طراحی و شبیه‌سازی لایه‌های هسته و پوشش برای مدولاتور الکترو- اپتیک پلیمری

سمانه حامدی[۱] و امیدرضا دانشمندی [۲]

[۱]دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز ، شیراز، ایران (hamedi@sutech.ac.ir)
[۲]پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده مکانیک، شیراز، ایران (daneshmandi@isrc.ac.ir)

چکیده - در این مقاله ضخامت لایه‌های هسته و پوشش بکار رفته برای ساخت یک مدولاتور موجبری الکترو-اپتیک پلیمری بر روی زیرلایه سیلیکون طراحی و شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی پارامترهای مختلف این مدولاتور معرفی شده از روش انتشار پرتو *(BPM)* استفاده شده است. ضخامت مناسب لایه هسته برای ساختن موجبر در عمق فیلم، ضخامت کافی لایه‌های پوشش بالایی و پایینی برای کاهش تلفات ناشی از جذب نور توسط الکترود فلزی، ضریب شکست بالای زیرلایه و از طرفی افزایش بازدهی مدولاسیون محاسبه شده است. ضخامت لایه پوشش به‌گونه‌ای تعیین شده است که به ازای تزویج نور لیزر با طول‌موج ۹۸۰ نانومتر و قطبش *TM*، کمتر از ۱۰٪ دامنه مود اصلی موجبر به لایه‌های پوشش برسد. برای زیرلایه سیلیکون پوشانده شده با SiO_2 به ضخامت ۴۰۰ نانومتر، لایه هسته با ضریب شکست ۱/۶۳ و ضخامت ۳ میکرومتر بین دو لایه پوشش زیر و رو به ضریب شکست ۱/۵۱ و ضخامت‌های به ترتیب ۱ و ۱/۵ میکرومتر طراحی شده است.

کلید واژه- مدولاتور، موجبر، ضریب شکست، الکترو- اپتیک

Design and simulation of Core and Cladding Layers for Polymeric Electro-Optic Modulator

Samaneh Hamedi[1] and Omidreza Daneshmandi[2]

[1]Electrical and Electronic Department of Shiraz University of Technology
[2]ISRC

Abstract- In this paper the thickness of core and cladding layers to fabricate a polymer Electro-Optic waveguide modulator is designed and simulated. To simulate the various parameters of this introduced modulator the beam propagation method (BPM) is used. The enough thickness of the core layer is chosen to fabricate the waveguide in depth of the film. The thickness of top and bottom cladding layers is adjusted to reduce the optical loss arising from absorption loss in the metal electrode and the high refractive index of the substrate. By this adjustment the modulation efficiency will be increased. The cladding layers thickness is defined as coupling 980nm laser light with TM polarization into the waveguide that about 10 percent of the peak value of the evanescent field of the fundamental mode extends into cladding layers. A Si substrate coated with SiO2 in a thickness of 400nm is used. For a core layer with refractive index of 1.63 and thickness of 3μm, the thickness of bottom and top cladding layers with refractive index of 1.51 are designed to be 1μm and 1.5μm respectively.

Keywords: modulator, waveguide, refractive index, electro-optic

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

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

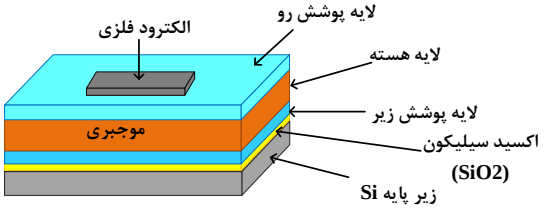
۱- مقدمه

مدارهای مجتمع نوری در تمام سطوح تکنولوژی نوری بهویژه در مخابرات نوری، مدولاتورهای نوری، پردازش تصویر و حسگرهای نوری کاربرد دارند[۱, ۲]. مدلاتور الکترو-اپتیک به عنوان عنصر اصلی یک فرستنده نوری قابلیت تبدیل سیگنال‌های الکتریکی به نوری برای انتقال از طریق شبکه‌های مخابرات نوری سریع را دارد[۳]. با توجه به ضریب الکترو-اپتیک بالای پلیمرها در مقایسه با بیشینه ضریب الکترو-اپتیک کریستال‌های غیرخطی، این مواد برای استفاده در ادوات الکترو-اپتیک مناسب هستند. [۴]. مواد پلیمری ثابت دی‌الکتریک کم، پاشندگی کم، پاسخ الکترونیکی سریع و ساخت ساده و کم هزینه دارند[۵-۷].

