

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

مریم سیدی^۱، علی رستمی^۲، قاسم رستمی^۲ و یدالله میرزایی^۲

پردیس بین الملل ارس دانشگاه تبریز^۱، دانشکده فناوری های نوین دانشگاه تبریز^۲

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

کلید واژه - تئوری محیط موثر، فرکانس قطع مدی، فیبر نوری 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.Seyyedi¹, A.Rostami², Gh.Rostami² and Y.Mirzaei²

Aras International Campus, University of Tabriz¹,

School of Engineering-Emerging Technology, University of Tabriz²,

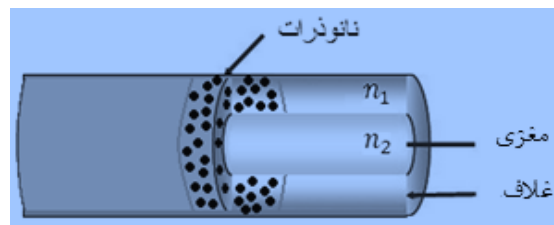
Abstract- In this paper we are describing the characteristics of dispersion curves and cut-off frequency in optical fiber with composite cladding. In addition, we are comparing cut-off frequency in ordinary optical fiber to one in optical fiber with composite cladding. By means of modeling the theory 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.

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 ساخته اند [1]. همچنین به بررسی اثرات اندازه و شکل نانوذرات تک فلزی و دوفلزی در موجبرهای مستطیلی پرداخته اند [2]-[3]. در این راستا، به دلیل پیاده سازی 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 [4]-[5]. بعلاوه خواص برخی از کامپوزیتها، با استفاده از مدلسازی تئوری محیط موثر مورد بررسی قرار گرفته است [6]. بر این اساس قصد داریم با بهره گیری از خواص تنظیم پذیری ثابت های 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 می گردد.

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 $n_2 = n_{2i} + jn_{2j}$ می گردد که قسمت حقیقی

ویژگی های انتقال و قسمت موهومی مشخصات جذب و میزان تلفات را نشان می دهد. از آنجایی که غلاف به صورت کامپوزیت است تحلیل خصوصیات نانوذرات کاملاً ضروری است که برای این کار می توان از مدل های درود، الکترون آزاد، بروندل-برومن و لورنتز-درود استفاده نمود که به ترتیب نشان داده شده است.

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

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

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} + \sum_{j=1}^k \frac{f_j \omega_p^2}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i\omega\Gamma_j} \quad (3)$$

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} + \sum_{j=1}^k \chi_j(\omega) \quad (4)$$

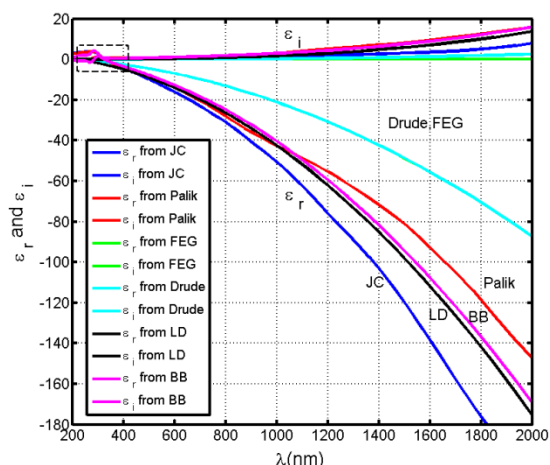
که در معادلات (۱) و (۲) ω_p نشان دهنده فرکانس پلاسما، ω نشان دهنده فرکانس و γ ثابت میرایی را نشان می دهد. در معادلات (۳) و (۴) k نشان دهنده تعداد نوسانگرها و طول عمر $1/\gamma$ است، در حالیکه Ω_p نشان دهنده فرکانس پلاسمای مرتبط با انتقال intraband است. همچنین از تئوری محیط موثر جهت بررسی ساختار کامپوزیت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

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 \left[\frac{(1+2f)\epsilon_2 + 2(1-f)\epsilon_1}{(1-f)\epsilon_2 + (2+f)\epsilon_1} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_1}{3\epsilon_{eff}} = f \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_{eff}} \quad (6)$$

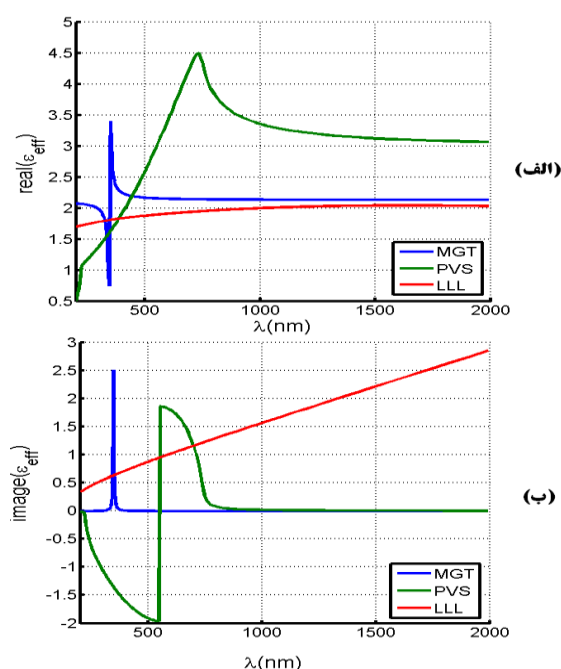
$$\sqrt[3]{\epsilon_{eff}} = f\sqrt[3]{\epsilon_2} + (1-f)\sqrt[3]{\epsilon_1} \quad (7)$$

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.



