

«مقاله پژوهشی»

بررسی اثر اندازه نانوذرات فلزی بر افزایش خواص اپتیکی شیشه‌ها به روش تی - ماتریس

حسین شاهمیرزایی¹، عبدالرسول قرائتی²، عبدالرضا کمال دار^{3*}

1. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران

2. استاد، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

3. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1401/05/12 تاریخ پذیرش: 1401/06/31

Investigating the Effect of the Size of Metal Nanoparticles on Increasing the Optical Properties of Glasses Using the T-Matrix Method

H. Shahmirzaee¹, A. Gharaati², A. Kamaldar^{3*}

1. Associate Professor, Department of Physics, Malek Ashtar University of Technology, Shiraz, Iran

2. Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

3. Ph.D. Student, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2022/08/03

Accepted: 2022/09/22

Abstract

The aim of this research is to present a method to investigate the effect of the size of metal nanoparticles of gold, silver and copper on the optical properties of glasses. In this way, spherical nanoparticles with a volume fraction less than 0.1 (in order to ignore the interaction between them) are distributed in the glasses, and using the T-matrix method, their effective dielectric coefficient is determined as a function of size (radius) of nanoparticles and their volume fraction are obtained at different wavelengths and it is found that the effective dielectric coefficient of the composite medium increases dramatically with the increase in the radius of nanoparticles, especially when the volume fraction of nanoparticles is also higher. At the wavelength of 1020 nm, copper nanoparticles inside chalcogenide glass have the highest dielectric coefficient. At the end, the relevant diagrams are drawn.

Keywords

Metal Nanoparticles, Effective Dielectric Coefficient, T-Matrix

چکیده

هدف از این پژوهش ارائه روشی برای بررسی اثر سایز نانوذرات فلزی طلا، نقره و مس بر خواص اپتیکی شیشه‌ها است. بدین ترتیب که نانوذرات کروی با کسر حجمی کمتر از 0/1 (به منظور چشم‌پوشی از برهم کنش بین آنها) در شیشه‌ها توزیع می‌شوند و با استفاده از روش تی - ماتریس ضریب دی‌الکتریک مؤثر آنها به صورت تابعی از اندازه (شعاع) نانوذرات و کسر حجمی آنها در طول موج‌های مختلفی به دست می‌آید و مشخص می‌گردد که ضریب دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب با افزایش شعاع نانوذرات به طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به ویژه زمانی که کسر حجمی نانوذرات نیز زیادت‌تر باشد. در طول موج 1020 نانومتر نانوذرات مس درون شیشه چلکوژناید بیشترین ضریب دی‌الکتریک را دارند. در پایان نیز نمودارهای مربوط رسم می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

نانوذرات فلزی، ضریب دی‌الکتریک مؤثر، تی - ماتریس

*Corresponding Author: Akamaldar@student.pnu.ac.ir

* نویسنده مسئول: معبدالرضا کمال دار

مقدمه

فرض می‌شود که تقریب شبه استاتیک برقرار است؛ یعنی ابعاد خطی ناهمگنی‌ها (مثلاً شعاع نانوذرات) از طول موج تابشی بسیار کوچک‌تر است. برای سادگی ضریب دی‌الکتریک ندره‌ای در نظر گرفته می‌شود. این بحث با استفاده از میدان موضعی و فرکانس پلاسما نیز مورد بررسی قرار گرفته است [10]. به این ترتیب که محیط مرکب شامل شیشه (میزبان) و نانوذرات فلزی (میهمان) است و با داشتن میدان الکتریکی اعمال شده بر محیط مرکب و حل معادلات ماکسول، میدان در داخل محیط مرکب به دست می‌آید.

مدل‌سازی

هدف از این پژوهش ارائه مدلی برای افزایش خواص اپتیکی در اکسید شیشه‌ها با استفاده از نانوذرات فلزی است. روش تی ماتریس برای ترکیبی شامل نانوذرات فلزی (میهمان) درون شیشه سیلیکا (محیط میزبان) تعمیم داده می‌شود؛ بدین گونه که ثابت دی‌الکتریک محیط میزبان $\epsilon(w)$ و میهمان $\epsilon^*(w)$ به ترتیب به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [5-6]،

$$\begin{aligned} \epsilon(w) &= \epsilon_1(w) + \epsilon_2 |E_0|^2 \\ \epsilon^*(w) &= \epsilon^*(w) + \epsilon^* |E|^2 \end{aligned} \quad (1)$$

که ϵ_1 و ϵ_2 به ترتیب قسمت خطی و غیرخطی ثابت دی‌الکتریک محیط میزبان (شیشه سیلیکا یا چلکوجناید) و ϵ^* و ϵ^* به ترتیب قسمت خطی و غیرخطی ثابت دی‌الکتریک نانوذرات میهمان است از طرفی \vec{E}_0 و \vec{E} به ترتیب میدان الکتریکی اعمال شده بر محیط و میدان الکتریکی داخل نانوذرات میهمان است.

