

Research Paper

Fabrication and Study of Planar Waveguide Based on SU-8 Polymer using Different Substrates¹

Somaye Zare*² and Zahra Sadat Hosseini³

Received: 2022.04.12

Revised: 2022.05.29

Accepted: 2022.08.17

Abstract

In this work, the planar waveguides are investigated by depositing a SU-8 polymer on PET and quartz substrates. Maxwell equations are solved for the designed waveguides to obtain the characteristic equations. By solving these equations, the minimum thickness of SU-8 necessary for operation as a waveguide is found. Afterward, the waveguides are fabricated and characterized by profilometry and UV-Vis-IR spectroscopy. It is observed that SU-8 polymer shows suitable optical transmission. Then, the effective refractive index of the waveguide, as well as the wave propagation, is recognized by the finite element method. The results of simulations show that the total reflectance phenomenon that is required for a waveguide operation is occurring more effectively in the PET/SU-8 device than in the Quartz/SU-8 and in a waveguide configuration, it possesses better performance. Also, the flexibility and low cost of PET make it a proper candidate for substitution of the typical rigid substrate such as quartz.

Keywords: *SU-8 polymer, Substrate, Effective refractive index, Planar waveguide.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2022.40072.1274

²Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: sozare@acoj.org.ir

³Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. Email: zrhoneini@acoj.org.ir



ساخت و مطالعه ویژگی‌های موجبر صفحه‌ای بر پایه پلیمر SU-8 با زیرلایه‌های متفاوت^۱ سمیه زارع*^۲ و زهرا سادات حسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال سیزدهم، پیاپی ۳۲، بهار ۱۴۰۲

صص ۷-۲۰

چکیده:

در کار حاضر، موجبرهای صفحه‌ای بدست آمده از لایه‌نشانی پلیمر SU-8 بر روی دو زیرلایه PET و کوارتز بررسی می‌شوند. معادله‌های ماکسول را برای موجبرهای طراحی شده حل کرده تا معادله‌های مشخصه بدست آیند. از حل این معادله‌ها، کمینه ضخامت لازم SU-8 برای عملکرد به عنوان موجبر تعیین می‌گردد. سپس موجبرها ساخته شده و با دستگاه‌های پروفایلمتری و طیف‌سنجی UV-VIS-IR مشخصه‌یابی می‌شوند. مشاهده می‌شود که پلیمر SU-8 عبور نوری مطلوبی از خود نشان می‌دهد. در ادامه برای تعیین ضریب شکست موثر موجبر و روش انتشار موج از روش المان محدود استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پدیده بازتاب کلی که شرط اساسی موجبری است در افزاره PET/SU-8 نسبت به Quartz/SU-8 موثرتر رخ می‌دهد و در قالب موجبری عملکرد بهتری دارد. همچنین انعطاف‌پذیری و مقرون به صرفه بودن PET آن را جایگزین مناسبی برای زیرلایه‌های جامد متداول مانند کوارتز می‌سازد.
واژگان کلیدی: پلیمر SU-8، زیرلایه، ضریب شکست موثر، موجبر صفحه‌ای.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2022.40072.1274

^۲ استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

Email: sozare@aeoi.org.ir

^۳ استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

Email: zhoseini@aeoi.org.ir



۱. مقدمه

پیشرفت سریع ابزار ارتباطی، نیاز به ساختارهای فوتونیک جدید، جهت پردازش سریع تر داده‌ها، را مشهودتر کرده است. با توجه به اتلاف زیاد و سرعت انتقال پایین در مدارهای الکترونیکی، مدارهای نوری، جایگزین مناسبی برای آن‌ها هستند [۱, ۲]. مدار مجتمع نوری که نتیجه ترکیب افزارهای نوری مختلف؛ از قبیل مقسم، قطبش‌گر و مدولاتور بر روی یک تراشه می‌باشد، موجب کوچک‌سازی دستگاه‌های نوری شده است. قطعات تشکیل دهنده این مدار با استفاده از موجبرهای نوری به یکدیگر متصل می‌شوند. بنابراین با توجه به اهمیت موجبرهای نوری، پژوهشگران به دنبال ساخت موجبرهایی با مواد جدید هستند که هم توانایی موجبری مورد نیاز را دارا باشند و هم فرایند ساخت آن‌ها آسان و کم هزینه باشد. اتلاف کم، ویژگی‌های الکترواپتیکی و آکوستوآپتیکی مناسب، ضریب شکست قابل پایش، آسان و تکرارپذیر بودن فرایند ساخت، عمر طولانی لایه‌ها و پایداری در مقابل شرایط محیطی از ویژگی‌های مهمی است که یک موجبر نوری باید دارا باشد. مواد پلیمری ویژگی‌های منحصر به فردی همچون ضریب عبور بالا برای طول موج‌های مرئی تا مادون قرمز دور، پایداری دمایی و زمانی کافی و اتلاف نوری ناچیز دارند. این ویژگی‌ها، آن‌ها را به عنوان جایگزینی مناسب برای مواد غیرآلی مرسوم مانند گالیوم آرسناید (*GaAs*) در ساخت موجبرها معرفی کرده است. همچنین ویژگی‌های مکانیکی مطلوب پلیمرها فرایند ساخت موجبرها را آسان و مقرون به صرفه کرده است [۳-۶].

