

بررسی اثر ضخامت لایه تجمع بار در یک مدولاتور جذبی مبتنی بر ماده با خواص ضریب گذردهی نزدیک صفر

جلیل مظلوم^{۱*} بهرنگ هادیان سیاهکل محله^۲ هومن اکبرزاده خشکه رود^۳ سید امین اله ایزدی اونچی^۴

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

Jalil.mazloun@ssau.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

۳- مربی- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

۴- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

چکیده: در این مقاله، عملکرد یک مدولاتور نوری مبتنی بر ماده‌ای با خواص ضریب گذردهی نزدیک صفر (ایندیوم تین اکساید) در باند فرکانسی مخابرات نوری به ازای ضخامت‌های متفاوت لایه تجمع بار بررسی می‌شود. در این مدولاتور از طرح خازن فلز-اکسید-نیمه‌هادی برای تغییر بار الکتریکی در لبه دی‌الکتریک و ایندیوم تین اکساید استفاده می‌شود. از حل‌کننده مد انتشاری برای یافتن پارامترهای اساسی مدولاتور استفاده می‌شود. در این مقاله از یک مدل رایج برای معرفی لایه تجمع بار در ایندیوم تین اکساید استفاده می‌شود. پاسخ به دست آمده وجود یک بیشینه در نمودار تلفات الحاقی در ولتاژ ۲/۳ ولت با ضخامت لایه ۱ نانومتر را نشان می‌دهد. این مقدار حدود $8/4 \text{ dB}/\mu\text{m}$ است. نتایج به دست آمده از تغییرات ضخامت لایه‌های ایندیوم تین اکساید و دی‌الکتریک استفاده شده، افت میزان تلفات و نرخ خاموشی به ازای افزایش آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین افزایش ضخامت بار الکتریکی در ایندیوم تین اکساید باعث افزایش ولتاژ خاموشی در مدولاتور می‌شود. در ضمن این کار میزان تلفات الحاقی را نیز افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدولاتور نوری، ایندیوم تین اکساید، اثر ضخامت لایه بار، حل‌کننده مد انتشاری، تلفات الحاقی، نرخ خاموشی

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جلیل مظلوم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - بزرگراه آیت‌الله سعیدی - خیابان دانشگاه هوایی - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری -

دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

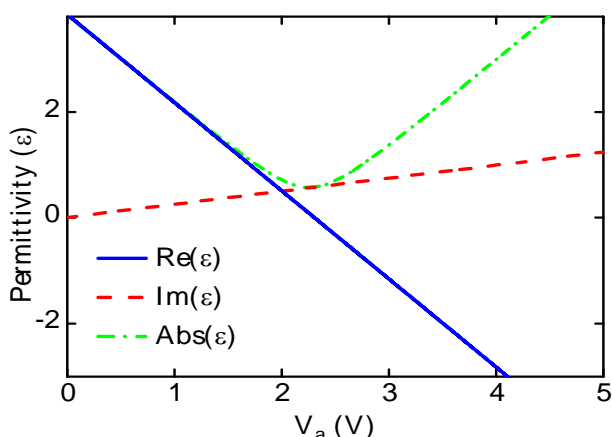
مدارهای مجتمع فوتونیک در دهه‌های اخیر، در کاربردهای مخابرات نوری داده، حسگری و تصویربرداری، پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته است [۱]، [۲]. اکنون، غالب توجه محققان صرف کوچک کردن ابعاد و کاهش توان مصرفی ادوات فوتونیک می‌شود. سیلیکون فوتونیک^۱ به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده برای سامانه‌های مخابرات نوری تلقی می‌شود. مدولاتورهای رایج مبتنی بر موجبرهای سیلیکونی از تغییر یکی از موارد تغییر ضریب شکست مؤثر و ویژگی جذبی ماده برای مدولاسیون نور عبوری درون افزاره استفاده می‌کند. به دلیل ضعف اثر پراکندگی پلاسما سیلیکون و نیز محدودیت پراش موجبرهای سیلیکونی، مدولاتورهای ماخ-زندر^۲ سیلیکونی از داشتن ردپای بزرگ در حدود $10^4 \mu\text{m}^2$ رنج می‌برد [۳]. مدولاتورهای مبتنی بر تشدیدکننده رینگ شکل با فاکتور Q بالا، در قیاس با مدولاتورهای ماخ-زندر ردپای کوچک‌تری دارند ($10^2 \mu\text{m}^2$)؛ اما به دلیل داشتن پهنای باند کم، نسبت به تغییرات دما بسیار حساس‌اند [۴].

