بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

اثرات تغییر چگالی نانوذرات فلزی بر منحنی پاشندگی در فیبرنوری با غلاف کامپوزیت

مریم سیدی[1]، علی رستمی[2]، قاسم رستمی[2] و یدالله میرزایی[2]

پردیس بین‌الملل ارس دانشگاه تبریز[1]، دانشکده فناوری‌های نوین دانشگاه تبریز[2]

چکیده – در این مقاله قصد داریم به توصیف خصوصیات منحنی پاشندگی و فرکانس قطع مدی در فیبرنوری با لایه کامپوزیت بپردازیم. همچنین فرکانس قطع مدی را در فیبرنوری معمولی و فیبر نوری با غلاف کامپوزیت مورد مقایسه قرار خواهیم داد. با استفاده از مدلسازی تئوری محیط موثر برای فیبرنوری با لایه کامپوزیت نشان خواهیم داد که با تنظیم درصد ناخالصی از نانوذرات در غلاف کامپوزیت می‌توان فرکانس قطع مدی و میزان عمق نفوذ را تغییر داده و کنترل نمود.

کلید واژه- تئوری محیط موثر، فرکانس قطع مدی، فیبرنوری با لایه کامپوزیت، تشدید پلاسمون سطحی و منحنی پاشندگی

The effects of metal nanoparticles density on dispersion curve in optical fiber with composite cladding

M.Seyyedi[1], A.Rostami[2],Gh.Rostami[2] and Y.Mirzaei[2]

Aras International Campus, University of Tabriz[1],

School of Engineering-Emerging Technology, University of Tabriz[2],

Abstract- In this paper we are describing the characteristics of dispersion curves and cut-off frequency in optical fiber with composite cladding. In addition, we are comparing cut-off frequency in ordinary optical fiber to one in optical fiber with composite cladding. By means of modeling the theory of effective medium for optical fiber with composite cladding, we are showing that in optical fiber with composite cladding, by adjusting nanoparticles density in composite cladding, the cut-off frequency and penetration depth can be changed and controlled.

Keywords: Effective medium theory, Cut-off frequency, Optical fiber with composite cladding, Surface plasmon resonance and dispersion curves.

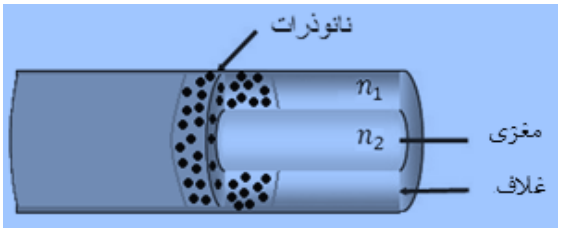
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

امروزه، محققان با ترکیب مزایای حسگرهای فیبرنوری و تشدید پلاسمون سطحی نانوذرات فلزی، حسگرهایی با دقت و حساسیت بالا و قیمت پایین جهت تشخیص نمونه های محیطی و سمی ساخته‌اند[1]. همچنین به بررسی اثرات اندازه و شکل نانوذرات تک فلزی و دوفلزی در موجبرهای مستطیلی پرداخته‌اند[3]-[2]. در این راستا، به دلیل پیاده‌سازی آسان حسگرهای فیبرنوری، ابعاد و وزن آن‌ها و حساسیت بالای آن‌ها از این نوع حسگرها استفاده نمودیم که در این خصوص، محققان حسگرهای فیبرنوری با غلاف چند لایه را مورد بررسی قرار داده اند[5]-[4]. بعلاوه خواص برخی از کامپوزیت‌ها، با استفاده از مدلسازی تئوری محیط موثر مورد بررسی قرار گرفته است[6]. بر این اساس قصد داریم با بهره‌گیری از خواص تنظیم‌پذیری ثابت‌های اپتیکی در کامپوزیت‌ها و تغییر چگالی نانوذرات، میزان تغییرات منحنی پاشندگی و فرکانس قطع مدی را تعیین نماییم. ابتدا غلاف کامپوزیت را با استفاده از Effective Medium Theory(EMT) تعیین مشخصه نموده، سپس منحنی پاشندگی برای فیبرنوری با غلاف کامپوزیت را مورد شبیه سازی قرار دهیم. در ادامه، ابتدا در بخش اول به مدلسازی ریاضی ساختار و معرفی ساختار می پردازیم. در بخش دوم به شبیه سازی منحنی پاشندگی و تاثیر نانوذرات بر آن و فرکانس قطع مدی پرداخته و نتایج حاصله را تفسیر نموده و با فیبرنوری معمولی مقایسه خواهیم کرد. در نهایت جمع بندی و نتیجه گیری ارائه می‌گردد.