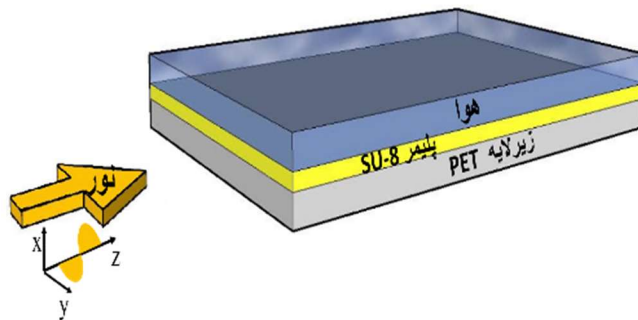
فرمولاسیون گسترده‌ای از پلیمرها وجود دارد که بازه وسیعی از ضخامت از $2 \mu m$ تا $300 \mu m$ را در یک مرحله لایه‌نشانی ممکن کرده است و حتی ضخامت‌های بیشتر به عنوان مثال $3 mm$ با چندین مرحله لایه‌نشانی قابل دستیابی است. بیشتر کارهای اولیه روی پلی متیل متاکریلات (PMMA) به عنوان ماده موجبر متمرکز بوده است [۷, ۸]. همچنین گروه‌های پژوهشی بسیاری، انواع مختلف پلیمرها را برای کاربردهای فوتونیک مورد بررسی قرار داده‌اند و با توجه به اینکه شرکت‌های زیادی در این زمینه فعال هستند، این پلیمرها به صورت تجاری در دسترس می‌باشند [۹-۱۳]. *SU-8* یک پلیمر فوتورزیست بر پایه اپوکسی و حساس به نور است که به دلیل ویژگی‌های ممتازش از جمله اتلاف اپتیکی کم به عنوان هسته موجبر انتخاب شده است. آنچنانکه میزان اتلاف آن در طول موج‌های 980 نانومتر، 1310 نانومتر و 1500 نانومتر به ترتیب برابر با $2 dBcm^{-1}$ ، $0.77 dBcm^{-1}$ و $1.71 dBcm^{-1}$ گزارش شده است [۱۴-۱۷]. در منبع [۱۸] موجبری این پلیمر بر روی سه زیرلایه متفاوت مقایسه شده و زیرلایه پلی اتیلن ترفتالات (*PET*) بهترین نمونه معرفی شده است.



از این رو، در این پژوهش کوآرتز و PET به عنوان زیرلایه برای پلیمر SU-8 در ساخت موجبر صفحه‌ای با هم مقایسه می‌شوند. موجبر صفحه‌ای، متداول‌ترین نوع موجبر برای ایجاد اتصال‌های داخلی در مدارهای مجتمع نوری است [۱۹-۲۲]. برای موجبر انتخابی، معادلات ماکسول با شرایط مرزی مشخص در هر سه دی الکتریک (هوا، هسته و زیرلایه) حل می‌شوند تا معادله‌های مشخصه موجبر به دست آیند، هوا غلاف موجبر فرض شده است. با حل عددی این معادله‌ها، کمینه ضخامت مطلوب برای هسته، ضریب شکست موثر و مدهای قابل انتشار در موجبر مشخص خواهند شد. سپس موجبر مورد نظر ساخته شده و عملکرد آن به صورت تجربی و از راه شبیه‌سازی به روش تحلیل المان محدود (با استفاده از نرم افزار کامسول) مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اهمیت کاربردی موجبرها، نتایج این گزارش برای مطالعه و ساخت موجبرها بر پایه مواد پلیمری با ساختارهای پیچیده‌تر داده‌های سودمندی را فراهم می‌سازد.

