

موجبر پلاسمونی هیبریدی با سطح موثر مد بهبود یافته

محسن کافی^۱، میرمجتبی میرصالحی^۲

^۱ گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، mohsen.kafi@stu.um.ac.ir

^۲ گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، mirsalehi@um.ac.ir

فلز (MIM) و موجبرهای پلاسمون پلاریتون کانال (CPP) اشاره کرد [۳]. با این حال زمانی که صحبت از موجبرهایی بر پایه پلاسمون پلاریتون‌های سطحی می‌شود باید توجه خاصی به مقدار زیاد تلفات اهمی ناشی از فلز داشته باشیم [۳]. اخیراً موجبرهای پلاسمونی هیبریدی با ساختاری متشکل از یک لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست بالا که به وسیله یک لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست پایین از سطح فلزی جدا شده است، معرفی شده‌اند. نشان داده شده است که چنین ساختاری به دلیل پایین بودن تلفات از طول انتشار بالایی برخوردار است [۲]. با این وجود در چنین ساختارهایی همواره میان طول انتشار و سطح موثر مد مصالحه‌ای وجود دارد.

در این مقاله ساختار موجبر فلز-عایق-فلز (MIM) مورد بررسی قرار گرفته است. در طرح پیشنهادی، موجبری با ساختار فوق و یک لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست بالا با یکدیگر مجتمع شده‌اند. نخست تاثیر تغییر در ابعاد و شکل هندسی ساختار بر پارامترهای انتشاری موجبر مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم با توجه به تاثیر مواد بکار رفته در لایه های مختلف موجبر بر عملکرد آن، تحلیلی از عملکرد موجبر در صورت استفاده از مواد مختلف در ساختار آن صورت گرفته است. در انتها با استفاده از یک ساختار متناوب به جای لایه فلزی مقدار سطح موثر مد بهبود یافته است.

۲- هندسه موجبر پلاسمونی هیبریدی

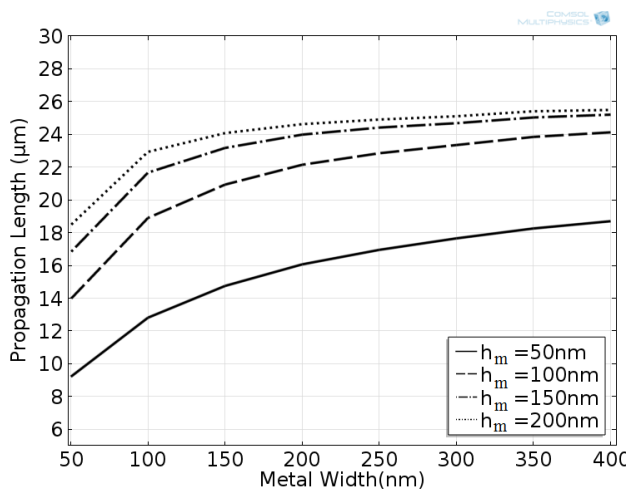
شکل ۱ ساختار موجبر ترکیبی پیشنهادی را نشان می‌دهد. این ساختار شامل یک لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست بالا (n_d) است که در داخل یک ماده با ضریب شکست پایین (n_g) قرار گرفته است. دو تیغه فلزی به صورت متقارن در بالا و پایین لایه دی‌الکتریک قرار داده شده است. لایه دی‌الکتریک میانی از جنس سیلیکون با ضریب شکست $n_d = ۳/۴۵۵$ و با ارتفاع h_d در نظر گرفته شده است. عرض لایه دی‌الکتریک میانی دو میکرومتر است. دو تیغه فلزی نیز از جنس نقره با ضریب شکست $n_m = ۰/۱۴۴ + i۱۱/۳۶۶$ و با ابعاد $w_m \times h_m$ بوده و در فاصله h_g از لایه میانی قرار دارند. همچنین ماده دی‌الکتریک با ضریب شکست پایین از جنس سیلیکا با ضریب شکست $n_g = ۱/۴۴۴$ در نظر گرفته شده است [۴]. در محاسبات طول انتشار به صورت فاصله‌ای که در