با توجه به مدل تی ماتریس [6-9] و کارهایی که قبلاً انجام شده [10-11]، اثر اندازه نانوذرات بر خواص اپتیکی غیرخطی محیط مرکب بررسی می‌شود میدان داخل نانوذرات به صورت زیر است:

$$\vec{E} = \frac{3\epsilon_e}{2\epsilon_e + \bar{\epsilon}_m} \vec{E}_0 \quad (2)$$

در اینجا $\bar{\epsilon}_m$ ثابت دی‌الکتریک اصلاح شده فلز است که به صورت زیر تعریف می‌شود [11]:

$$\bar{\epsilon}_m = \epsilon_m \frac{2F(k_m a)}{1 - F(k_m a)}, \quad F(x) = \frac{1}{x^2} - \frac{\cot x}{x} \quad (3)$$

شیشه‌های چلکوجناید بر اساس عناصر چلکوجن سولفور، سلنیم و تلوریم هستند. این شیشه‌ها با افزودن سایر عناصر مانند ژرمانیم، آرسنیک، آنتیمون، گالیم و... تشکیل می‌شوند. این شیشه‌ها مواد با انرژی پایین فونون (phonon) هستند و عموماً از ناحیه مرئی تا زیرقرمز شفاف هستند [1]. همچنان که آزمایش‌ها نشان داده است [2] شیشه‌های چلکوجناید قابلیت آرایش با ناخالصی‌ها را دارند که توزیع نانوذرات فلزی در شیشه‌های چلکوجناید خواص اپتیکی آنها را افزایش می‌دهد. در شیشه‌های چلکوجناید می‌توان عناصر نادر خاکی مانند اربیم، نئودیم، پراسیدیم و غیره تزریق کرد و برای آنها کاربردهای بسیاری در قطعات اپتیکی پیشنهاد کرد و برای ساخت سویچ‌های اپتیکی خیلی سریع، حسگرها، ردیاب‌ها، فاصله سنج‌ها و... به کار برد که در صنایع اپتیکی، مخابرات، الکترونیک، اپتوالکترونیک، مکترونیک، نظامی و... استفاده‌های زیادی دارند [3].

تاریخچه

تئوری یا تقریب ماکسول-گارت [4-5] اولین روش متداول برای بررسی رفتار خطی اپتیکی محیط مرکب است. این تقریب برای محیط‌هایی که یک مؤلفه نقش میزبان و مؤلفه دیگر نقش میهمان را بازی می‌کند، بسیار مناسب است. برای به دست آوردن معادلات تئوری ماکسول-گارت چندین روش وجود دارد. یکی از آنها استفاده از روش میدان موضعی است که با آن معادلات تئوری ماکسول گارت استخراج می‌شوند. در سال 1988 اگرال و گوپتا [6] و دیگران [7-8] یک محیط مرکب (شامل نانوذرات فلزی در شیشه) در نظر گرفتند که ϵ_1, ϵ_2 به ترتیب قسمت خطی و غیرخطی ثابت دی‌الکتریک نانوذرات فلزی است که با کسر حجمی f به صورت تصادفی در محیط میزبان با ضریب دی‌الکتریک ϵ_0 توزیع شده بود. میدان الکتریکی اعمالی \vec{E}_0 بر محیط مرکب در جهت محور z بود. میدان الکتریکی در داخل ذره با \vec{E} نشان داده می‌شد و شکل نانوذرات کروی در نظر گرفته می‌شد. با استفاده از نتایج حل معادلات ماکسول و با استفاده از شرایط مرزی مناسب، میدان الکتریکی در داخل ذره کروی مشخص می‌گردید. یکی از بهترین روش‌ها روش تی ماتریس است [6 و 9] و

از طرفی محیط میزبان نیز خود خاصیت غیرخطی دارد و ضریب دی‌الکتریک آن به صورت زیر به میدان الکتریکی وابسته است:

$$e_d = e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2 \quad (10)$$

$$(11)$$

$$e_e = (e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2) \frac{(1+2f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2] + 2(1-f)(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2)}{(1-f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2] + (f+2)(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2)}$$

