مناسب برای تخمین مرتبهٔ دوم و سوم در روش SPFT (خصوصاً در تخمین مرتبهٔ دوم، به تطابق مناسب بین نتایج روش SPFT و آزمایش می‌رسید.

نتایج مدل زنگ (زنگ و نظریهٔ محیط مؤثر)، مدل سایپ- بوید و استوکمن و تی- ماتریس، در حالت ذرات میهمان با خواص غیرخطی و محیط میزبان با خواص خطی، با نتایج آزمایش مقایسه شده و ملاحظه شد که نتایج مدل سایپ- بوید و خصوصاً مدل تی- ماتریس نسبت به سایر مدل‌ها؛ یعنی زنگ و استوکمن، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش از خود نشان می‌دهند، اما با توجه به تطابق بهتر روش SPFT با نتایج آزمایش می‌توان به این نتیجه رسید که روش SPFT مدل مناسب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها برای محاسبهٔ ضریب گذردهی مؤثر و ضریب پذیرفتاری مؤثر محیط مرکب است، البته با اعمال فاصلهٔ برهم‌کنشی مناسب بین نانو ذرات فلزی میهمان در تخمین مرتبهٔ دوم و سوم. نکتهٔ دیگری که قابل توجه می‌باشد این است که مدل SPFT نسبت به کسر حجمی نانو ذرات محدودیتی ندارد ولی در سایر مدل‌ها کسر حجمی نانوذرات بایستی کمتر از ۰٫۱ باشد.

با توجه به تطابق روش SPFT و نتایج آزمایش می‌توان به این نتیجه رسید که روش SPFT روشی مناسب برای محاسبه خواص غیرخطی است که برای رسیدن به خواص غیرخطی مناسب، علاوه بر کسر حجمی ذرات باید به طول همبستگی بین ذرات نیز توجه داشت.

مراجع

1. L Tsang and J A Kong, *Radio Sci*. **16** (1981) 303.
2. A Lakhtakia, "*Selected Papers on Linear Optical Composite Materials*", SPIE, Bellingham (1996).
3. B Michel, "*Electromagnetic Fields in Unconventional Materials and Structures*", Wiley, New York (2000) 39.

Archive of SID

www.SID.ir

4. A Lakhtakia, *Microwave Opt. Technol. Lett*. **17** (2000) 276.
5. L Tsang, J A Kong, and R T Shin, "*Theory of Microwave Remote Sensing*", Wiley, New York (1985).
6. K Oguso, J Yamasaki, S Maecl, and M Kitao, *Optics Letters* **29** (2004) 265.
7. P D Maker and R W Terhune, *Phys. Rev*. A **137** (1965) 801.
8. M T Prinkey, A Lakhtakia, and B Shanker, *Optik* **96** (1994) 25.
9. Y Ma, V V Varadan, and V K Varadan, *Appl. Opt*. **27** (1988) 2469.
10. A K Sarychev and V M Shalaev, *Phys. Rept*. **333** (2000) 275.
11. J C Garland and D B Tanner, "*Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media*", Amercan Institute of Physics (1977).
12. Z L Zeng *et al*., *J. At. Mol. Sci*. **1**, 2 (2010) 177.
13. G Gubernatis, "*Electrical Transport and Optical Propertises of Inhomogeneous Media*", American Physical Society, Columbus, Ohio (1977).
14. J E Sipe and R W Boyd, "*Optical Properties of Nanostructured Random Media*" Topics in Applied Physics, Springer **82** (2002) 1.
15. L N Gaier and M I Stockman, *J. Phys*. B: *At. Mol. Opt. Phys*. **37** (2004) 57.
16. A Lakhtakia, *Opt. Commun*. **192** (2001) 145.
17. B Michel and A Lakhtakia, *Phys. Rev*. E **51** (1995) 5701.
18. T G Mackay, A Lakhtakia, and W Weiglhofer, *Opt. Commun*. **204** (2002) 219.
19. H Kobayashi, H Kanbara, M Koga, and K Kubodera, *J. Appl. Phys*. **74** (1993) 3683.
20. P B Johnson and R W Christy, *Phys. Rev*. B **6** (1972) 4370.
21. D D Smith, Y Yoon, RW Boyd, J K Campbell, L A Baker, R M Crooks, and M George, *J. Appl. Phys*. **86** (1999) 6200.
22. Y Takeda, V T Gritsyna, N Umeda, C G Lee, and N Kishimoto, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*. B **148** (1999) 1029.
23. N Pincon-Roetzinger, D Prot, E Charron, and S Debrus, *Mater. Sci. Engin*. C **19** (2002) 51.
24. Y Takeda, V T Gritsyna, N Umeda, C G Lee, and N Kishimoto, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*. B **148** (1999) 1029.
25. N Pincon, B Palpant, D Prot, E Charron, and S Debrus, *Eur. Phys. J*. D **19** (2002) 395.
26. A I Ryasnyanskiy, B Palpant, S Debrus, U Pal, and A Stepanov, *J. Luminescence* **127** (2007) 181.
27. H B Liao, L F Xiao, J S Fu, P Yu, G K L Wong, and P Sheng, *Appl. Phys. Lett*. **70** (1997) 1.

Archive of SID

www.SID.ir

Iranian Journal of Physics Research, Vol. 13, No. 4, 2014

Effect of correlation length between metallic nanoparticles in nonlinear properties of composition of oxide glass and metallic nanoparticles using SPFT

F Naseri [1] and H Shahmirzaee[2]

1. Department of Physics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Fars, Iran
2. Air Ocean Research Center, Shiraz, Iran

(Received 3 January 2013 ; in final form 16 November 2013)

Abstract

There is a kind of composite materials made up of noble metal nanoparticles (such as gold, silver, copper) and a dielectric material (such as silica) with unique properties. In this paper, using Strong Permittivity Fluctuation Theory (SPFT**)** method, the coefficient of effective permittivity and the effective susceptibility coefficient are calculated for combining glass with metal nanoparticles, assuming that the nanoparticles are spherical. Coefficient of effective permittivity and the effective susceptibility index are estimated for the sample of homogeneous composite materials. And the results of this study are compared with experimental results and other models. It is observed that the data obtained for the zero-order estimate do not match the experimental results. By appropriate correlation length for the second- and third-order, specially for the second-order estimate of SPFT method, conformity between results can be established. Therefore, it can be concluded that SPFT method is betler than other models for calculating and improving the properties of the non-linear model.

Keywords: nano composite, effective susceptibility coefficient, strong permittivity fluctuation

Archive of SID

For full article, refer to the Persian section

www.SID.ir