چکیده- در این مقاله یک ساختار دو بعدی موجبر پلاسمونی هیبریدی معرفی شده است. در این ساختار یک لایه نازک دی‌الکتریک با ضریب دی‌الکتریک نسیبی بالا با یک موجبر پلاسمونی فلزیدی‌الکتریک-فلز ترکیب شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد سطح موثر مدهای منتشر شده در مقایسه با ساختار معمول فلزیدی‌الکتریک-فلز در حدود دو برابر کاهش یافته است. همچنین به منظور کاهش بیشتر سطح موثر مد از یک ساختار متناوب به جای فلز در هندسه موجبر استفاده شده است. نتایج بدست آمده در این حالت نیز نشان می‌دهد که مقدار نرمالیزه شده سطح موثر مد در مقایسه با ساختار معمول فلزیدی‌الکتریک-فلز در حدود هشت برابر کاهش یافته است. محاسبات در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر و با استفاده از نرم‌افزار Comsol انجام شده است.

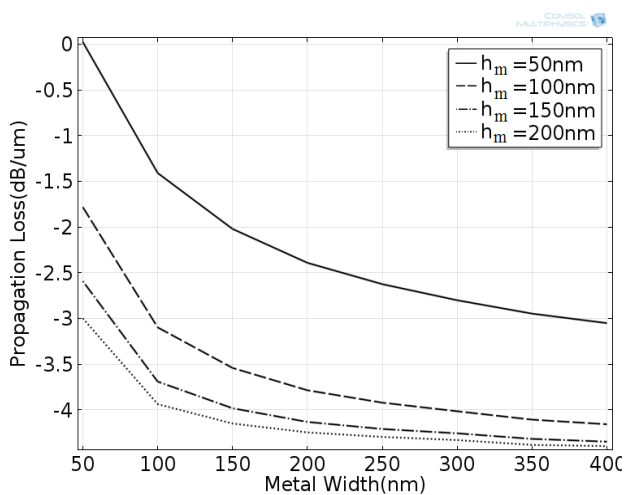
کلمات کلیدی- طول انتشار، موجبر پلاسمونی، سطح موثر مد

۱- مقدمه

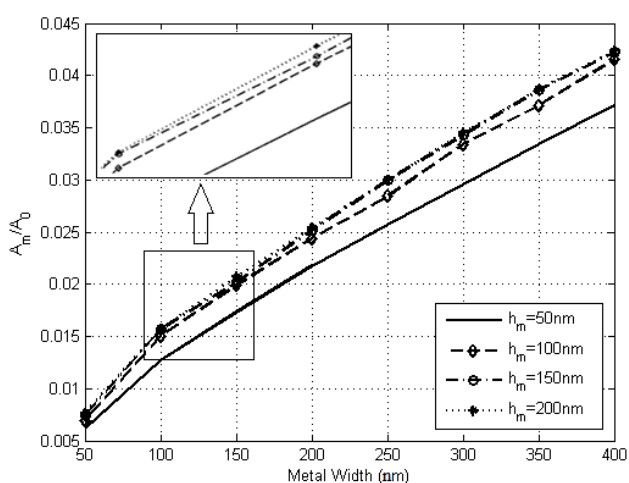
در سالهای اخیر دستیابی به پهنای باند زیاد برای انتقال اطلاعات به صورت فزاینده‌ای مورد تقاضا بوده است. استفاده از موجبرهای نوری در ارتباطات با برد کوتاه یکی از راهکارهای موجود در این زمینه به شمار می‌رود. از این رو به منظور تحقق مدارهای مجتمع نوری نیاز به موجبرهایی با قابلیت هدایت نور در ابعاد زیر طول موجی خواهیم داشت [۱]. مشکل اساسی در تحقق این امر محدودیت حد پراش نور در مواد دی‌الکتریک است. به عبارت دیگر انرژی الکترومغناطیسی نمی‌تواند در ناحیه‌ای کوچکتر از طول موج نور در دی‌الکتریک محدود شود [۲]. یک راه‌حل ممکن برای این مشکل استفاده از موجبرهای مبتنی بر امواج پلاسمونیک است. پلاسمونیک شاخه‌ای از نانوفوتونیک است که به مطالعه و بررسی برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی و الکترون‌های آزاد در سطح فلز می‌پردازد. مزیت موجبرهای پلاسمونی این است که از طریق تزویج میان امواج الکترومغناطیسی و نوسان الکترون‌های آزاد در سطح فلز می‌توان بر محدودیت حد پراش نور غلبه کرده و محدودیت زیر طول موجی در مقیاس نانومتر ایجاد کرد [۱]. در این راستا ساختارهای موجبری مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته و معرفی شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به موجبرهای پلاسمون پلاریتون سطحی با برد بلند (LRSPP)، موجبرهای پلاسمون پلاریتون سطحی با دی‌الکتریک بازگذاری شده (DLSPP)، موجبرهایی با ساختار فلز-عایق-