علم پلاسمونیک می‌تواند راه مناسبی برای کاهش ابعاد ادوات نوری و نیز کم کردن محدودیت‌های پراش فراهم می‌کند [۵]. به‌عنوان مثال، مدولاتور شکافی کاملاً سازگار به فناوری CMOS^۳ و نیز مدولاتور پلاسمونیک با استفاده از سیلیکون به‌عنوان ماده فعال در مراجع [۶]، [۷] معرفی شده‌اند که توانسته‌اند به تمرکز بالایی از در میدان الکتریکی در مدولاتور دست یابند. درحالی‌که هنوز مدولاتورهای پلاسمونیک مبتنی بر سیلیکون، به دلیل کم بودن اثر پراش‌های حامل‌های آزاد در لایه سیلیکون، محدودیت‌های خاص خود را دارند.

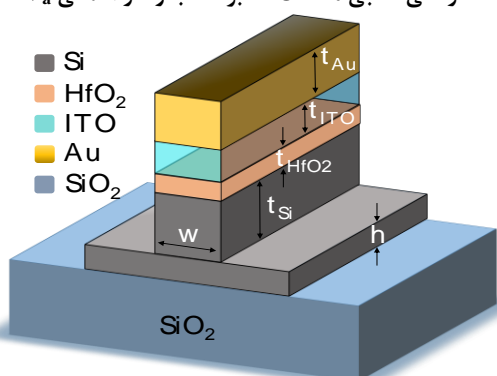
در این مقاله، عملکرد یک مدولاتور نوری مبتنی بر ماده ITO بررسی می‌شود که از ساختار خازن MOS^۴ برای کارکرد خود استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی این مدولاتور از حل‌کننده مد انتشاری مبتنی بر اجزای محدود استفاده می‌شود. این مدولاتور در ولتاژی حدود $2/3$ به حداکثر میزان تلفات معادل $8/38 \text{ dB}/\mu\text{m}$ می‌رسد. در ادامه جزئیات میدان الکتریکی در ولتاژهای مختلف بررسی می‌شود. سپس اثرات تغییرات ضخامت لایه‌ها بررسی خواهد شد. درنهایت ضخامت لایه تجمع بار در ایندیوم تین اکساید بررسی می‌شود. نتایج، افزایش میزان تلفات را در این حالت نشان می‌دهد.

۲- بررسی خواص الکترو-اپتیک ITO

به‌طور کلی برای بررسی عملکرد مدولاتور، در ابتدا باید اثر تجمع حامل‌ها در ITO را بررسی نمود. در این مقاله ITO نقش ماده فعال را در ساختار ایفا می‌کند. معمولاً چگالی حامل‌ها در ITO وقتی در ساختار MOS قرار می‌گیرد قابل تنظیم است [۱۴]. ITO ماده‌ای است که هدایت الکتریکی بالایی دارد و نیز فرکانس پلاسما^۵ آن تحت اعمال ولتاژ قابل تغییر است.



شکل (۱): منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی، موهومی اندازه ضریب گذردهی نسبی ماده ITO بر حسب ولتاژ اعمالی V_a



شکل (۲): شمای کلی ساختار مدولاتور نوری مبتنی بر ماده ITO

پس می‌توان با اعمال ولتاژ تجمع حامل‌ها در مرز این ماده را کنترل نمود [۱۵]. با استفاده از این ویژگی می‌توان خواص نوری ITO را به‌سادگی تغییر داد. ضریب گذردهی نسبی ماده ITO را می‌توان با استفاده مدل Drude به‌صورت زیر نوشت [۱۶]:

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

به‌نحوی که $\epsilon_\infty = 9/3$ ثابت دی‌الکتریک فرکانس بالا است، γ نرخ پراکندگی الکترون‌ها است که برابر $1/8 \times 10^{14}$ رادیان بر ثانیه است، ω همان فرکانس زاویه‌ای نور است و ω_p نیز فرکانس زاویه‌ای پلاسما نامیده می‌شود. مقدار فرکانس زاویه‌ای پلاسما تابعی از مقدار تجمع الکترون‌ها درون ITO است که می‌توان به‌صورت بیان نمود [۱۶]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}} \quad (1)$$