۲. طراحی موجبر صفحه‌ای

شکل ۱ اجزای موجبر صفحه‌ای به صورت شماتیک را نمایش می‌دهد. هسته موجبر با دو ماده با ضریب شکست‌های کمتر احاطه شده است تا پدیده بازتاب کلی که اساس عملکرد موجبر است، رخ دهد. اگر ضریب شکست غلاف و زیرلایه یکسان باشد، موجبر متقارن است، در غیر این صورت موجبر نامتقارن خواهد بود.



شکل ۱ طرح موجبر صفحه‌ای.

در ادامه اندیس‌های c , f و s در معادلات به ترتیب معرف غلاف، هسته و زیرلایه هستند. لایه‌ها چنان انتخاب می‌شوند که شرط $n_r > n_s > n_c$ برقرار باشد و h ضخامت هسته موجبر را نشان می‌دهد. بسته به جهت میدان الکتریکی، مد انتشار می‌تواند الکتریکی عرضی (TE) یا مغناطیسی

عرضی (TM) باشد. میدان الکتریکی در مد TE هیچ مولفه طولی در امتداد محور انتشار Z نداشته و در راستای y قطبیده شده است. برای مشخص شدن مدهای مجاز درون موجبر، ابتدا باید معادله موج در هر دی الکتریک (هوا، هسته و زیرلایه) که به صورت معادله (۱) می باشد، جداگانه حل شوند [۲۳]. برای موج الکترومغناطیسی با مد TE می توان نوشت،

$$\nabla^2 E_y(r, t) + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E_y(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

که در آن، μ ثابت تراوایی و ε ثابت گذرددهی را نشان می دهند. با استفاده از روش جداسازی متغیرها برای معادله (۱) داریم،

$$E_y(r, t) = E_y(r)E_y(t) = E_y(r) \exp(j\omega t) + c.c \quad (2)$$

c.c مزدوج مختلط عبارت اول و ω فرکانس زاویه ای موج است. با جایگذاری رابطه (۲) در معادله (۱)، معادله (۳) بدست می آید.

$$\nabla^2 E_y(r) + k_0^2 n_i^2 E_y(r) = 0 \quad (3)$$

که در آن، k_0 بردار انتشار در خلا، n_i ضریب شکست دی الکتریک را نشان می دهند. اندیس i بسته به لایه یکی از سه پارامتر c, f و s خواهد بود. با توجه به اینکه موجبر در راستای y نامحدود فرض شده است، $E_y(r)$ به y بستگی ندارد. همچنین دامنه میدان الکتریکی مستقل از z است و تنها فاز آن به z بستگی دارد. بنابراین جواب معادله موج مربوط به میدان الکتریکی برابر است با:

$$E_y(x, z) = E_y(x)e^{-j\beta z} \quad (4)$$

جایی که β ثابت انتشار در امتداد محور z است. با جایگذاری رابطه (۴) در معادله (۳)، داریم:

$$\frac{\partial^2 E_y(x)}{\partial x^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) E_y(x) = 0 \quad (5)$$

پس از حل این معادله و اعمال شرایط مرزی، معادله مشخصه برای مد TE نتیجه می شود،

$$\tan(h_f k_f) = \frac{\gamma_c + \gamma_s}{k_f \left[1 - \frac{\gamma_c \gamma_s}{k_f^2} \right]} \quad (6)$$

همچنین با تکرار محاسبات برای مد TM معادله مشخصه برابر است با:



$$\tan(h_f k_f) = \frac{k_f \left[\frac{n_f^2}{n_c^2} \gamma_c + \frac{n_f^2}{n_s^2} \gamma_s \right]}{k_f^2 - \frac{n_f^4}{n_s^2 n_c^2} \gamma_c \gamma_s} \quad (7)$$

γ و h_f به ترتیب میزان اتلاف در موجبر و ضخامت هسته موجبر را نشان می‌دهند. از حل عددی دو معادله (۶) و (۷)، مقدار β و در نتیجه ضریب شکست موثر موجبر بدست می‌آید [۲۴]،

$$n_{eff} = \beta/k_0 \quad (8)$$

تعداد مدهایی (m) که در موجبر منتشر می‌شوند، برابر است با؛

$$m = INT \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{\lambda_0} h_f \sqrt{n_f^2 - n_c^2} - \\ \frac{1}{\pi} \arctg \left[p \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \end{array} \right\} \quad (9)$$