۲- تئوری و فرمولاسیون



شکل ۱: شماتیک کلی فیبر با غلاف کامپوزیت

همانطور که ذکر گردید اساس کار ما در این مقاله فیبرنوری با غلاف کامپوزیت است، که در شکل ۱ نشان داده شده است. از این رو ضریب شکست در غلاف به صورت $n_2 = n_{2i} + jn_{2j}$ می‌گردد که قسمت حقیقی ویژگی‌های انتقال و قسمت موهومی مشخصات جذب و میزان تلفات را نشان می‌دهد. از آنجایی که غلاف به صورت کامپوزیت است تحلیل خصوصیات نانوذرات کاملا ضروری است که برای این کار می‌توان از مدل‌های درود، الکترون آزاد، بروندل-برومن و لورنتز-درود استفاده نمود که به ترتیب نشان داده شده است.

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)} \quad (۱)$$

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{{\omega_p}^2}{\omega^2} \quad (۲)$$

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)} + \sum_{j=1}^{k} \frac{f_j\omega_p^2}{({\omega_j}^2-\omega^2)+i\omega\Gamma_j} \quad (۳)$$

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)} + \sum_{j=1}^{k} \chi_j(\omega) \quad (۴)$$

که در معادلات (۱) و (۲) ω_p نشاندهنده فرکانس پلاسما، ω نشان‌دهنده فرکانس و γ ثابت میرایی را نشان می‌دهد. در معادلات (۳) و (۴) k نشاندهنده تعداد نوسانگرها و طول عمر $1/\gamma$ است، در حالیکه Ω_p نشان‌دهنده فرکانس پلاسمای مرتبط با انتقال intraband است. همچنین از تئوری محیط موثر جهت بررسی ساختار کامپوزیت استفاده می‌نماییم که از جمله مدل‌هایی که این تئوری معرفی می‌کند می‌توان به مدلهای Maxwell-Garnet(MG)، Polder and van Santen(PvS) و Landau-Lifshitz-Looyenga(LLL) اشاره کرد که به ترتیب در زیر مشخص شده است:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 \left[\frac{(1+2f)\varepsilon_2+2(1-f)\varepsilon_1}{(1-f)\varepsilon_2+(2+f)\varepsilon_1}\right] \quad (۵)$$

$$\frac{\varepsilon_{eff}-\varepsilon_1}{3\varepsilon_{eff}} = f\frac{\varepsilon_2-\varepsilon_1}{\varepsilon_2+2\varepsilon_{eff}} \quad (۶)$$

$$\sqrt[3]{\varepsilon_{eff}} = f\sqrt[3]{\varepsilon_2} + (1-f)\sqrt[3]{\varepsilon_1} \quad (۷)$$

که در روابط فوق f بیانگر نسبت حجمی ذرات ناخالصی به حجم کل کامپوزیت بوده و ε_1، ε_2 و ε_{eff} به ترتیب نمایانگر گذردهی نانوذرات فلزی در غلاف، مغزی و گذردهی موثر ماده است. در ادامه از مدل LLL به دلیل اعتبار آن برای نانوذرات با اشکال ناشناخته و در چگالی های بالا از نانوذرات برای شبیه سازی ساختار کامپوزیت بهره گرفتیم. شایان ذکر است اندازه ذرات بسیار کوچکتر از طول موج مورد بحث ما است از این رو اثرات پراکندگی قابل اغماض است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]