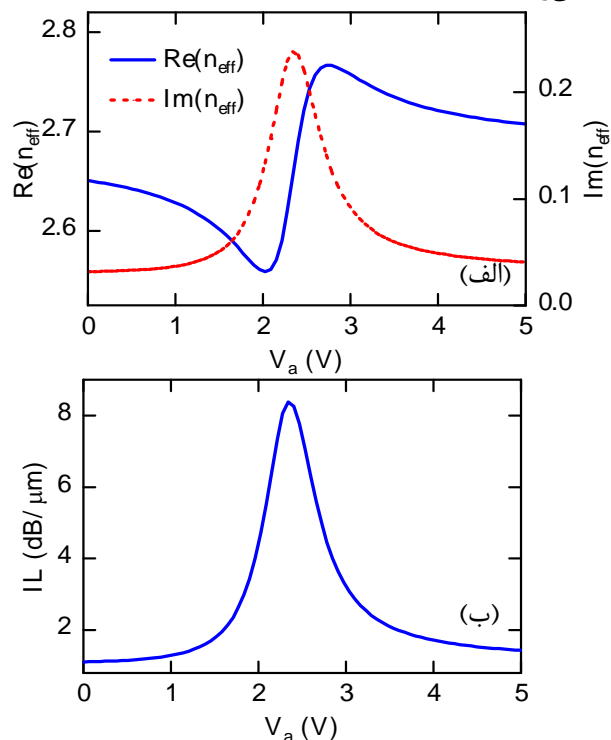
درحالی‌که $m = 0/35 m_0$ است و m_0 جرم الکترون است. E نیز همان بار الکترون در نظر گرفته می‌شود. ϵ_0 ضریب گذردهی خلأ است. تجمع الکترون^۶ تابعی از ولتاژ اعمالی و طرح ساختار پیشنهادی است. یک مدل ساده^۷ شده از این ارتباط در مرجع [۱۷] استفاده شده که تقریب خوبی از تجمع الکترون^۸‌ها است. اگرچه که یک مدل بسیار دقیق در مرجع [۱۸] ارائه شده است. تفاوت مقادیر به‌دست‌آمده در این دو مدل کمتر از ۵ درصد است، به همین سبب برای ارائه ارتباط تجمع بار درون ITO و ولتاژ از مدل ساده^۹‌تر استفاده خواهد شد.

در ساختار MOS معمولاً از HfO_2 به عنوان لایه اکسید استفاده می شود. با فرض ارتباط بین تعداد الکترون ها در لایه تجمع ITO با ولتاژ اعمالی به صورت زیر است [۱۷]:

$$n = n_0 + \frac{\epsilon_0 k_{\text{HfO}_2} V_a}{e t_{\text{HfO}_2} t_{\text{acc}}} \quad (3)$$

به نحوی که $k_{\text{HfO}_2} = 25$ گذردهی DC ماده HfO_2 است و $t_{\text{HfO}_2} = 5 \text{ nm}$ ضخامت ماده اکسید است. مطابق با مرجع مقدار $t_{\text{acc}} = 1$ نانومتر در نظر گرفته می شود. مقدار دوپینگ^۶ پیش فرض n_0 در این ماده 10^{19} cm^{-3} در نظر گرفته شده است.

با استفاده از روابط **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** تغییرات قسمت های حقیقی و موهومی و نیز اندازه گذردهی نسبی ITO بر حسب ولتاژ (۰-۵ ولت) در شکل (۱) ترسیم شده است. در این شکل مقدار طول موج 1550 نانومتر فرض شده است. همان طور که دیده می شود در ولتاژی حدود $2/3$ ولت مقدار قسمت حقیقی ضریب گذردهی ITO به صفر نزدیک می شود. به ازای چنین ولتاژی ITO به ناحیه گذردهی نزدیک صفر می رسد. با عبور از چنین ولتاژی ITO از دی الکتریک به فلز تغییر رفتار می دهد [۱۹]. به طور تقریبی بازه $1-1$ الی 1 در ضریب گذردهی، ناحیه گذردهی نزدیک صفر گفته می شود. این بازه در موادی از قبیل ایندیوم تین اکساید رایج است. به وضوح می توان دید که مقدار قسمت موهومی ITO از $0/009$ در ولتاژ صفر به مقدار $0/577$ در ولتاژ $2/3$ ولت می رسد.