یک نکته مهم قبل از ساختن مدولاتور، آماده سازی بستر مناسب برای ایجاد شرایط موجبری موثر است. این بستر شامل یک لایه هسته با ضریب شکست بالاتر از لایه پوشش است که باید ضخامت آن طوری تنظیم شود که تعداد مودهای تزویج شده در آن حداکثر دو یا سه مود باشد[۸]. از طرفی ضخامت لایه‌های پوشش بر روی دو کمیت مهم مدولاتور مانند ولتاژ مدولاسیون و تلفات نوری ناشی از جذب در الکترود فلزی و زیرلایه تأثیر می‌گذارد[۹]. لایه‌ای که به‌عنوان پوشش زیر استفاده می‌شود در حبس توان پرتو در هسته و افزایش چسبندگی لایه پلیمری بر روی زیرلایه نقش دارد. در ضمن چون بر روی سطح فیلم الکترود لایه‌نشانی می‌شود، لایه پوشش بالا باید به حد کافی ضخامت داشته باشد که مود انتشاری نور به الکترودها نرسد که منجر به افزایش توان اتلافی و قطع مود انتشاری موجبر شود. همچنین این لایه باید به حدی نازک باشد که حالت موجبری پرتو در زیر آن مشاهده شود و مانع از هدایت نور در لایه هسته نشود. ازآنجایی‌که موجبرها معمولاً بیشتر از چند سانتی‌متر طول ندارند، مقدار قابل‌قبول تلفات ۱dB/cm است که متاثر از ۲۰٪ تلفات در محدوده ۱ سانتی‌متری طول موجبر است[۱۰]. در این مقاله ضخامت لایه پوشش با استفاده از روش انتشارپرتو برای موجبر دو بعدی (BPM) به‌گونه‌ای تعریف شده که کمتر از ۱۰٪ بیشینه دامنه میدان میراشونده از مود اصلی موجبر به لایه‌های پوشش برسد.

۲- ساختار موجبر و مشخصات مواد پلیمری

در شکل (۱) ساختار فیلم پلیمری چندلایه برای استفاده در مدولاتور الکترو-اپتیک موجبری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است ساختار شامل یک لایه هسته و دو لایه پوشش است که بر روی زیرلایه سیلیکون پوشانده شده با SiO_2 نشانده می‌شوند. ماده لایه هسته کروموفور آزو Disperse Red1 (DR1) به‌صورت مهمان/ میزبان با غلظت ۱۰ درصد وزنی در محلول پلیمری Poly (pyromellitic dianhydride-co-4, 4′-oxydianiline), amic acid solution (PAM) ، حل می‌شود. این پلیمر در طول موج ۹۸۰ نانومتر دارای ضریب شکست ۱/۶۳ است. با توجه به ضریب شکست پلیمر لایه هسته برای انتخاب لایه پوشش باید موادی که دارای ضریب شکست کمتر از ۱/۶۳ هستند استفاده شود. برای لایه پوشش از PAM و Polyvinyl Alcohol (PVA) می‌توان استفاده کرد که در طول‌موج ۹۸۰ نانومتر به ترتیب دارای ضریب شکست ۱/۵۱۴ و ۱/۶۱۴ هستند.



شکل ۱: ساختار فیلم پلیمری چندلایه تهیه‌شده برای ساخت موجبر

۳- نتایج شبیه‌سازی

ضخامت لایه هسته حدود ۳ میکرومتر فرض شده که حداکثر تعداد مودهای قابل انتشار آن ۳ مود می‌باشد. محبوس شدن نور در لایه هسته با افزایش اختلاف ضریب شکست لایه‌های هسته و پوشش افزایش می‌یابد. با افزایش تمرکز پرتو در لایه هسته، لایه‌های پوشش می‌توانند نازک‌تر انتخاب شوند که منجر به کاهش ضخامت کل قطعه و ولتاژ مدولاسیون می‌شود. اما آنچه که در این مقاله برای طراحی در نظر گرفته شده است بر اساس مواد پلیمری در دسترس است. ضخامت لایه پوشش زیر، به دلیل جذب نور توسط ضریب شکست بالای سیلیکون حائز اهمیت است. سیلیکون(n-type Si) در طول‌موج ۹۸۰ نانومتر ضریب شکست ۳/۵+j۰/۰۰۰۵ دارد. برای تهیه فیلم‌های پلیمری بر روی زیرلایه سیلیکون پوشانده شده با SiO2 (به‌عنوان لایه پوشش) ابتدا حالتی فرض شد