حال چنانچه (7) و (11) در (2) قرار گیرد،

$$(12)$$

$$\dot{\mathbf{E}} = \frac{3(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2) \frac{(1+2f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2] + 2(1-f)(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2)}{(1-f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2] + (f+2)(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2)} \mathbf{r}}{2(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2) \frac{(1+2f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2] + 2(1-f)(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2)}{(1-f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2] + (f+2)(e_{1d} + e_{2d} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2)} + e_{1m} \frac{2F(k_m a)}{1-F(k_m a)} + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2} \mathbf{r} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \dot{\mathbf{E}} &= x \mathbf{r} E_0 - \frac{x[3e_{1d}(1+2f)e_{2m}(G+1)]}{3e_{1d}(1+2f)e_{1m}G + 6e_{1d}^2(1-f)} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2 \mathbf{r} E_0 \\ &- \frac{x[e_{1d}(5f+4)e_{2m}(G+1) + (1-f)(2e_{1m}Ge_{2m})(G+1)]}{3e_{1d}(1+2f)e_{1m}G + 6e_{1d}^2(1-f)} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^2 \mathbf{r} E \\ &- \frac{x(1-f)e_{2m}^2(G+1)^2}{3e_{1d}(1+2f)e_{1m}G + 6e_{1d}^2(1-f)} \left| \frac{\mathbf{r}}{E_0} \right|^4 \mathbf{r} E \end{aligned} \quad (14)$$

$$x = \frac{3e_{1d}(1+2f)e_{1m}G + 6e_{1d}^2(1-f)}{e_{1d}(5f+4)e_{1m}G + (1-f)(4e_{1d}^2 + e_{1m}^2G^2)}$$

حال با محاسبه $(\mathbf{r} \dot{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{r} \dot{\mathbf{E}}^*)$ و $\left| \frac{\mathbf{r}}{E} \right|^4$ و صرف

نظر از مراتب بیشتر از 5 میدان الکتریکی می‌توان نوشت:

در اینجا e_m ثابت دی‌الکتریک فلز، $k = w/c$ بردار موج فضای آزاد، $k_m = k\sqrt{e_m m_m}$ m_m تراوایی مغناطیسی نانوذرات فلزی و a شعاع نانوذرات و e_e ثابت دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب به صورت زیر است:

$$e_e = e_d \frac{(1+2f)\bar{e}_m + 2(1-f)e_d}{(1-f)\bar{e}_m + (f+2)e_d} \quad (4)$$

f کسر حجمی نانوذرات، e_d ثابت دی‌الکتریک محیط میزبان، (شیشه) و با توجه به اینکه در این پژوهش ثابت دی‌الکتریک نانوذرات فلزی غیرخطی فرض می‌شود، \bar{e}_m در رابطه (3) به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$\bar{e}_m = e_{1m} \frac{2F(k_m a)}{1-F(k_m a)} + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E} \right|^2 \quad (5)$$

با توجه به (3) می‌توان نوشت:

$$F(k_m a) = \frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a} \quad (6)$$

$$(7)$$

$$\bar{e}_m = e_{1m} \frac{2\left[\frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a}\right]}{1 - \left[\frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a}\right]} + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E} \right|^2$$

از آنجا که جمله اول (قسمت کسری) در (7) مستقل از میدان الکتریکی است، می‌توان با تغییر متغیری به صورت زیر آن را خلاصه نوشت:

$$\bar{e}_m = e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E} \right|^2,$$

$$G = \frac{2\left[\frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a}\right]}{1 - \left[\frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a}\right]} \quad (8)$$

$$G = \frac{2\left[\frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a}\right]}{1 - \left[\frac{1}{(k_m a)^2} - \frac{\cot(k_m a)}{k_m a}\right]}$$

با جایگذاری می‌توان نوشت:

$$(9)$$

$$e_e = e_d \frac{(1+2f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E} \right|^2] + 2(1-f)e_d}{(1-f)[e_{1m}G + e_{2m} \left| \frac{\mathbf{r}}{E} \right|^2] + (f+2)e_d}$$

$$\dot{\mathbf{a}}\mathbf{E}\tilde{\mathbf{n}} = (1 + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}})\mathbf{E}_0 + 4p\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}}|\mathbf{E}_0|^2\mathbf{E}_0 \quad (19)$$

$$+ 4p\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}}|\mathbf{E}_0|^4\mathbf{E}_0$$

$$\dot{\mathbf{a}}\mathbf{D}\tilde{\mathbf{n}} = [\mathbf{e}_{1d}(1 + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}}) + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}}]\mathbf{E}_0$$

$$+ 4p(\mathbf{e}_{1d}\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}} + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}})|\mathbf{E}_0|^2\mathbf{E}_0 \quad (20)$$

$$+ 4p(\mathbf{e}_{1d}\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}} + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}})|\mathbf{E}_0|^4\mathbf{E}_0$$

از میانگین (18) و هم ارز قرار دادن آن با جملات هم مرتبه (19) نتیجه می شود:

$$1 + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}} = x$$

$$4p\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}} = x(a - bx)|x|^2$$

$$4p\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}} = x[(a - bx)(a^* - b^*x^* + a - bx) - xg]|x|^4 \quad (21)$$