شکل (۳): (الف) تغییرات بخش حقیقی و موهومی ضریب شکست مؤثر ساختار بر حسب ولتاژ. (ب) نمودار تلفات الحاقی ساختار برای ولتاژهای مختلف

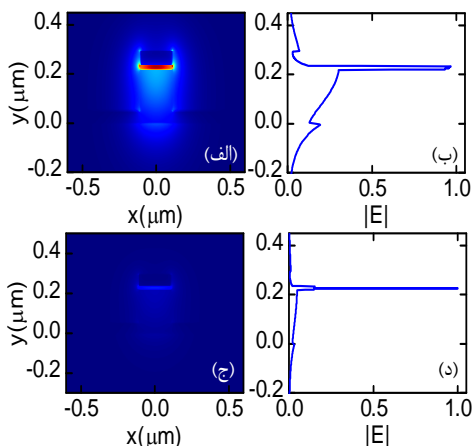
با توجه به رابطه شماره **Error! Reference source not found.** مقدار ولتاژ حد را می توان با تغییر دوپینگ ذاتی و نیز استفاده از اکسید متفاوت تغییر داد. این خاصیت می تواند در به کارگیری این ماده به عنوان ماده اساسی در مدولاتورهای الکترو-جذبی^۷ بسیار مفید باشد.

۳- بررسی ساختار و نتایج شبیه سازی

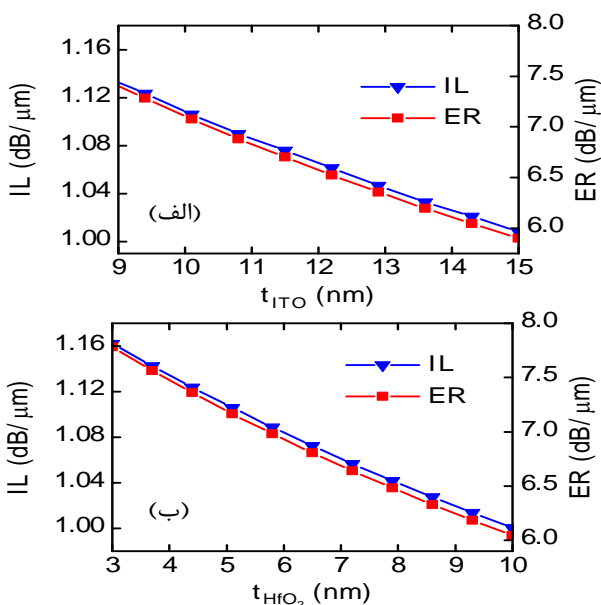
شکل (۲) نمای ۳ بعدی از ساختار مدولاتور جذبی را نشان می دهد. این ساختار از پشته ای شامل مواد $\text{Au}/\text{ITO}/\text{HfO}_2/\text{Si}$ تشکیل می شود که بر روی بستری از جنس SiO_2 قرار گرفته است.

مقدار ضریب شکست Si ، HfO_2 و SiO_2 به ترتیب برابر با $3/48$ ، $1/98$ و $1/44$ در نظر گرفته شده است. در این ساختار لایه ITO با ضخامت t_{ITO} مابین دو لایه Au با ضخامت t_{Au} و HfO_2 با ضخامت t_{HfO_2} به صورت ساندویچی قرار گرفته است. عرض موجبر نیز w در نظر گرفته شده است. در این ساختار با هدف اینکه بتوان مقدار تجمع حامل ها را درون ماده ITO کنترل نمود، ساختار MOS در بخش بالایی موجبر سیلیکونی تشکیل شده است. برای اینکه بتوان عملکرد مدولاتور را بررسی و پارامترهای اساسی را استخراج کرد، از حل کننده مد انتشاری استفاده شده است که از روش عددی اجزای محدود (FEM^8) بهره می گیرد. شبیه سازی ها به صورت دوبعدی انجام می شود و شرایط مرزی در اطراف، لایه کاملاً جاذب (PML^9) در نظر گرفته می شود.