جهت آنالیز انتشار موج در فیبرهای نوری باید از مختصات استوانه‌ای استفاده کرد. میدان الکتریکی در فیبرنوری به صورت $\vec{E} = \vec{E}(r,\theta)e^{j(\omega t-\beta z)}$ می‌باشد. مدهای LP در فیبرنوری شامل مد TE و مد TM و مد هایبرید است. با فرض $K^2 = k^2{n_1}^2 - \beta^2$ در داخل مغزی (r<a) و با فرض $-\gamma^2 = k^2{n_2}^2 - \beta^2$ در داخل غلاف (r>a) برای مدهای TE، TM و مد هایبرید با علامت مثبت (HE) و با علامت منفی (EH) خواهیم داشت:

$$\frac{J_1(Ka)}{KaJ_0(Ka)} + \frac{K_1(\gamma a)}{\gamma aK_0(\gamma a)} = 0 \qquad \text{TE Mode} \qquad (۸)$$

$$\frac{J_1(Ka)}{KaJ_0(Ka)} + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{K_1(\gamma a)}{\gamma aK_0(\gamma a)} = 0 \qquad \text{TM Mode} \qquad (۹)$$

$$\frac{J_{\nu-1}(Ka)}{KaJ_\nu(Ka)} - \frac{K_{\nu-1}(\gamma a)}{\gamma aK_\nu(\gamma a)} = 0 \qquad \text{HE Mode} \qquad (۱۰)$$

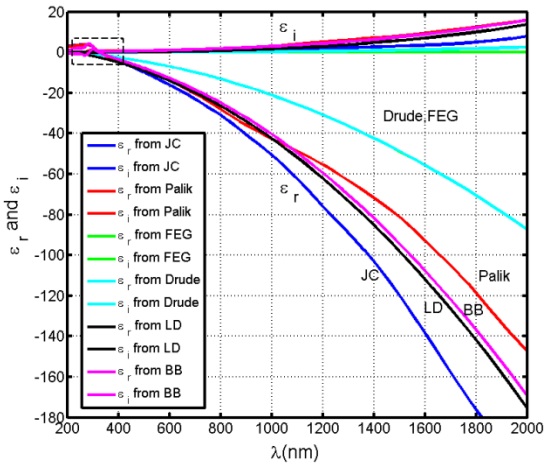
$$\frac{J_{\nu+1}(Ka)}{KaJ_\nu(Ka)} + \frac{K_{\nu+1}(\gamma a)}{\gamma aK_\nu(\gamma a)} = 0 \qquad \text{EH Mode} \qquad (۱۱)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان به بررسی اثرات چگالی نانوذرات فلزی بر تغییرات فرکانس قطع مدی و منحنی پاشندگی در فیبرنوری پرداخت. همچنین، با توجه به معادله (۱۲)، می‌توان نشان داد که با افزایش طول موج میزان عمق نفوذ افزایش می‌یابد[10]-[7].

$$d_P = \frac{\lambda}{2\pi n_2\sqrt{\sin^2\theta_i - \frac{{n_1}^2}{{n_2}^2}}} \qquad (۱۲)$$

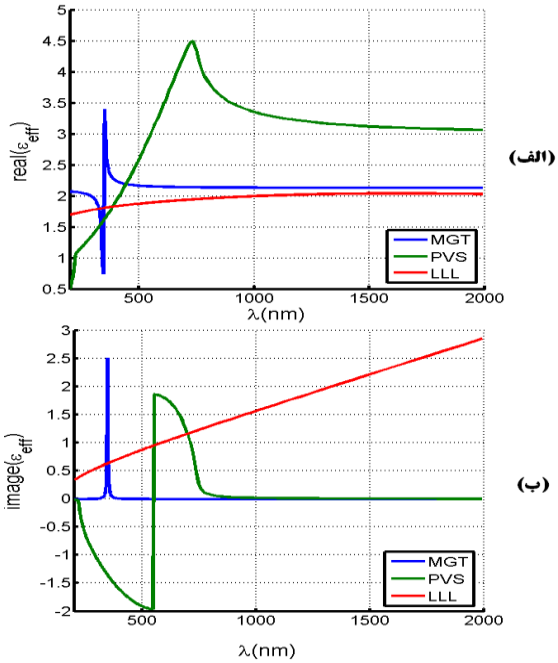
۳- بررسی اثرات چگالی نانوذرات فلزی بر فرکانس قطع مدی و عمق نفوذ