و از میانگین $\dot{\mathbf{D}}$ و هم ارز قرار دادن جملات آن با جملات هم مرتبه (20) می توان نتیجه گرفت:

$$\mathbf{e}_{1d}(1 + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}}) + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}}$$

$$= \mathbf{e}_{1m}Gx + 4p(\mathbf{e}_{1d}\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}} + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}}) = [\mathbf{e}_{1m}(a - bx)G$$

$$+ \mathbf{e}_{2m}(G + 1)]x|x|^2 + 4p(\mathbf{e}_{1d}\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}} + \dot{\mathbf{a}}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}}) = \{\mathbf{e}_{1m}G[x(a - bx)$$

$$+ (a^* - b^*x^* + a - bx) - x^2g] + \mathbf{e}_{2m}(G + 1)$$

$$+ x(a - bx)\}|x|^4 \quad (22)$$

معادلات (21) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(1)}\tilde{\mathbf{n}} = x - 1$$

$$\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(3)}\tilde{\mathbf{n}} = \frac{1}{4p}x(a - bx)|x|^2$$

$$\dot{\mathbf{a}}\mathbf{G}\mathbf{T}^{(5)}\tilde{\mathbf{n}} = \frac{1}{4p}x[(a - bx)(a^* - b^*x^* + a - bx) - xg]|x|^4 \quad (23)$$

و از (21) و (22) نتیجه می شود:

$$\mathbf{E} = x\mathbf{E}_0 - xa|\mathbf{E}_0|^2\mathbf{E}_0 - xb|\mathbf{E}_0|^2\mathbf{E} - xg|\mathbf{E}_0|^4\mathbf{E} \quad (15)$$

که این جا a, b, g به صورت زیر تعریف می شوند:

$$a = \frac{3\mathbf{e}_{1d}(1 + 2f)\mathbf{e}_{2m}(G + 1)}{3\mathbf{e}_{1d}(1 + 2f)\mathbf{e}_{1m}G + 6\mathbf{e}_{1d}^2(1 - f)}$$

$$b = \frac{\mathbf{e}_{1d}(5f + 4)\mathbf{e}_{2m}(G + 1) + (1 - f)(2\mathbf{e}_{1m}G\mathbf{e}_{2m})(G + 1)}{3\mathbf{e}_{1d}(1 + 2f)\mathbf{e}_{1m}G + 6\mathbf{e}_{1d}^2(1 - f)}$$

$$g = \frac{(1 - f)\mathbf{e}_{2m}^2(G + 1)^2}{3\mathbf{e}_{1d}(1 + 2f)\mathbf{e}_{1m}G + 6\mathbf{e}_{1d}^2(1 - f)} \quad (17)$$

$$\mathbf{E} = x\mathbf{E}_0 + x(a\mathbf{E}_0 - b\mathbf{E})|x|^2|\mathbf{E}_0|^2$$

$$+ a^*|x|^2|\mathbf{E}_0|^2|\mathbf{E}|^2 - b^*|x|^2|\mathbf{E}|^2(\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}^*)$$

$$+ a|x|^2|\mathbf{E}_0|^2|\mathbf{E}|^2 - b|x|^2|\mathbf{E}|^2(\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*)$$

$$- xg|x|^4|\mathbf{E}_0|^4\mathbf{E}$$

با توجه به معادله (15) اگر در معادله (17) به جای \mathbf{E} ها به طور تقریبی $x\mathbf{E}_0$ قرار گیرد، می توان نوشت:

$$\mathbf{E} = x\mathbf{E}_0 + x(a - bx)|x|^2|\mathbf{E}_0|^2\mathbf{E}_0$$

$$+ [x(a - bx)(a^* - b^*x^* + a - bx) - x^2g]|x|^4|\mathbf{E}_0|^4\mathbf{E}_0 \quad (18)$$

و بردار جابه جایی الکتریکی به صورت $\dot{\mathbf{D}} = \bar{\mathbf{e}}_m\mathbf{E}$ به دست می آید.

با توجه به روش تی - ماتریس [6] می توان میانگین میدان الکتریکی و جابه جایی الکتریکی را به صورت زیر نوشت:

$$\bar{e} = e_{id} + \frac{\hat{a}r^{(1)}\bar{n}}{1 + \hat{a}GT^{(1)}\bar{n}} \quad (27)$$

با جایگذاری معادله (a.25) و (a.26) در (27) می‌توان نوشت:

$$\bar{e} = e_{id} + \frac{f(e_{1m}G - e_{id})x}{1 + f(x - 1)} \quad (28)$$

با توجه به فرمول (28) و جایگذاری داده‌های مربوط به شیشه چلکوناید از [12-13]، شیشه سیلیکا از [14-17]، نقره از [18-20] و مس و طلا از [21-27] می‌توان ضریب دی‌الکتریک ترکیب نانوذرات فلزی و این شیشه‌ها را محاسبه کرد. در جدول 1 اطلاعات مربوط به ترکیب نانوذرات فلزی با شیشه چلکوناید (As_2Se_3) و شیشه سیلیکا (SiO_2) در طول موج 700 نانومتر برای شعاع 9.7×10^{-8} و کسر حجمی 0.099 درج شده است.