پارامترهایی از قبیل تغییرات ضریب شکست مؤثر (n_{eff})، تلفات الحاقی (IL^1) و نرخ خاموشی (ER^{11}) به عنوان خروجی مدنظر است. در شبیه سازی ها از مدل غیریکنواخت در مش بندی استفاده کرده ایم. حداکثر اندازه مش 10 نانومتر و حداقل آن 1 نانومتر در نظر گرفته شد. در مورد شبیه سازی ها می توان ذکر کرد که از شرایط مرزی PEC



شکل (۴): (الف) پروفایل اندازه میدان الکتریکی مدولاتور نوری در ولتاژ صفر ولت، (ب) اندازه میدان الکتریکی در برش عرضی عمودی ساختار در ولتاژ صفر ولت، (ج) پروفایل اندازه میدان الکتریکی مدولاتور نوری در ولتاژ ۲/۳ ولت، (د) اندازه میدان الکتریکی در برش عرضی عمودی ساختار در ولتاژ ۲/۳ ولت



شکل (۵): (الف، ب) تغییرات تلفات الحاقی و نرخ خاموشی مدولاتور به ازای تغییرات ضخامت‌های لایه ITO و HfO₂

در این تصاویر به‌وضوح دیده می‌شود که با اعمال ولتاژ شدت میدان به‌طور ناگهانی در مرز بین ماده ITO و دی‌الکتریک HfO₂ افزایش می‌یابد. عرض ناحیه‌ای که شدت میدان زیاد شده دقیقاً برابر با ضخامت ناحیه تجمع بار در ITO است (۱ نانومتر). طبق قانون پیوستگی جابجایی الکتریکی ($D=\epsilon E$) اندازه میدان الکتریکی را در مرز دی-الکتریک و ITO می‌توان به‌صورت زیر نوشت:
از آنجاکه در این ناحیه در ولتاژ $V_a=2/3$ V مقدار ضریب گذردهی ITO نزدیک صفر است، به همین سبب شدت میدان در مرز ناحیه

در صورتی که فاصله‌ی از محل تجمع میدان داشته باشد، استفاده کرد. اگر کم باشد بر روی پاسخ تأثیر منفی می‌گذارد. از خواص استفاده از PEC^{۱۲} به‌عنوان شرایط مرزی می‌توان به کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها اشاره کرد. مقدار تلفات الحاقی را می‌توان با استفاده از مقدار قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر محاسبه نمود. بدین صورت تلفات الحاقی برابر است با [۲۰]:

$$IL = 10 \left| \log_{10} \frac{-4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda} \right| \quad (۴)$$

که λ همان طول موج کاری برحسب μm است. واحد تلفات به‌دست آمده $\text{dB}/\mu\text{m}$ خواهد بود.

شکل (۳) تغییرات ضریب شکست مؤثر برحسب ولتاژ اعمالی را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر ساختاری که عبارت است از ضخامت $t_{\text{ITO}} = 10$ nm، $t_{\text{Au}} = 60$ nm ضخامت لایه‌ی HfO₂ 5 نانومتر، $t_{\text{Si}} = 170$ nm و $h = 50$ nm قرار داده‌شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ضخامت ناحیه تجمع بار در لایه ITO، 1 nm در نظر گرفته‌شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر تا ولتاژ ۲/۳ ولت افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با استفاده از رابطه **Error! Reference source not found.** می‌توان مقدار تلفات را به دست آورد. شکل ۳ (ب) تغییرات تلفات را برحسب ولتاژ اعمالی نشان می‌دهد. مقدار تلفات از $1/1$ $\text{dB}/\mu\text{m}$ در ولتاژ صفر ولت به مقدار $8/38$ $\text{dB}/\mu\text{m}$ در ولتاژ ۲/۳ ولت می‌رسد. همان‌طور که توقع داشتیم مقدار تلفات در ولتاژی حدود ۲/۳ ولت به حداکثر مقدار خود ($8/38$ $\text{dB}/\mu\text{m}$) می‌رسد. اصطلاحاً گفته می‌شود مدولاتور در ولتاژ اعمالی صفر ولت در "حالت روشن" و در ولتاژ ۲/۳ ولت در "حالت خاموش" قرار دارد. به عبارتی در این ساختار با اعمال ۲/۳ ولت، می‌توان عبور نور داخل مدولاتور تا بیش از 10^7 برابر کاهش داد. به این سبب است که گفته می‌شود مدولاتور در حالت خاموش قرار دارد.