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 شیف می‌یابد. از این رو مدل LLL برای توصیف ساختار کامپوزیت مناسب است.

برای نشان دادن تاثیر تغییرات چگالی نانوذرات فلزی بر

جهت آنالیز انتشار موج در فیبرهای نوری باید از مختصات استوانه‌ای استفاده کرد. میدان الکتریکی در فیبرنوری به صورت $\vec{E} = \vec{E}(r, \theta)e^{i(\omega t - \beta z)}$ 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:

$$\frac{J_1(Ka)}{KaJ_0(Ka)} + \frac{K_1(\gamma a)}{\gamma a K_0(\gamma a)} = 0 \quad \text{TE Mode} \quad (8)$$

$$\frac{J_1(Ka)}{KaJ_0(Ka)} + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{K_1(\gamma a)}{\gamma a K_0(\gamma a)} = 0 \quad \text{TM Mode} \quad (9)$$

$$\frac{J_{v-1}(Ka)}{KaJ_v(Ka)} - \frac{K_{v-1}(\gamma a)}{\gamma a K_v(\gamma a)} = 0 \quad \text{HE Mode} \quad (10)$$

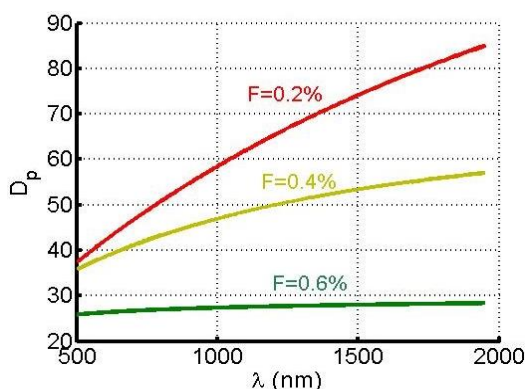
$$\frac{J_{v+1}(Ka)}{KaJ_v(Ka)} + \frac{K_{v+1}(\gamma a)}{\gamma a K_v(\gamma a)} = 0 \quad \text{EH Mode} \quad (11)$$

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 [7]-[10].

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_2 \sqrt{\sin^2 \theta_i - \frac{n_1^2}{n_2^2}}} \quad (12)$$

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 برونندل-برومن به مقادیر اندازه گیری شده نزدیکتر است. همچنین با توجه به معادلات (۳) و (۴) مدل برونندل-برومن مشکل وجود قطب در سیستم را حل می‌کند از این رو این مدل برای توصیف مشخصات یک نانوذره مناسب است.



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

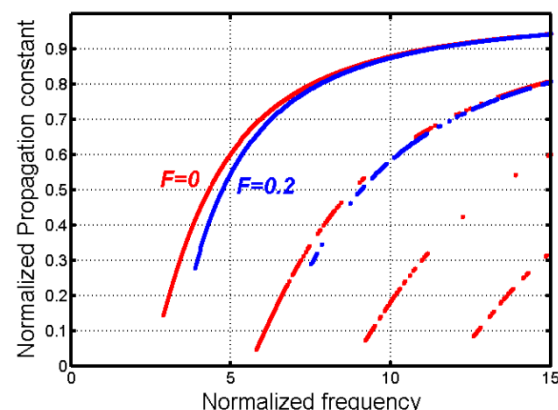
۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده می توان 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 شیفست می یابد. علاوه بر این، عمق نفوذ با افزایش طول موج زیادتر می گردد و با افزایش میزان نانوذرات میزان عمق نفوذ کاهش یافته و نور راحت تر منتشر می یابد، یعنی میزان تلفات آن کاهش می یابد.

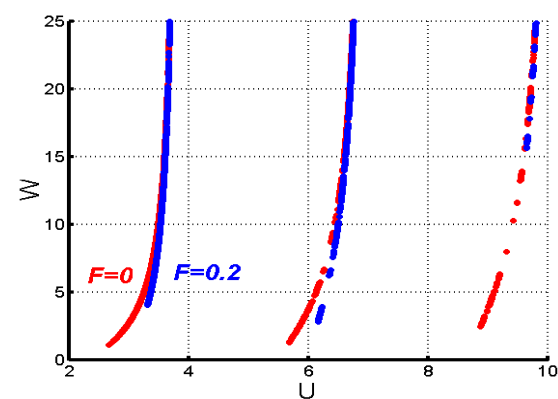
مراجع

- [1] J.Luo, J.Yao, Y.Lu, W.Ma, and X.Zhuang, "A Silver Nanoparticle-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, 1557-1562, 2002, 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.

منحنی پاشندگی و فرکانس قطع مدی از توزیع میدان الکترومغناطیسی استفاده می نماییم. شکل ۴ تاثیر تغییرات چگالی نانو ذرات فلزی غلاف را بر منحنی پاشندگی برای مد LP نشان می دهد و شکل ۵ بیانگر تغییرات W و U می باشد که به ترتیب نشان دهنده ثابت انتشار جانبی نرمالیزه در مغزی و ثابت فروپاشی جانبی در غلاف است. با توجه به شکل ۴ و ۵ می توان فهمید که با تغییر در چگالی نانوذرات می توان 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 می دهد و مشخص است که با افزایش میزان چگالی نانوذرات فلزی در غلاف با افزایش طول موج میزان عمق نفوذ کاهش می یابد.