جدول 1. مقایسه ضریب دی‌الکتریک موثر نانوذرات طلا، نقره و مس در شیشه چلکوناید و شیشه سیلیکا در طول موج 700 نانومتر، شعاع 97nm و کسر حجمی 0.099

ترکیب	$ \bar{e} $	Real(\bar{e})	Imag(\bar{e})
نانوذرات Ag در As_2Se_3	14/58	9/105	11/39
نانوذرات Au در As_2Se_3	11/04	3/908	10/33
نانوذرات Cu در As_2Se_3	10/21	3/192	9/697
نانوذرات Ag در SiO_2	39/27	23/75	31/27
نانوذرات Au در SiO_2	23/21	-13/74	18/71
نانوذرات Cu در SiO_2	4/663	4/662	0/09575

$$\begin{aligned} \hat{a}r^{(1)}\bar{n} &= (e_{1m}G - e_{id})x, \\ \hat{a}r^{(3)}\bar{n} &= \frac{x}{4p}|x|^2[(a - bx) \\ & \quad (e_{1m}G - e_{id}) + e_{2m}(G + 1)] \\ \hat{a}r^{(5)}\bar{n} &= \frac{x}{4p}|x|^4\{(e_{1m}G - e_{id}) \\ & \quad [(a - bx)(a^* - b^*x^* + a \\ & \quad - bx) - xg] + e_{2m}(G + 1)(a - bx)\} \end{aligned} \quad (24)$$

نتایج را می‌توان برای محیط مرکب، با حذف فاکتورهایی مثل هم پوشانی و... کلی کرد [6 و 9]؛ یعنی فرض می‌شود که تی-ماتریس محیط مرکب برابر مجموع تی-ماتریس‌های تک تک ذرات میهمان است. با توجه به کسر حجمی نانوذرات (f) معادلات (23) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\hat{a}GT^{(1)}\bar{n} = f(x - 1) \quad (a.25)$$

$$\hat{a}GT^{(3)}\bar{n} = \frac{f}{4p}x(a - bx)|x|^2 \quad (b.25)$$

$$\hat{a}GT^{(5)}\bar{n} = \frac{f}{4p}x[(a - bx) \\ \quad (a^* - b^*x^* + a - bx) - xg]|x|^4 \quad (c.25)$$

به همین ترتیب معادلات (24) به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\hat{a}r^{(1)}\bar{n} = f(e_{1m}G - e_{id})x \quad (a.26)$$

$$\hat{a}r^{(3)}\bar{n} = \frac{f}{4p}x|x|^2[(a - bx)(e_{1m}G - e_{id}) + e_{2m}(G + 1)] \quad (b.26)$$

$$\hat{a}r^{(5)}\bar{n} = \frac{f}{4p}x|x|^4\{(e_{1m}G - e_{id}) \\ \quad [(a - bx)(a^* - b^*x^* + a - bx) - xg] + e_{2m}(G + 1)(a - bx)\} \quad (c.26)$$

از روش تی-ماتریس ضریب دی‌الکتریک موثر را می‌توان به صورت زیر به دست آورد [6 و 9]:

جدول 3. ضریب دی‌الکتریک موثر ترکیب نانوذرات Ag در شیشه سیلیکا (SiO₂) برای شعاع‌ها و کسرهای حجمی مختلف در طول موج 700nm

Im ag ($\bar{\epsilon}$)	Real($\bar{\epsilon}$)	f	a (nm)
0/005003	2/175	0/004	10
0/008541	2/352	0/02	20
0/03503	3/079	0/055	50
5/511	16/96	0/099	91
23/44	24/64	0/1	95
43/34	-4/568	0/1	98
24/64	-19/66	0/1	100

همان گونه که در جدول 3 مشاهده می‌شود با افزایش شعاع نانوذرات و کسر حجمی آنها ضریب دی‌الکتریک ترکیب نیز افزایش می‌یابد تا به بیشینه مقدار خود برسد ولی به طور ناگهانی افت می‌کند.

در شکل 1 کردار ضریب دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب ($\bar{\epsilon}$) بر حسب کسر حجمی نانوذرات (f) و شعاع آنها برای نانوذرات نقره در شیشه چلکوجناید و در طول موج 700 نانومتر رسم شده است که در آنها به ترتیب از چپ به

راست اندازه ($|\bar{\epsilon}|$)، قسمت‌های حقیقی (Real) و موهومی (Imag) ضریب دی‌الکتریک ($\bar{\epsilon}$) محیط مرکب است (همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، داده‌ها از مراجع [27] و [10] استخراج شده است).