ابتدا در شکل ۲، مدل‌های ذکر شده را با مقادیر اندازه گیری شده جانسون و کریستی و پالیک برای توصیف یک نانوذره، مورد مقایسه قرار می‌دهیم. با توجه به شکل ۲ مدل‌های لورنتز-درود و بروندل-برومن به مقادیر اندازه گیری شده نزدیکتر است. همچنین با توجه به معادلات (۳) و (۴) مدل بروندل-برومن مشکل وجود قطب در سیستم را حل می کند از این رو این مدل برای توصیف مشخصات یک نانوذره مناسب است.



شکل ۲: مقایسه قسمت حقیقی و موهومی مدل‌های مختلف با مقادیر اندازه گیری شده جانسون و کریستی و پالیک

پس از انتخاب مدل مناسب برای یک نانو ذره، با کمک تئوری محیط موثر، مدل مناسب را برای توصیف ساختار کامپوزیت مورد بررسی قرار می‌دهیم، از این رو مدل‌های MG، PVS و LLL را مورد شبیه سازی قرار می‌دهیم.



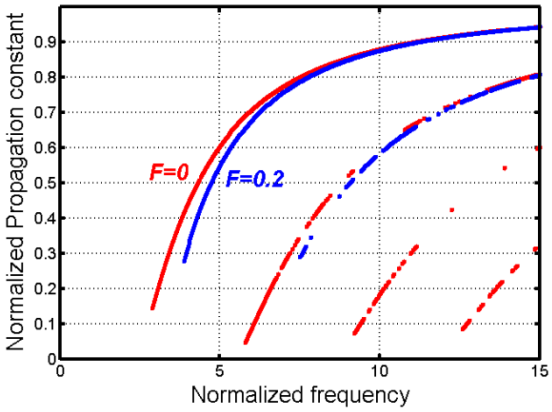
شکل ۳: مقایسه مدل‌ها با کمک EMT به ازای ۰/۵ درصد از نانوذرات الف)قسمت حقیقی و ب) قسمت موهومی گذردهی موثر ماده

با توجه به شکل ۳ مدل‌های MG و PVS دارای پیک‌هایی هستند که با افزایش چگالی نانوذرات این پیک‌ها به سمت طول موج‌های بزرگتر شیفت می یابد. از این رو مدل LLL برای توصیف ساختار کامپوزیت مناسب است.

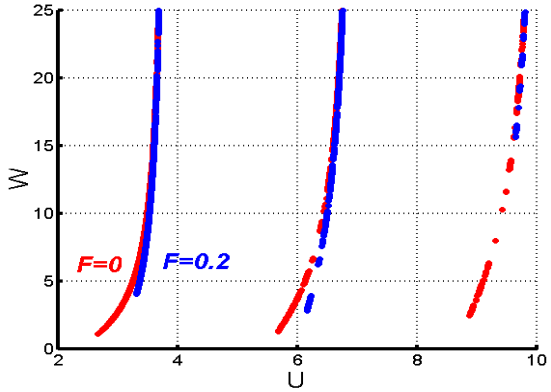
برای نشان دادن تاثیر تغییرات چگالی نانوذرات فلزی بر

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]

منحنی پاشندگی و فرکانس قطع مدی از توزیع میدان الکترومغناطیسی استفاده می‌نماییم. شکل۴ تاثیر تغییرات چگالی نانو ذرات فلزی غلاف را بر منحنی پاشندگی برای مد LP نشان می‌دهد و شکل ۵ بیانگر تغییرات u و w می‌باشد که به ترتیب نشان‌دهنده ثابت انتشار جانبی نرمالیزه در مغزی و ثابت فروپاشی جانبی در غلاف است. با توجه به شکل ۴ و ۵ می‌توان فهمید که با تغییر در چگالی نانوذرات می‌توان فرکانس قطع مدی را تغییر داد.