برای درک بهتر عملکرد مدولاتور و نیز کارکرد ITO در آن توزیع‌های میدان الکتریکی در دو حالت روشن و خاموش در شکل ۴ ترسیم شده است. شکل ۴ (الف) توزیع میدان الکتریکی در حالت روشن را در ساختار مدولاتور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشتر تجمع میدان در ناحیه دی‌الکتریک (HfO₂) قرار دارد رخ داده است. شکل ۴ (ب) برش عرضی میدان الکتریکی در حالت روشن را نشان می‌دهد و در این شکل می‌توان تغییرات میدان را در ساختار به‌وضوح دید. شکل‌های ۴ (ج) نیز پروفایل میدان را در حالت خاموش نشان می‌دهد.

$$|E_{\text{ITO}}| \approx \frac{|\epsilon_d E_d|}{|\epsilon_{\text{ITO}}|} \quad (۲)$$

رسیدن به ناحیه نزدیک صفر در ITO باید به میزان تجمع در حدود $10^{20} \text{ cm}^{-3} \times 6/5$ دست یابیم. برای جبران کاهش بار، نیاز به افزایش ولتاژ اعمالی برای رسیدن به ناحیه نزدیک صفر وجود دارد. برای بیان چنین رفتاری، اثر ضخامت t_{acc} در دو حالت ۱ و ۲ نانومتر در شکل (۶) بررسی شده است. همان طور که مشخص است مقدار بیشینه تلفات به ازای ضخامت ۱ نانومتر در ولتاژ $2/3$ ولت رخ می دهد. در حالی که در ضخامت ۲ نانومتر، در ولتاژ $4/8$ ولت اتفاق می افتد. این قضیه تئوری قبلی را تأیید می کند. همچنین افزایش ضخامت لایه تجمع باعث افزایش میزان تلفات در نقطه‌ی بیشینه می شود. با دو برابر کردن t_{acc} ، مقدار بیشینه جذب به بیش از ۲ برابر مقدار قبلی خود رسانده است. دلیل این اتفاق را می توان در بیشتر شدن اثر فلزی قسمت تجمع بار در ITO و به تبع آن افزایش قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر ساختار جستجو کرد. در این حالت مقدار ضریب شکست مؤثر در بیشینه برابر با $i0/447 + 2/644$ به دست آمده است. در حالی که طبق شکل ۳ مقدار آن در بیشینه‌ی خود $i0/238 + 2/65$ بوده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد یک مدولاتور نوری مبتنی بر ماده ITO بررسی و شبیه سازی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که به ازای ولتاژ $2/3$ ولت مقدار گذرده‌ی نسبی ITO به ناحیه نزدیک صفر می رسد و باعث بروز تلفات زیادی در مدولاتور می شود. حداکثر میزان تلفات برابر $8/38 \text{ dB}/\mu\text{m}$ است. پروفایل های میدان نشان می دهند که با افزایش ولتاژ از صفر به $2/3$ ولت عرض ناحیه تشدید میدان به ضخامت ناحیه تجمع بار نزدیک می شود. همچنین اثرهای ضخامت پارامترهای ساختاری نیز بررسی شد. به علاوه نتایج نشان داد با دو برابر کردن ضخامت تجمع بار ولتاژ خاموشی از $2/3$ به $4/8$ ولت می رسد. همچنین میزان بیشینه تلفات تقریباً دو برابر می شود.