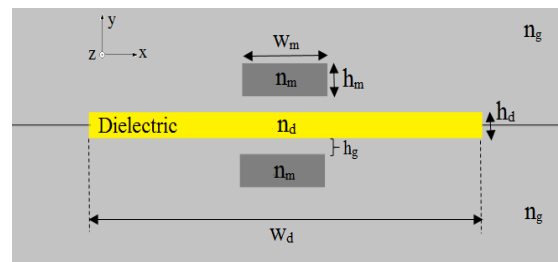
شکل ۲: نمودار طول انتشار بر حسب تغییرات عرض و ارتفاع تیغه‌های فلزی



شکل ۳: نمودار تلفات انتشار بر حسب تغییرات عرض و ارتفاع تیغه‌های فلزی



شکل ۴: نمودار مقدار نرمالیزه شده سطح موثر مد بر حسب تغییرات عرض و ارتفاع تیغه‌های فلزی



شکل ۱: ساختار موجبر پلاسمونی هیبریدی

آن توان موج به I/e مقدار اولیه خود می‌رسد، تعریف شده و با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید [۵]:

$$L_p = \frac{1}{2\{Im(\beta)\}} \quad (1)$$

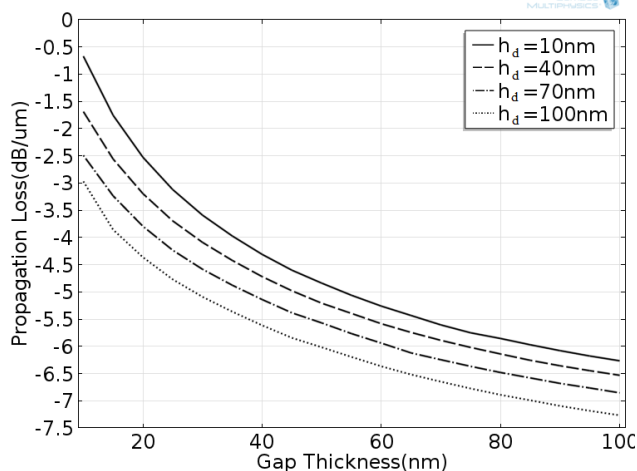
که در این رابطه β ثابت انتشار مختلط است. همچنین سطح موثر مد به صورت نسبت کل توان مدهای منتشر شده، P_m ، به مقدار ماکزیمم چگالی توان، $W(r)$ ، تعریف می‌شود و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۶]:

$$A_m = \frac{P_m}{\max\{W(r)\}} = \frac{1}{\max\{W(r)\}} \iint_{-\infty}^{+\infty} W(r) d^2r \quad (2)$$

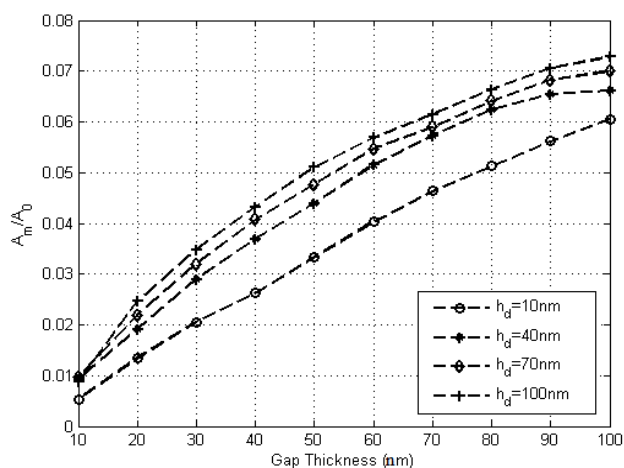
در نتایج بدست آمده اندازه سطح موثر مد توسط مقدار $\frac{\lambda^2}{4}$ نرمالیزه می‌شود. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار Comsol و برای طول موج $1/55 \mu\text{m}$ انجام شده است.