تعداد مدهای منتشر شده در موجبر به ضخامت هسته بستگی دارد به صورتی که برای داشتن کمینه یک مد، معادله‌های (۴) و (۵) باید یک جواب داشته باشند. در این حالت حد h_f باید از رابطه زیر تبعیت کند؛

$$h_f = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left\{ n\pi + \arctg \left[p \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\} \quad (10)$$

جایی که λ_0 طول موج، $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ، برای مد TE و $p = (n_f/n_s)^2$ برای مد TM هستند. کمینه ضخامت لازم در چهار طول موج ۶۳۳ nm، ۸۵۰ nm، ۱۳۱۰ nm و ۱۵۵۰ nm برای یک موجبر صفحه‌ای تک مدی مورد نظر محاسبه و در جدول‌های ۱ و ۲ بیان شده‌اند.

جدول ۱ کمینه ضخامت برای انتشار مد TE_0 در موجبر.

طول موج (nm)	Quartz/SU-8	PET/SU-8
۶۳۳	۰/۱۷	۰/۵۲
۸۵۰	۰/۲۳	۰/۶۸
۱۳۱۰	۰/۳۵	۰/۹۷
۱۵۵۰	۰/۴۲	۱/۱۴

جدول ۲ کمینه ضخامت برای انتشار مد TM_0 در موجبر.

طول موج (nm)	Quartz/SU-8	PET/SU-8
۶۳۳	۰/۱۸	۰/۵۲
۸۵۰	۰/۲۴	۰/۶۸
۱۳۱۰	۰/۳۹	۰/۸۴
۱۵۵۰	۰/۴۴	۱/۱۴

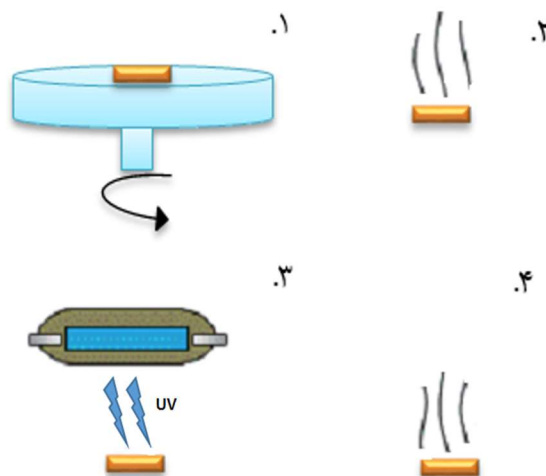
همان‌طور که دیده می‌شود برای هر دو موجبر کمینه ضخامت هسته با طول موج افزایش می‌یابد که قابل پیش‌بینی است [۲۳]. وقتی طول موج چند برابر بزرگتر می‌شود، کمینه ضخامت مورد نیاز برای هسته باید به همان نسبت افزایش یابد تا فضای کافی برای انتشار موج فراهم آید. از این رو با توجه به نتایج، پارامترهای فرایند لایه‌نشانی را به صورتی انتخاب می‌کنیم که ضخامت مورد نظر برای لایه هسته بدست آید.

۳. ساخت، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی موجبر

رسوب فوتورزیست با روش لایه‌نشانی چرخشی انجام می‌شود به صورتی که تعداد مراحل، مدت زمان و سرعت چرخش با توجه به گرانروی فوتورزیست تنظیم می‌گردد. در این پژوهش از SU-8-2050 استفاده شده است که در سه مرحله؛ (۱) ۶۰ s با سرعت ۵۰۰ rev/min، (۲) ۶۰ s با سرعت ۱۰۰۰ rev/min (۳) ۶۰ s با سرعت ۲۰۰۰ rev/min بر روی دو زیرلایه‌ی کوارتز و PET نشانده شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۸ min در کوره با دمای ۹۵ °C قرار داده شدند تا حلال‌ها حذف شوند و چسبندگی زیرلایه و فوتورزیست بهبود یابد. در ادامه نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه تحت تابش نور فرابنفش قرار گرفتند و در نهایت در دمای ۹۵ °C به مدت ۵۰ min پخت داده شدند تا

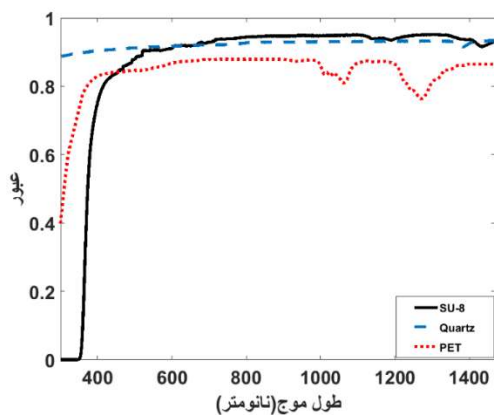


فوتورزیست مانند شیشه سفت شود. این فرایند ساخت به صورت نمادین در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین، با استفاده از روش پروفایلمتری ضخامت لایه SU-8 بر روی زیرلایه‌های کوارتز و PET مقدار $50 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد.