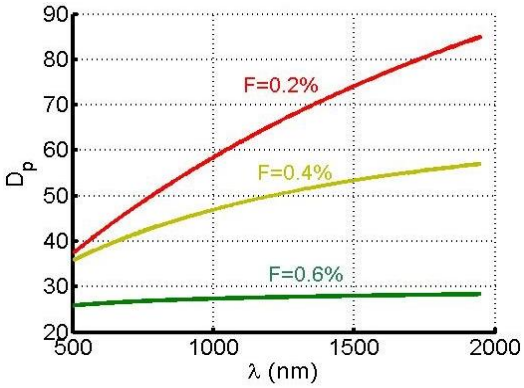


شکل ۴: منحنی پاشندگی برای مدهای LP به ازای چگالی صفر و 0.2 درصد از نانوذرات فلزی در غلاف



شکل ۵: ثابت انتشار نرمالیزه در مغزی بر حسب ثابت تجزیه غلاف به ازای چگالی های متفاوت از نانوذرات فلزی

شکل ۶ تغییرات عمق نفوذ بر حسب طول موج را نشان می‌دهد و مشخص است که با افزایش میزان چگالی نانوذرات فلزی در غلاف با افزایش طول موج میزان عمق نفوذ کاهش می‌یابد.



شکل ۶: عمق نفوذ بر حسب طول موج با افزایش چگالی نانوذرات فلز

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان فهمید که فرکانس قطع مدی را می توان با کامپوزیت کردن غلاف کنترل نمود و با افزایش میزان نانوذرات فلزی در غلاف به دلیل فلزی شدن غلاف فرکانس قطع مدی به سمت فرکانس های بالاتر شیفت می‌یابد. علاوه بر این، عمق نفوذ با افزایش طول موج زیادتر می‌گردد و با افزایش میزان نانوذرات میزان عمق نفوذ کاهش یافته و نور راحت‌تر منتشر می‌یابد، یعنی میزان تلفات آن کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] J.Luo, J.Yao, Y.Lu, W.Ma, and X.Zhuang,"*A Silver Nanopaticle-modified Evanescent Field Optical Fiber Sensor for Methylene Blue Detection*",**Sensors**, *13, 3986-3997; doi:10.3390/s130303986*,ISSN 1424-8220, 2013.

[2] S. Link, Z.L. Wang and M.A. El-Sayed, "*Alloy formation of gold–silver nanoparticles and the dependence of the plasmon absorption on their composition*", J.Phys.Chem. B,103,3529-3533,1999.

[3] D.H.Chen and C.J.Chen,"Formation and characterization of Au–Ag bimetallic nanoparticles in water-in-oil microemulsions", J. Mater. Chem., 12, 1557–15622002, DOI: 10.1039/b110749f, 2002.

[4] W.Peng, Y.Liu, P.Fang, X.Liu, Zh.Gong, H.Wang and F.Cheng," *Compact surface plasmon resonance imaging sensing system based on general optoelectronic components*",**OPTICS EXPRESS**,2014.

[5] A.K.Sharma and B.D.Gupta," *Fibre-optic sensor based on surface plasmon resonance with Ag–Au alloy nanoparticle films*",**Nanotechnology** 17, *doi: 10.1088/0957-4484/17/1/020, 2006.*

[6] W.Cai, and V.Shalaev,"*Optical Metamaterial*", Springer New York Dordrecht Heidelberg London.

[7] E.D.Palik,"*Handbook of Optical constants of solids*", academic press,1985.

[8] P.B.Johnson, and R.W.Christy, "*Optical Constants of the Noble Metals*", **physical** review B, volume 6, number 12, 15 December 1972.

[9] K.Okamoto," *Fundamentals of Optical Waveguides*" ,Second Edition, Okamoto Laboratory Ltd Ibaraki, Japan.

[10] K.Iizuka, "Elements of Photonics, Volume II: For Fiber and Integrated Optics", Copyright 2002.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]