۲-۱- بررسی تاثیر تغییر ابعاد بر پارامترهای موجبر

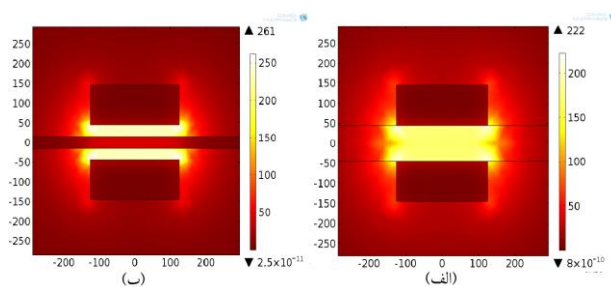
شکل ساختار و ابعاد لایه‌های موجبر از عوامل موثر بر عملکرد آن است. در ابتدا به منظور بررسی تاثیر تغییر ابعاد تیغه‌های فلزی بر عملکرد موجبر، پارامترهای انتشاری را در صورت تغییر ابعاد تیغه‌های فلزی مورد بررسی قرار می‌دهیم. ضخامت لایه دی‌الکتریک و ارتفاع شکاف را 30 nm در نظر گرفته‌ایم. شکل‌های ۲ و ۳ مقادیر طول انتشار و تلفات انتشار موجبر را بر حسب تغییرات ارتفاع و عرض تیغه‌های فلزی نشان می‌دهد. در شکل ۳ نمودار تلفات انتشار موجبر به صورت نرمالیزه بدست آمده است. مقایسه این نمودار با نتایج بدست آمده در شکل ۲ نشان می‌دهد افزایش عرض تیغه فلزی باعث کاهش تلفات انتشار موجبر و در نتیجه افزایش طول انتشار می‌شود. البته با توجه به نمودار شکل ۲ برای ارتفاع لایه فلزی بیش از 100 nm افزایش طول انتشار زیاد نیست. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد افزایش ابعاد تیغه‌های فلزی سبب افزایش طول انتشار و سطح موثر مد موجبر می‌شود. از طرفی با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۴ مقدار سطح موثر مد برای ارتفاع تیغه‌های فلزی 150 nm و 200 nm تقریباً یکسان است. به همین علت در ادامه عرض تیغه‌های فلزی 250 nm و ارتفاع هر تیغه 100 nm در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: نمودار تلفات انتشار بر حسب تغییرات ضخامت لایه دی الکتریک و ارتفاع شکاف



شکل ۷: نمودار مقدار نرمالیزه شده سطح موثر مد بر حسب تغییرات ضخامت لایه دی الکتریک و ارتفاع شکاف



شکل ۸: توزیع میدان الکتریکی (الف) ساختار MIM، (ب) ساختار پیشنهادی

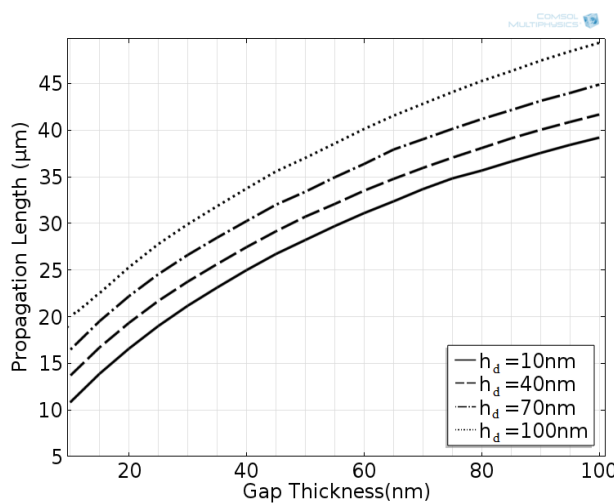
۲-۲- بررسی تاثیر تغییر مواد بر پارامترهای موجبر