شکل ۲ شماتیک مراحل لایه‌نشانی نمونه ۱. رسوب فوتورزیست بر زیرلایه، ۲. پخت اولیه، ۳. تابش نور فرابنفش، ۴. پخت نهایی.

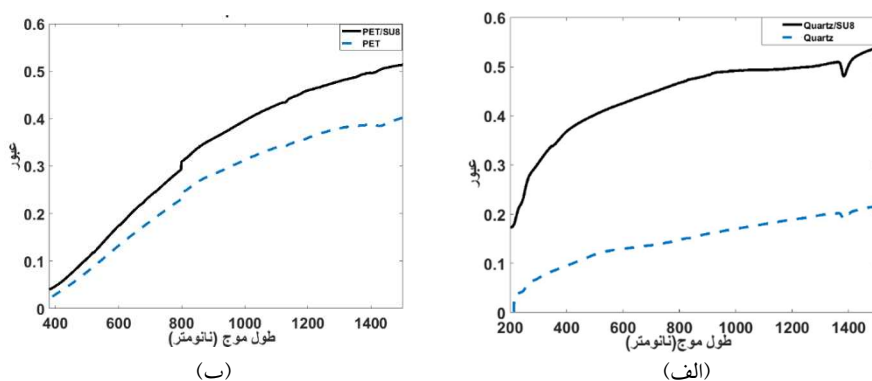
با توجه به اینکه موجبر یک افزاره نوری است که انتقال امواج را انجام می‌دهد، بررسی گذردهی نوری مواد سازنده آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. از این رو طیف‌های عبور نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفوتومتر Cary500 اندازه‌گیری شدند.



شکل ۳ طیف عبور هسته SU-8 (خط ممتد) و زیرلایه‌های کوارتز (خط چین) و PET (نقطه چین).

شکل ۳ طیف عبور PET، کوارتز و SU-8 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که SU-8 عبوری بهتری نسبت به PET و کوارتز دارد، به صورتی که برای طول موج‌های بیشتر از ۴۰۰ nm کمابیش شفاف و در طول موج‌های کمتر از ۳۰۰ nm کدر است. مواد پلیمری دو قله جذب در ناحیه طول موج فرسرخ نزدیک دارند که به ارتعاشات پیوندهای C-H ارتباط داده می‌شوند [۲۳،۲۴]. از این رو، این قله‌ها برای PET و SU-8 نیز دیده می‌شوند که عمیق‌تر بودن آن‌ها در PET نسبت به SU-8 به ضخامت بیشتر PET مربوط است.

برای بررسی عملکرد موجبر، تابش دهی را در راستای طول موجبرهای ساخته شده تنظیم کرده و طیف عبور اندازه می‌شود. در شکل ۴ میزان عبور پس از لایه‌نشانی SU-8 برای هر دو زیرلایه بهبود یافته است. با توجه به اینکه SU-8 بالاترین میزان عبور را دارد (طیف عبوری در شکل ۳) و رخ دادن پدیده بازتاب کلی که سبب به دام افتادن موج در هسته می‌شود، افزایش میزان عبور پس از لایه‌نشانی SU-8 منطقی است. با این اندازه‌گیری هدایت موج تابشی در بازه وسیعی از طول موج از فرابنفش تا فرسرخ که با استفاده از موجبر ساخته شده، تایید می‌گردد.



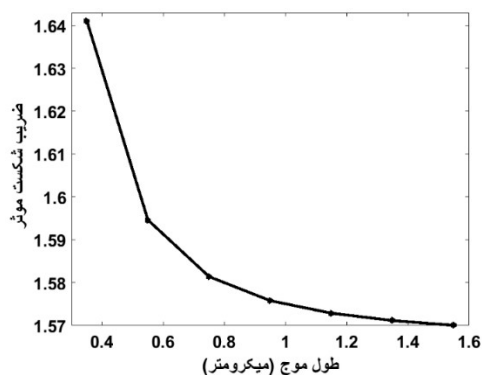
شکل ۴ طیف عبور زیرلایه الف) کوارتز پیش از لایه‌نشانی (نقطه‌چین) و پس از رسوب لایه SU-8 (ممتد) ب) PET پیش از لایه‌نشانی (نقطه‌چین) و پس از رسوب لایه SU-8 (ممتد).