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

که فیلم پلیمری هسته مستقیماً بر روی SiO_2 لایه نشانی شود. بنابراین یک موجبر سه لایه شامل Si/SiO2/Polymer طراحی و تزویج نور لیزر۹۸۰ نانومتر به ازای ضخامت‌های متفاوت SiO2 بررسی شد. در این طول‌موج ضریب شکست SiO2، ۱/۴۵ است. برای اینکه تلفات انتشاری به‌دست آمده فقط ناشی از الکترود فلزی باشد در مدل‌سازی فرض شده که لایه‌های هسته و پوشش بدون تلفات باشند. با توجه به داده‌های به‌دست آمده به ازای تلفات انتشاری ۰/۱dB/cm ضخامت ۱/۵ میکرومتر برای SiO2 به‌دست آمد. با فرض ضخامت ۴۰۰ نانومتری لایه SiO2 که در این ضخامت فقط ۴۰٪ توان ورودی لیزر به انتهای موجبر خواهد رسید. برای کاهش جذب مود نور میراشونده توسط سیلیکون و همچنین برای چسبندگی بهتر لایه هسته به زیرلایه لازم است یک لایه پلیمری بر روی SiO2 نشانده شود. با توجه به ضریب شکست لایه هسته، هر دو ماده PAM و PVA برای لایه پوشش مناسب می‌باشند. ابتدا ضخامت لایه‌های پلیمری پوشش زیر با کمترین تلفات محاسبه شد و پس از به‌دست آمدن ضخامت بهینه لایه پوشش زیر، لایه پوشش روی هسته و دقیقا زیر الکترود فلزی شبیه‌سازی شده است. درصد توان نور خروجی به ازای ضخامت‌های متفاوت لایه‌های پوشش زیر برای زیرلایه سیلیکون در جدول (۲) خلاصه شده است.

جدول۲: ضخامت لایه پوشش زیر و توان نور خروجی موجبر چندلایه به طول ۱ سانتی‌متر.

نوع ماده	ضخامت لایه پوشش زیرین (μm)	درصد توان نور خروجی به نور ورودی (%)
SiO2(400nm)/PAM(n=1.61)/ Polymer (3μm)n=1.63	۰/۵	۸۲
	۱	۸۷
	۱/۵	۹۰
	۲	۹۱
	۲/۵	۹۳
	۳	**۹۵**
SiO2(400nm)/PVA(n=1.51)/ Polymer (3μm)n=1.63	۰	۷۵
	۰/۵	۹۸
	۱	**۹۹/۵**

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) به ازای ۹۵٪ بازدهی توان نور خروجی ضخامت ۳ میکرومتر برای PAM و ضخامت حداقل۱ میکرومتر به ازای ۹۹٪ توان نور تزویج شده برای PVA به‌دست آمده است. با توجه به نتایج هرچه اختلاف ضریب شکست لایه‌های هسته و پوشش بیشتر باشد ضخامت لایه پوشش می تواند کاهش یابد. پس از محاسبه ضخامت لایه پوشش زیر، با ثابت در نظر گرفتن این ضخامت به بررسی ضخامت لایه پوشش رو به ازای تلفات جذب کمتر از ۱۰٪ نور ورودی به الکترود فلزی پرداخته شده که نتایج آن در جدول (۳) خلاصه شده است.

جدول۳: ضخامت لایه پوشش روی لایه هسته و توان نور خروجی موجبر به توان نور خروجی موجبر چندلایه به طول ۱ سانتی‌متر.