همان گونه که در جدول 1 مشاهده می‌شود بیشترین ضریب دی‌الکتریک مربوط به ترکیب نانوذرات نقره و شیشه سیلیکاست.

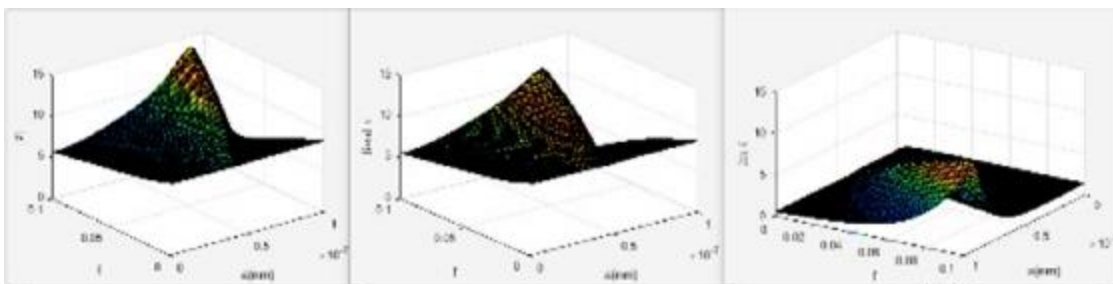
جدول 2 نیز با استفاده از فرمول (28) و همان داده‌های مراجع جدول 1 برای ترکیب نانوذرات نقره با شیشه چلکوجناید (As₂Se₃) در طول موج 700 نانومتر برای شعاع‌ها و کسرهای حجمی مختلف به دست آمده است.

جدول 2. ضریب دی‌الکتریک موثر ترکیب نانوذرات Ag در شیشه چلکوجناید (As₂Se₃) برای شعاع‌ها و کسرهای حجمی مختلف در طول موج 700nm

Im ag ($\bar{\epsilon}$)	Real($\bar{\epsilon}$)	$ \bar{\epsilon} $	f	a (nm)
1/583	8/785	8/926	0/004	10
1/508	7/504	7/654	0/02	20
1/433	8/483	8/603	0/055	50
7/274	11/88	13/93	0/099	91
10/63	10/22	14/75	0/1	96

همان گونه که در جدول 2 مشاهده می‌شود با افزایش شعاع و کسر حجمی نانوذرات، ضریب دی‌الکتریک مؤثر ترکیب افزایش می‌یابد و در شعاع 96 نانومتر و کسر حجمی 0/1 به بیشینه خود می‌رسد.

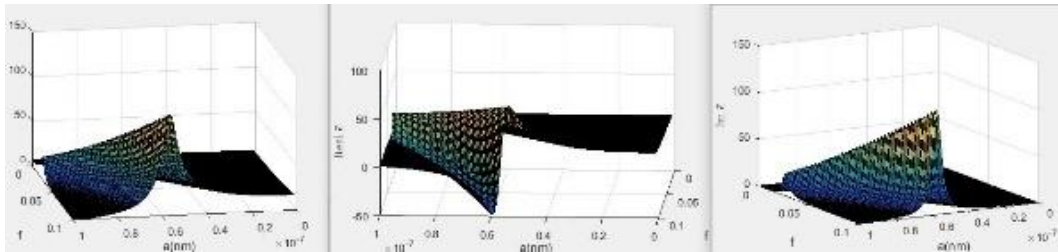
جدول 3 (مشابه جدول 2)، برای ترکیب نانوذرات نقره با شیشه سیلیکا (SiO₂) در طول موج 700 نانومتر برای



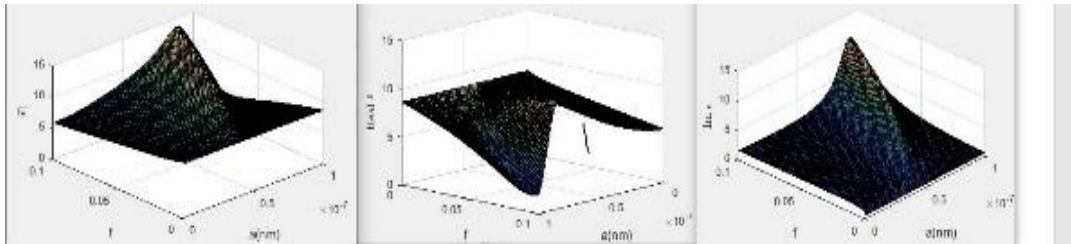
شکل 1. ضریب دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب

همان گونه که در شکل 1 مشاهده می‌شود ضریب دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب، در شعاع 50 نانومتر با افزایش کسر حجمی نانوذرات به بیشینه خود می‌رسد.

شعاع‌ها و کسرهای حجمی مختلف آورده شده است.