در ادامه برای بررسی بیشتر عملکرد موجبرهای ساخته شده از شیشه‌سازی به روش المان محدود استفاده می‌کنیم. بدین ترتیب که موجبر را ابتدا با در نظر گرفتن هندسه و مواد استفاده شده در برنامه طراحی و سپس از مدل اپتیک موجی برای یافتن پارامتر مورد نظر استفاده می‌شود. یکی از



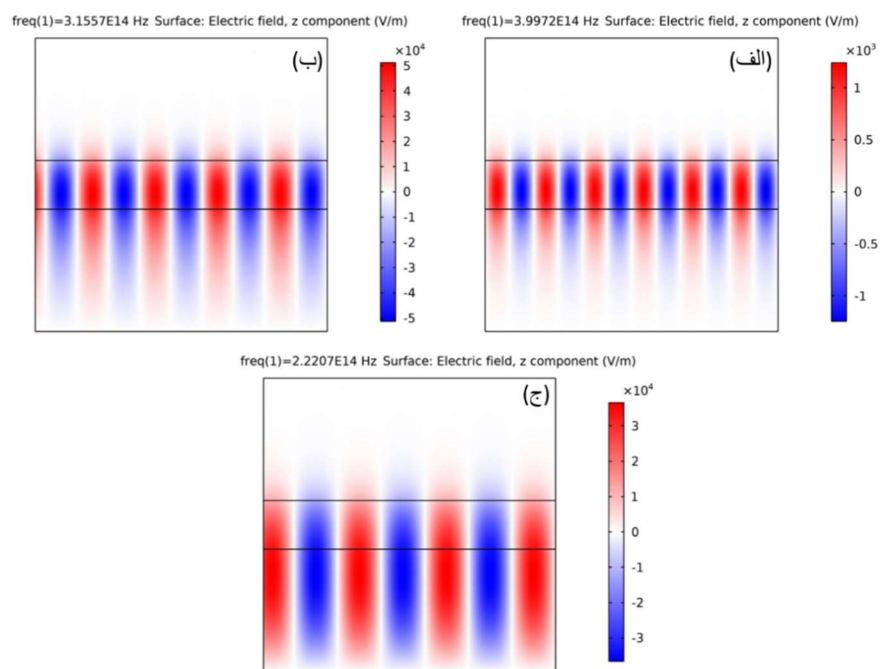
پارامترهای مهم، تعیین بخش حقیقی ضریب شکست موثر موجبر بر حسب طول موج‌های مختلف است که در شکل ۵ محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج ضریب شکست موثر کاهش می‌یابد [۱۸].

با توجه به شکل ۳ در ناحیه مرئی که جذب ناچیز می‌باشد و کاهش ضریب شکست موثر با افزایش طول موج بدیهی است. اما با کاهش عبور در ناحیه فرورسرخ برای طول موج‌های 1150 nm ، 1350 nm و 1550 nm مقادیر ضریب شکست موثر کمابیش یکسان $1/572$ ، $1/571$ و $1/570$ بدست آمده است.



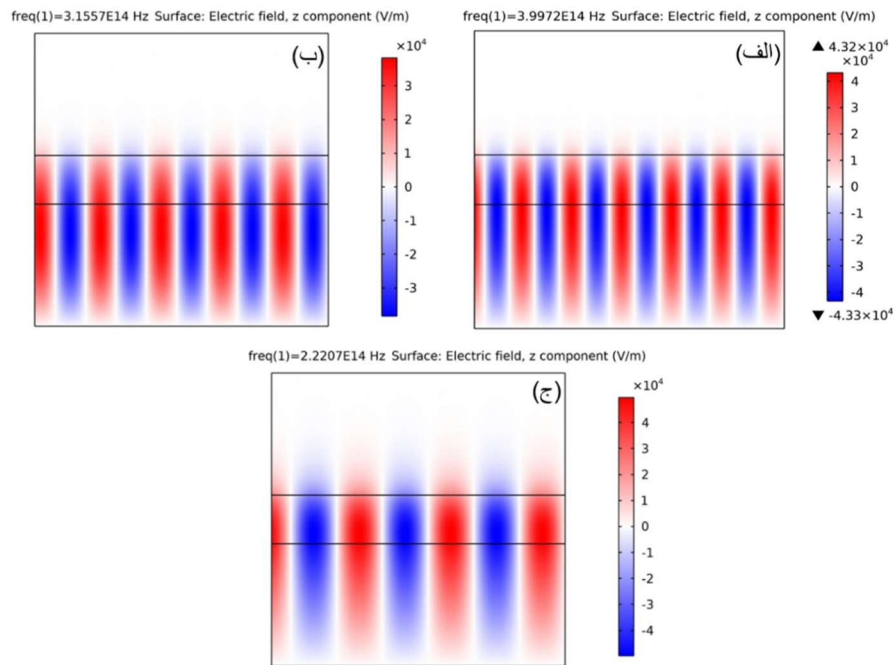
شکل ۵ ضریب شکست موثر موجبر به صورت تابعی از طول موج.

شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب، انتشار میدان الکتریکی در موجبرهای صفحه‌ای PET/SU-8 و Quartz/SU-8 در طول موج‌های 950 nm ، 750 nm و 1350 nm در دو بعد را نشان می‌دهد. تعداد ناحیه‌های قرمز و آبی که به ترتیب نشان دهنده بیشینه و کمینه میدان الکتریکی موج تخت در حال انتشار می‌باشند، با افزایش طول موج کاهش می‌یابد که قابل پیش‌بینی است. آنچنان که انتظار داریم و از شکل نیز دیده می‌شود، میدان الکتریکی به زیر لایه نیز نفوذ می‌کند و عمق نفوذ بزرگتری در فرکانس‌های کوچک‌تر دیده می‌شود که این عمق نفوذ برای کوارتز بیشتر است. از آنجا که عمق نفوذ با عکس ضریب جذب متناسب است، بنابراین کوارتز که نسبت به PET عبور بالاتری دارد، دارای جذب کمتر (شکل ۳) و در نتیجه عمق نفوذ بیشتری برای هر طول موج خواهد بود.



شکل ۶ تابش موج تخت به موجبر PET/SU-8 و توزیع میدان الکتریکی در دو بعد (در سطح مقطع جانبی) برای مد TE در سه طول موج (الف) ۷۵۰ nm، (ب) ۹۵۰ nm و (ج) ۱۳۵۰ nm.





شکل ۷ توزیع میدان الکتریکی در دو بعد برای مد TE در موجبر Quartz/SU-8 در سه طول موج (الف) nm ۷۵۰، (ب) ۹۵۰ nm و (ج) ۱۳۵۰ nm.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش موجبر صفحه ای بر پایه پلیمر SU-8 به عنوان هسته و زیرلایه های کوارتز و PET طراحی شده است. برای تعیین مدهای انتشاری و ضریب شکست موثر، معادله های مشخصه به صورت تحلیلی و با روش المان محدود حل شدند. نتایج نشان دادند که بخش حقیقی ضریب شکست موثر موجبر با افزایش طول موج در ناحیه مرئی کاهش سریعی دارد، اما در ناحیه فروسرخ تغییرات آن ناچیز می شود. همچنین کمینه ضخامت لازم برای هسته موجبر، با افزایش طول موج، افزایش می یابد. از شبیه سازی کامسول نیز نتیجه شد که میزان نفوذ میدان الکتریکی در زیرلایه PET کمتر از کوارتز است. علاوه بر محاسبات عددی، موجرها در آزمایشگاه ساخته شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج اندازه گیری نشان دادند که لایه نشانی فوتورزیست بر روی زیر لایه ها سبب بهبود

میزان عبور در هر موجبر و در نتیجه انتقال بهتر امواج خواهد شد. همچنین با وجود اینکه مقدار عبور برای هر دو موجبر $PET/SU-8$ و $Quartz/SU-8$ کمابیش یکسان به دست آمد، اما انعطاف پذیری که مناسب برای نسل جدید افزاره‌های منعطف است، در کنار قیمت پایین، PET را جایگزین خوبی برای زیرلایه کوارتز می‌کند.

۵. تقدیر و تشکر

از سرکار خانم دکتر هدیه پازوکیان تشکر و قدردانی می‌گردد.