در ساختار موجبر پلاسمونی هیبریدی با توجه به اینکه مدهای ترکیبی از ترویج مدهای پلاسمونی حاصل از انتشار پلاسمونهای سطحی در مرز فلزیدی الکتریک و مدهای دی الکتریکی در ناحیه با ضریب دی الکتریک پایین منتشر می شوند، خواص و پارامترهای مواد

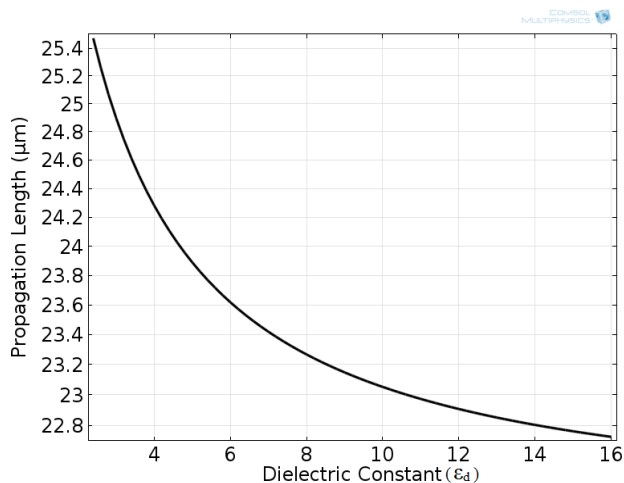
ضخامت لایه دی الکتریک میانی (h_d) و ارتفاع شکاف میان تیغه های فلزی و لایه دی الکتریک (h_g) از دیگر عوامل موثر بر پارامترهای انتشاری موجبر به شمار می روند. شکل ۵ تغییرات طول انتشار موجبر برای مقادیر مختلف ارتفاع شکاف و ضخامت لایه دی الکتریک را نشان می دهد. همانطور که در این شکل واضح است افزایش ضخامت لایه دی الکتریک و همچنین ارتفاع شکاف منجر به افزایش طول انتشار موجبر می شود. اما باید به این نکته اشاره کرد که افزایش ارتفاع شکاف نسبت به افزایش ضخامت لایه دی الکتریک تاثیر بیشتری بر افزایش طول انتشار دارد. از طرفی با توجه به رابطه عکس میان طول انتشار و تلفات انتشار موجبر، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش ضخامت لایه دی الکتریک و همچنین ارتفاع شکاف میزان تلفات انتشار کاهش می یابد.

در شکل ۷ تغییرات سطح موثر مد بر حسب ضخامت لایه دی الکتریک و ارتفاع شکاف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود افزایش ارتفاع شکاف تاثیر زیادی بر افزایش سطح موثر مد دارد. با این وجود نتایج بدست آمده نشان می دهد مقدار نرمالیزه شده سطح موثر مد برای ارتفاع لایه شکاف ۱۰nm و ضخامت لایه دی الکتریک ۱۰nm برابر ۰/۰۰۶ است.

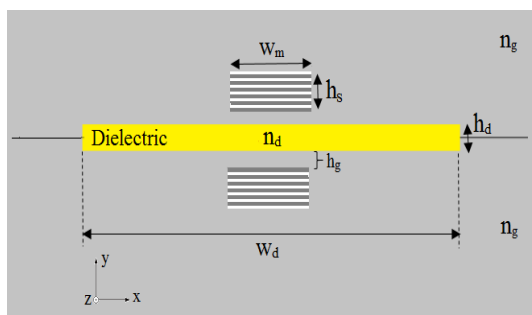
به منظور مقایسه ساختار ارائه شده در شکل ۱ موجبر MIM توزیع نرم میدان الکتریکی در این دو ساختار با ابعاد یکسان در شکل ۸ نشان داده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می دهد در حالی که طول انتشار موجبر در دو موجبر تقریباً ثابت مانده است، مقدار نرمالیزه شده سطح موثر مد در ساختار شکل ۱ نسبت به حالت ساختار MIM در حدود دو برابر کاهش یافته است. شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد این پارامتر برای ساختار MIM برابر ۰/۰۴ است در حالی که مقدار آن برای ساختار پیشنهادی ۰/۰۲ بدست آمده است.