شکل 2. به ترتیب از چپ به راست، اندازه، قسمت حقیقی و قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک مؤثر ترکیب شیشه چلکوناید و نانوذرات نقره بر حسب کسر حجمی نانوذرات و شعاع آنها در طول موج 1020 نانومتر



شکل 3. به ترتیب از چپ به راست اندازه، قسمت حقیقی و قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک خطی مؤثر ترکیب شیشه چلکوناید

و نانوذرات مس بر حسب کسر حجمی نانوذرات و شعاع آنها در طول موج 700 نانومتر

بر حسب کسر حجمی نانوذرات و شعاع آنها در طول موج 700 نانومتر رسم شده است [12-13 و 21-27].

در شکل 3 مشاهده می‌شود که شعاع نانوذرات مس به حدود 80 نانومتر می‌رسد و ضریب دی‌الکتریک به بیشینه خود نزدیک می‌شود.

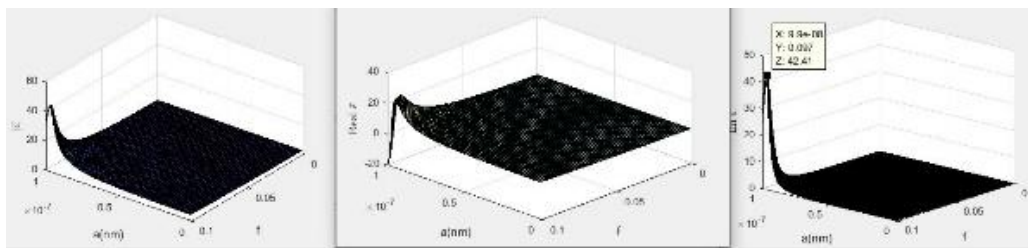
با رسم همین کردارها در مورد ترکیب نانوذرات در شیشه سیلیکا تغییرات قابل توجهی مشاهده می‌شود (داده‌های مربوط به شیشه سیلیکا از [14-17] به دست آمده است). شکل 4 مربوط به نانوذرات نقره در شیشه سیلیکا در طول موج 700 نانومتر است.

همان گونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود در شعاع‌های نزدیک به 100 نانومتر و کسر حجمی نزدیک به 0/1 ضریب دی‌الکتریک به طور ناگهانی افزایش می‌یابد، در حالی که قبل از آن نزدیک به صفر بوده است.

در شکل 2 به ترتیب از چپ به راست، اندازه، قسمت حقیقی و قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک مؤثر ترکیب شیشه چلکوناید و نانوذرات نقره بر حسب کسر حجمی نانوذرات و شعاع آنها در طول موج 1020 نانومتر رسم شده است.

همان گونه که در شکل 2 دیده می‌شود، ضریب دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب، با افزایش طول موج به 1020 نانومتر افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و باز هم حدود شعاع 50 نانومتر با افزایش کسر حجمی نانوذرات به بیشینه خود می‌رسد.

در شکل 3 به ترتیب از چپ به راست اندازه، قسمت حقیقی و قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک خطی مؤثر ترکیب شیشه چلکوناید (As_2Se_3) و نانوذرات مس



شکل 4. مربوط به نانوذرات نقره در شیشه سیلیکا در طول موج 700 نانومتر

شیشه چلکوجناید (As_2Se_3) ضریب دی‌الکتریک بیشتری نسبت به نانوذرات نقره و طلا در این نوع شیشه دارد. در حالی که همین نانوذرات در شیشه سیلیکا ضریب دی‌الکتریک قابل توجهی ندارند.

References

- [1] Zakery A, Elliott SR. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003 Nov 15;330(1-3):1-2.
- [2] Ogusu K, Yamasaki J, Maeda S, Kitao M, Minakata M. Linear and nonlinear optical properties of Ag-As-Se chalcogenide glasses for all-optical switching. *Optics letters*. 2004 Feb 1;29(3):265-7.
- [3] Brandes RG, Laming FP, Pearson AD. Optically Formed Dielectric Gratings in Thick Films of Arsenic-Sulfur Glass. *Applied Optics*. 1970 Jul 1;9(7):1712-4.
- [4] Maxwell GJ. Colours in metal glasses and in metallic films. *Phil. Trans. R. Soc. London*. 1904;203:385-420.
- [5] Garnett JM. VII. Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions.—II. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1906 Jan 1;205(387-401):237-88.
- [6] Agarwal GS, Gupta SD. T-matrix approach to the nonlinear susceptibilities of heterogeneous media. *Physical Review A*. 1988 Dec 1;38(11):5678.
- [7] Qi X, Nieminen TA, Stilgoe AB, Loke VL, Rubinsztein-Dunlop H. Comparison of T-matrix calculation methods for scattering by cylinders in optical tweezers. *Optics letters*. 2014 Aug 15;39(16):4827-30.
- [8] Waterman PC. T-matrix methods in acoustic scattering. *The journal of the acoustical society of america*. 2009 Jan;125(1):42-51.
- [9] Gharaati A, Kamaldar A. Enhancement of nonlinear optical properties of compounds of silica glass and metallic na-