منابع

- [1] Agrawal, G. P. *Lightwave Technology: Components and Devices*. (Wiley Wiley-Interscience (2004).
- [2] Bakhla, N., Gangopadhyay, P. & Lakshmi, P. SU-8 Polymer as an Optical Waveguide for Integrated Optics. *Journal of Electronic Design Technology* **10**, 20-26 (2019).
- [3] Panusa, G., Pu, Y., Wang, J., Moser, C. & Psaltis, D. Fabrication of Sub-Micron Polymer Waveguides through Two-Photon Polymerization in Polydimethylsiloxane. *Polymers* **12**, 2485 (2020).
- [4] Dangel, R. *et al.* Polymer Waveguides Enabling Scalable Low-Loss Adiabatic Optical Coupling for Silicon Photonics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **24**, 1-11 (2018).
- [5] Bamiedakis, N., Shi, F., Chu, D., Penty, R. V. & White, I. H. High-Speed Data Transmission Over Flexible Multimode Polymer Waveguides Under Flexure. *IEEE Photonics Technology Letters* **30**, 1329-1332 (2018).
- [6] Barwicz, T. *et al.* Advances in Interfacing Optical Fibers to Nanophotonic Waveguides Via Mechanically Compliant Polymer Waveguides. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **26**, 1-12 (2020).
- [7] Fischbec, G., Moosburger, R., Topper, M., Petermann, K. Design concept for singlemode polymer waveguides. *Electronics Letters* **32**, 212-213 (1996). [8] Imanura, S., Yoshimura, R., Izawa, T. Polymer channel waveguides with low loss at 1.3 μm . *Electronics Letters* **27**, 1342-1343 (1991).
- [9] Prajzler, V., Nekvindová, P., Hyps, P., Jerabek, V., Properties of the Optical Planar Polymer Waveguides Deposited on Printed Circuit Boards. *Radioengineering* **24**, 442-448 (2015).
- [10] Ma, H., Jen, A.K.Y., Dalton, L.R. Polymer based optical waveguides: Materials, processing and devices. *Advanced Materials* **14**, 1339-1365(2002).
- [11] Eldada, L. Optical communication components. Review of Scientific Instruments **75**, 575-593 (2004).
- [12] Eldada, L., Shacklette, L.W. Advances in polymerintegrated optics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **6**, 54-68 (2000).
- [13] Yeniay, A., Gao, R.Y., Takayama, K., Gao, R.F., Garito, A.F. Ultra-low-loss polymer waveguides. *Journal of Lightwave Technology* **22**, 154-158 (2004).
- [14] Feng, R. & Farris, R. J. Influence of processing conditions on the thermal and mechanical properties of SU8 negative photoresist coatings. *Journal of Micromechanics and Microengineering* **13**, 80-88 (2002).
- [15] Beche, B., Pelletier, N., Gaviot, E., Zyss, J. Single-mode TE₀₀-TM₀₀ optical waveguides on SU-8 polymer. *Optics Communications* **230**, 91-94 (2004).
- [16] Yang, B., Yang, L., Hu, R., Sheng, Z., Dai, D., Liu, Q., He, S. Fabrication and characterization of small optical ridge waveguides based on SU-8 polymer. *Journal of Lightwave Technology* **27** 4091-4096 (2009).
- [17] Prajzler, V., Lyutakov, O., Hüttel, I., Barna, J., Špírková, J., Nekvindová, P., Jeřábek, V. Simple way of fabrication of Epoxy Novolak Resin optical waveguides on silicon substrate. *Physica Status Solidi C-Current Topics in Solid State Physics* **8**, 2942-2945 (2011).
- [18] Prajzler, V., Nekvindová, P., Hyps, P., Lyutakov, O. & Jerabek, V. Flexible Polymer Planar Optical Waveguides. *Radioengineering* **23**, 776-782 (2014).
- [19] Bogaerts, W. *et al.* Basic structures for photonic integrated circuits in Silicon-on-insulator. *Opt. Express* **12**, 1583-1591 (2004).



- [20] Sharma ,T. *et al.* Review of Recent Progress on Silicon Nitride-Based Photonic Integrated Circuits. *IEEE Access* **8**, 195436-195446 (2020).
- [21] Zilkie, A. J. *et al.* Multi-Micron Silicon Photonics Platform for Highly Manufacturable and Versatile Photonic Integrated Circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **25**, 1-13 (2019).
- [22] Koren, U. in *Optoelectronic Integration: Physics, Technology and Applications* (ed O. Wada) 233-272 (Springer US, 1994).
- [23] Pollock, M. L. *Integrated Photonics* 2004th edition edn, (Springer, 2003).
- [24] Prajzler, V. *et al.* Design, Fabrication and Properties of Rib Poly(methylmethacrylimide) Optical Waveguides. *Radioengineering* **20**, 479 (2011).



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