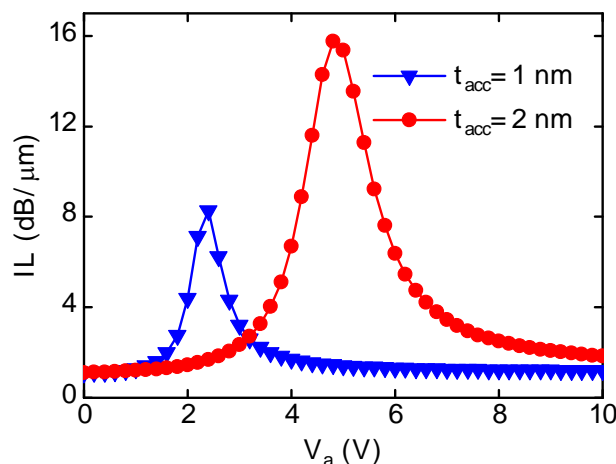
مراجع

- [1] Y. Bian et al., "Guiding of Long-Range Hybrid Plasmon Polariton in a Coupled Nanowire Array at Deep-Subwavelength Scale," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 24, no. 15, pp. 1279-1281, Aug. 2012.
- [2] L. Yu, Y. Yin, Y. Shi, D. Dai, and S. He, "Thermally tunable silicon photonic microdisk resonator with transparent graphene nanoheaters," Optica, vol. 3, no. 2, p. 159, Feb. 2016.
- [3] L. Liao et al., "High speed silicon Mach-Zehnder modulator," Opt. Express, vol. 13, no. 8, pp. 3129-3135, Apr. 2005.
- [4] P. Dong et al., "Wavelength-tunable silicon microring modulator," Opt. Express, vol. 18, no. 11, pp. 10941-10946, May 2010.
- [5] G. Moradi, A. Ghahremani, and R. Sarraf Shirzai, "Tunable Wideband Graphene based Filters in THz Band," J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng., vol. 16, no. 2, 2019.
- [6] S. Zhu, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, "Phase modulation in horizontal metal-insulator-silicon-insulator-metal plasmonic waveguides," Opt. Express, vol. 21, no. 7, p. 8320, Apr. 2013.

تجمع بار در ITO به شدت افزایش می یابد. این حقیقت با نتیجه که در شکل (۴) (د) به دست آمده هماهنگ است و آن را تصدیق می کند.

در این بخش قصد داریم اثر ضخامت لایه های ITO و HfO_2 را بر روی عملکرد مدولاتور پیشنهادی بررسی کنیم. همان طور که در شکل (الف) دیده می شود تغییر ضخامت لایه ITO از مقدار ۹ تا ۱۵ نانومتر، باعث تغییر به اندازه $0/12 \text{ dB}/\mu\text{m}$ در میزان تلفات در حالت روشن مدولاتور شده است. در بخش دیگر این نمودار اثر ضخامت لایه ITO بر روی نرخ خاموشی (ER) بررسی شده است. نرخ خاموشی، اختلاف بین میزان تلفات الحاقی در دو حالت روشن و خاموش مدولاتور را نشان می دهد. در شکل (الف) می توان دید که مقدار ER به اندازه $1/2 \text{ dB}/\mu\text{m}$ کاهش می یابد. با توجه به این نمودار می توان درک کرد برای داشتن ER بیشتر، باید ضخامت لایه ITO کم باشد. اما انتخاب مقدار کم ضخامت باعث افزایش IL می شود که برای مدولاتور نوری مقید نیست. به عبارت دیگر برای انتخاب ضخامت لایه ITO بین IL و ER مصالحه وجود دارد.

اثر تغییرات ضخامت لایه HfO_2 در شکل (ب) ترسیم شده است. همان طور که مشخص است رفتار نتایج به دست آمده شبیه به تغییرات لایه ITO است. با تغییر ضخامت لایه HfO_2 از ۳ تا ۱۰ نانومتر، مقادیر IL و ER به ترتیب $0/16$ و $1/73 \text{ dB}/\mu\text{m}$ کاهش می یابد. طبق این نمودار برای افزایش ER باید ضخامت لایه HfO_2 کم باشد. نکته ای در این حالت باید به آن توجه کرد ولتاژ فروشکست لایه دی الکتریک است. برای ماده HfO_2 در مرجع [۲۱] مقدار $15 \sim 40 \text{ MV}/\text{cm}$ به عنوان ولتاژ فروشکست آن ارائه شده است.