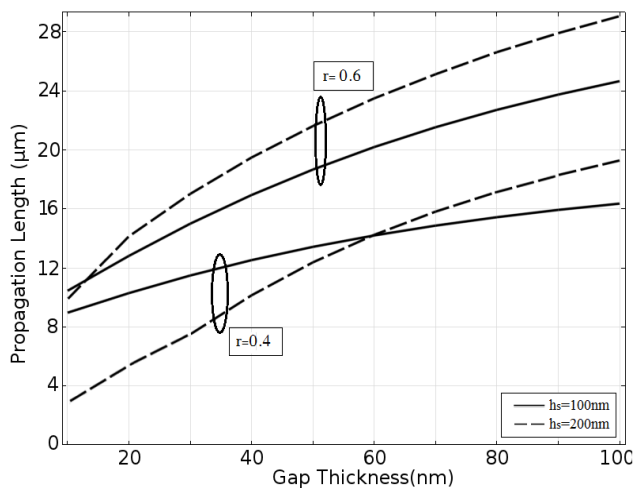
شکل ۹: نمودار طول انتشار بر حسب تغییرات ضخامت لایه دی الکتریک و ارتفاع شکاف



شکل ۹: نمودار طول انتشار بر حسب تغییرات ضریب شکست لایه دی الکتریک



شکل ۱۰: ساختار موجبر با تیغه‌های متناوب



شکل ۱۱: نمودار طول انتشار بر حسب تغییرات ارتفاع شکاف در ساختار موجبر با تیغه‌های متناوب

در شکل ۱۲ نیز نمودار سطح موثر مد برای این ساختار نشان داده شده است. در این حالت مقدار نرمالیزه شده سطح موثر مد بهبود یافته است. این پارامتر برای ارتفاع شکاف و ضخامت لایه دی الکتریک ۳۰nm به ۰/۰۰۶ برای ارتفاع شکاف و ضخامت لایه دی الکتریک ۱۰nm به ۰/۰۰۵ کاهش یافته است.

موجود در لایه های مختلف این موجبر ها بر انتشار مدهای پلاسمونی موثر است. از این رو تاثیر تغییر مواد لایه‌های مختلف موجبر در مقادیر طول انتشار و سطح موثر مد را مورد بررسی قرار داده‌ایم. شکل ۹ نمودار طول انتشار موجبر را بر حسب تغییرات ضریب شکست لایه دی الکتریک نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با توجه به کم بودن ضخامت لایه دی الکتریک تغییر ماده بکار رفته در این لایه تاثیر زیادی بر روی عملکرد موجبر ندارد. در این حالت دامنه تغییرات طول انتشار برای تغییرات ضریب شکست ماده دی الکتریک تنها در حدود سه میکرومتر است. با این وجود با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که وجود لایه دی الکتریک میانی با وجود ثابت نگه داشتن طول انتشار موجبر مقدار سطح موثر مد را در حدود دو برابر کاهش می‌دهد.

با توجه به تلفات اهمی ایجاد شده ناشی از حضور فلز در ساختار موجبرهای پلاسمونی، استفاده از فلزات مختلف می‌تواند سبب تغییر طول انتشار موجبر شود. در این بخش به منظور کاهش بیشتر سطح موثر مد، از یک ساختار متناوب به جای تیغه‌های فلزی استفاده می‌کنیم.

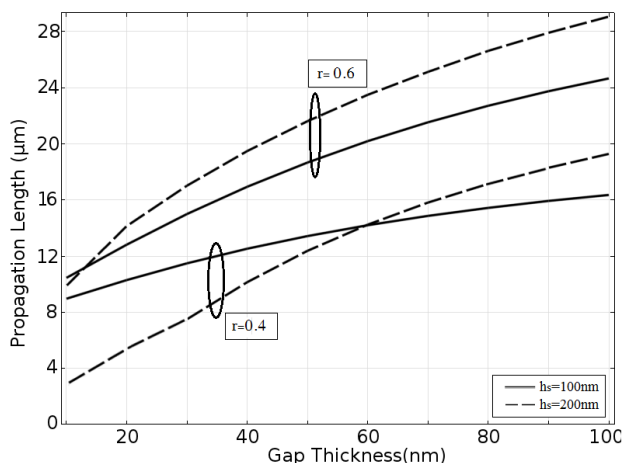
شکل ۱۰ ساختار موجبر با تیغه‌های متناوب را نشان می‌دهد. در این ساختار لایه‌های فلز و دی الکتریک به طور متناوب بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. ارتفاع لایه‌های فلزی h_m و ارتفاع لایه‌های دی الکتریک h_n است. این ساختار متناوب را می‌توان به صورت یک ساختار همگن در نظر گرفت. عناصر اصلی تانسور ضریب گذردهی نسبی الکتریکی آن با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است [۷]:

$$\epsilon_x = \epsilon_z = r\epsilon_m + (1-r)\epsilon_n \quad (3)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_n\epsilon_m + [r\epsilon_n + (1-r)\epsilon_m]$$

که در آن r نسبت فلز بکار رفته در ساختار متناوب است. ϵ_m ضریب گذردهی نسبی فلز و ϵ_n ضریب گذردهی نسبی دی الکتریک بکار رفته در تیغه‌های متناوب است. جنس لایه دی الکتریک استفاده شده در تیغه‌های متناوب تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) با ضریب شکست $n=2/45$ بوده و در محاسبات انجام شده مقدار $0/6$ و $0/4$ r در نظر گرفته شده است. همچنین برای مقایسه نتایج بدست آمده در این حالت با نتایج حالت قبل برای ارتفاع تیغه‌های متناوب دو مقدار 100nm و 200nm در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۱ نمودار طول انتشار برای ساختار فوق را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود به علت استفاده از تیغه‌های متناوب طول انتشار مقدار کمی کاهش داشته است. البته در صورتی که ارتفاع تیغه‌های فلزی بیشتر از 100nm انتخاب شود و یا نسبت فلز بکار رفته در ساختار متناوب بیشتر شود طول انتشار موجبر مشابه حالت قبل خواهد بود.



شکل ۱۲: نمودار سطح موثر مد بر حسب تغییرات ارتفاع شکاف در ساختار موجبر با تیغه‌های متناوب

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار ترکیبی از موجبر پلاسمونی MIM معرفی شده است. نتایج شبیه سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد سطح موثر مد موجبر نسبت به ساختار موجبر MIM در حدود دو برابر کاهش یافته است در حالیکه طول انتشار تغییری نداشته است. علاوه بر این نشان داده شده است، استفاده از تیغه‌هایی با ساختار متناوب با توجه به مقدار فلز بکار رفته در آن اگر چه سبب کاهش طول انتشار می‌شود اما باعث بهبود سطح موثر مد می‌شود. همچنین در این حالت با افزایش ارتفاع شکاف مقدار سطح موثر مد با شیب کمتری نسبت به حالت قبل افزایش دارد. در شبیه - سازی‌های انجام شده مقدار نرمالیزه سطح موثر مد با استفاده از ساختار متناوب به ۰/۰۵ کاهش یافته است.

مراجع

- [1] Q. Huang, F. Bao, and S. He, "Nonlocal effects in a hybrid plasmonic waveguide for nanoscale confinement," *Opt. Express*, vol. 21, No. 2, pp. 1430-1439, 2013.
- [2] S. Belan, S. Vergles, and P. Vorobev, "Adjustable subwavelength localization in a hybrid plasmonic waveguide," *Opt. Express*, vol. 21, No. 6, pp. 7427-7438, 2013.
- [3] Ch. Jeong, M. Kim, and S. Kim, "Circular hybrid plasmonic waveguide with ultra-long propagation distance," *Opt. Express*, vol. 21, No. 14, pp. 17404-17412, 2013.
- [4] Material parameters are extrapolated using data from <http://refractiveindex.info>.
- [5] S. A. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. New York: Springer, 2007.
- [6] R. F. Oulton, V. J. Sorger, D. A. Genov, D. F. P. Pile, and X. Zhang, "A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation," *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 496-500, 2008.
- [7] G. Hui, L. Y. Min, Y. Z. Yuan, W. Xiu, and Y. H. Zhi, "Hybrid plasmonic waveguides with metamaterial substrate and dielectric substrate: A contrastive study," *Chin. Phys. B*, vol. 23, pp. 465-500, 2014.