بحث و نتیجه گیری

- مشاهده می‌شود که ضریب دی‌الکتریک مؤثر محیط مرکب با افزایش شعاع نانوذرات به طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به ویژه زمانی که کسر حجمی نانوذرات نیز زیادت‌ر باشد. در طول موج 1020 نانومتر ترکیب نانوذرات مس و nanoparticle. *Pramana*. 2016 Jun;86:1329-42. and metallic nanoparticle. *Pramana*. 2016 Jun;86:1329-42.
- [10] Robert G. Brown, *Classical Electrodynamics part II*, Durham, NC 27708-0305, (2007) 135-137.
 - [11] Sarychev AK, Shalaev VM. Electromagnetic field fluctuations and optical nonlinearities in metal-dielectric composites. *Physics Reports*. 2000 Sep 1;335(6):275-371.
 - [12] Joseph S, Sarkar S, Khan S, Joseph J. Exploring the optical bound state in the continuum in a dielectric grating coupled plasmonic hybrid system. *Advanced Optical Materials*. 2021 Apr;9(8):2001895.
 - [13] Joseph S, Sarkar S, Joseph J. Grating-coupled surface plasmon-polariton sensing at a flat metal-analyte interface in a hybrid-configuration. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020 Sep 23;12(41):46519-29.
 - [14] Rodríguez-de Marcos LV, Larruquert JI, Méndez JA, Aznárez JA. Self-consistent optical constants of SiO₂ and Ta₂O₅ films. *Optical Materials Express*. 2016 Nov 1;6(11):3622-37.
 - [15] Kischkat J, Peters S, Gruska B, Semtsiv M, Chashnikova M, Klinkmüller M, Fedosenko O, Machulik S, Aleksandrova A, Monastyrskiy G, Flores Y. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride. *Applied optics*. 2012 Oct 1;51(28):6789-98.
 - [16] Gao L, Lemarchand F, Lequime M. Refractive index determination of SiO₂ layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs. *Journal of*

- the European Optical Society-Rapid publications. 2013 Jan 31;8.
- [17] Prokhorov AV, Shesterikov AV, Gubin MY, Volkov VS, Evlyukhin AB. Quasitrapped modes in metasurfaces of anisotropic MoS₂ nanoparticles for absorption and polarization control in the telecom wavelength range. *Physical Review B*. 2022 Jul 14;106(3):035412.
- [18] Ciesielski A, Skowronski L, Trzcinski M, Szoplik T. Controlling the optical parameters of self-assembled silver films with wetting layers and annealing. *Applied Surface Science*. 2017 Nov 1;421:349-56.
- [19] Jiang Y, Pillai S, Green MA. Realistic silver optical constants for plasmonics *Sci*.
- [20] Choi J, Cheng F, Cleary JW, Sun L, Dass CK, Hendrickson JR, Wang CY, Gwo S, Shih CK, Li X. Optical dielectric constants of single crystalline silver films in the long wavelength range. *Optical Materials Express*. 2020 Feb 1;10(2):693-703.
- [21] McPeak KM, Jayanti SV, Kress SJ, Meyer S, Iotti S, Rossinelli A, Norris DJ. Plasmonic films can easily be better: rules and recipes. *ACS photonics*. 2015 Mar 18;2(3):326-33.
- [22] Joseph S, Sarkar S, Khan S, Joseph J. Exploring the optical bound state in the continuum in a dielectric grating coupled plasmonic hybrid system. *Advanced Optical Materials*. 2021 Apr;9(8):2001895.
- [23] Rosenblatt G, Simkhovich B, Bartal G, Orenstein M. Nonmodal plasmonics: Controlling the forced optical response of nanostructures. *Physical Review X*. 2020 Mar 25;10(1):011071.
- [24] Yakubovsky DI, Stebunov YV, Kirtaev RV, Ermolaev GA, Mironov MS, Novikov SM, Arsenin AV, Volkov VS. Ultrathin and ultrasmooth gold films on monolayer MoS₂. *Advanced Materials Interfaces*. 2019 Jul;6(13):1900196.
- [25] Yakubovsky DI, Arsenin AV, Stebunov YV, Fedyanin DY, Volkov VS. Optical constants and structural properties of thin gold films. *Optics express*. 2017 Oct 16;25(21):25574-87.
- [26] Ciesielski A, Skowronski L, Trzcinski M, Górecka E, Trautman P, Szoplik T. Evidence of germanium segregation in gold thin films. *Surface Science*. 2018 Aug 1;674:73-8.
- [27] Babar S, Weaver JH. Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited. *Applied Optics*. 2015 Jan 20;54(3):477-81.

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>)