شکل (۶): نمودار تلفات بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت های

متفاوت لایه تجمع بار ITO

در این قسمت می خواهیم اثر ضخامت لایه تجمع بار بر روی پارامترهای خروجی مدولاتور نوری را بررسی کنیم. تمامی نمودارهای گزارش شده به ازای ضخامت تجمع بار ۱ نانومتر به دست آمده است. در ادامه ضخامت را تغییر می دهیم و اثر آن را می بینیم. طبق رابطه **Error! Reference source not found.** هرچه میزان ضخامت لایه تجمع بیشتر شود، مقدار بار جمع شده کاهش می یابد. برای

- ²Mach-Zehnder modulators
³Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
⁴Metal-Oxide-Semiconductor
⁵Plasma frequency
⁶Doping
⁷Electro-Absorption modulator
⁸Finite element method
⁹Perfectly matched layer
¹⁰Insertion loss
¹¹Extinction ratio
¹²Perfect Electrical Conductor

- [7]L. Jin, Q. Chen, W. Liu, and S. Song, "Electro-absorption Modulator with Dual Carrier Accumulation Layers Based on Epsilon-Near-Zero ITO," *Plasmonics*, vol. 11, no. 4, pp. 1087–1092, Aug. 2016.
- [8]B. H. Siahkhal-Mahalle and K. Abedi, "Ultra-compact low loss electro-optical nanobeam cavity modulator embedded photonic crystal," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 51, no. 5, Apr. 2019.
- [9]A. Khaleque and H. T. Hattori, "Plasmonic electro-absorption modulator and polarization selector," *J. Mod. Opt.*, vol. 64, no. 12, pp. 1164–1174, 2017.
- [10]G. Sinatkas, A. Pitilakis, D. C. Zografopoulos, R. Beccherelli, and E. E. Kriezis, "Transparent conducting oxide electro-optic modulators on silicon platforms: A comprehensive study based on the drift-diffusion semiconductor model," *J. Appl. Phys.*, vol. 121, no. 2, p. 23109, Jan. 2017.
- [11]V. J. Sorger, N. D. Lanzillotti-Kimura, R.-M. Ma, and X. Zhang, "Ultra-compact silicon nanophotonic modulator with broadband response," *Nanophotonics*, vol. 1, no. 1, Jan. 2012.
- [12]X. Niu, X. Hu, S. Chu, and Q. Gong, "Epsilon-Near-Zero Photonics: A New Platform for Integrated Devices," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 6, no. 10, p. 1701292, May 2018.
- [13]L. Han et al., "Broadband Optical Reflection Modulator in Indium-Tin-Oxide-Filled Hybrid Plasmonic Waveguide with High Modulation Depth," *Plasmonics*, vol. 13, no. 4, pp. 1309–1314, Aug. 2018.
- [14]P. P. Edwards, A. Porch, M. O. Jones, D. V Morgan, and R. M. Perks, "Basic materials physics of transparent conducting oxides," *Dalt. Trans.*, no. 19, p. 2995, 2004.
- [15]U. Koch, C. Hoessbacher, J. Niegemann, C. Hafner, and J. Leuthold, "Digital Plasmonic Absorption Modulator Exploiting Epsilon-Near-Zero in Transparent Conducting Oxides," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 1, Feb. 2016.
- [16]L. Tao, A. Anopchenko, S. Gurung, J. Zhang, and H. W. H. Lee, "Gate-Tunable Plasmon-Induced Transparency Modulator Based on Stub-Resonator Waveguide with Epsilon-Near-Zero Materials," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 2789, Dec. 2019.
- [17]C. Lin and A. S. Helmy, "Dynamically reconfigurable nanoscale modulators utilizing coupled hybrid plasmonics," *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 1, p. 12313, Dec. 2015.
- [18]A. Melikyan et al., "Surface plasmon polariton absorption modulator," *Opt. Express*, vol. 19, no. 9, p. 8855, Apr. 2011.
- [19]K. Fasihi, "Design and Simulation of a New Highly Sensitive Gas Sensor Based on Negative Refraction Photonic Crystal," *J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng.*, vol. 16, no. 2, 2019.
- [20]X. Qiu, X. Ruan, Y. Li, and F. Zhang, "Multi-layer MOS capacitor based polarization insensitive electro-optic intensity modulator," *Opt. Express*, vol. 26, no. 11, p. 13902, May 2018.
- [21]J. Yota, H. Shen, and R. Ramanathan, "Characterization of atomic layer deposition HfO₂, Al₂O₃, and plasma-enhanced chemical vapor deposition Si₃N₄ as metal-insulator-metal capacitor dielectric for GaAs HBT technology," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, 2013.