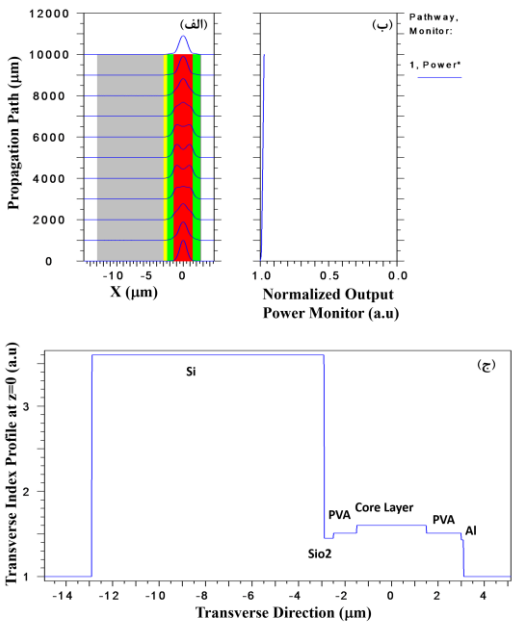
نوع ماده	ضخامت لایه پوشش رو (μm)	درصد توان نور خروجی به نور ورودی (%)
Sio2(400nm)/PAM(3μm)n=1.61/ Polymer(3μm)n=1.63/ PVA(n=1.51)/Al(100nm)	۰/۵	۸۵
	۱	۸۸
	۱/۵	۹۴
	۲	**۹۵**
Sio2(400nm)/PVA(1μm) n=1.51/ Polymer (3μm) n=1.63/ PVA(n=1.51)/Al(100nm)	۰	۴۸
	۰/۵	۸۶
	۱	۹۸
	۱/۵	**۹۹/۷**

الکترود فلزی لایه‌نشانی شده برای اعمال ولتاژ مدولاسیون آلومینیوم با ضریب شکست مختلط ۹/۳j+۱/۴۳ است. مقدار مجازی ضریب شکست وابسته به ضریب جذب در مرتبه $10^{6}cm^{-1}$ است که به سرعت میدان‌های میرای هر مود نوری را کاهش می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل‌شده به ازای ضخامت ۱۰۰ نانومتر آلومینیوم به عنوان الکترود فلزی، در صورتی که هیچ لایه پوشش رو وجود نداشته باشد بیش از۵۰٪ توان ورودی جذب الکترود خواهد شد. برای لایه پوشش رو از PVA که دارای ضریب شکست کمتری است استفاده شده که تلفات کاهش یابد. درحالی‌که لایه پوشش زیر، PAM به ضخامت ۳ میکرومتر باشد به ازای ۲ میکرومتر PVA به عنوان لایه پوشش رو، تلفات ۵٪ به‌دست می‌آید. با داشتن PVA به عنوان لایه

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

پوشش زیر، ضخامت ۱/۵ میکرومتر برای لایه پوشش رو و تلفات کمتر از ۵٪ به‌دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که لایه PVA یک لایه پوششی مناسب‌تر از PAM است. زیرا با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده ضخامت و تلفات کمتر به‌دست آمده است. بنابراین برای زیرلایه سیلیکون بهترین نوع لایه‌های پوشش و هسته با کمترین تلفات برای ساخت موجبر چند لایه انتخاب شده است. تصویر موجبر چندلایه و توان نور لیزر ۹۸۰ نانومتر منتشر شده در راستای طولی موجبر با کمترین تلفات انتشاری در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل۲: الف) انتشار نور لیزر ۹۸۰ نانومتر در موجبر ۵ لایه (Si/Sio2/PVA/EO-Polymer/PVA/Al) به طول۱ سانتی‌متر. لایه‌های پوشش پایین (سبز) و بالا (سبز) به ترتیب ۱ و ۱/۵ میکرومتر تنظیم شده‌اند که توان نور منتقل شده به خروجی موجبر تقریباً ۹۹٪ توان نور تزریق شده است. لایه هسته (قرمز) به ضخامت ۳ میکرومتر است، ب) توان کل نرمالیزه شده خروجی به میدان الکتریکی نور ورودی. و ج) پروفایل ضریب شکست مقطع عرضی موجبر در z=0

لایه‌ها به ترتیب از سمت چپ شامل Si/Sio2/PVA/EO-Polymer/PVA/Al است. پروفایل ضریب شکست لایه‌ها نیز در شکل(۲ج) نشان داده شده است که با توجه به تصویر، لایه هسته با ضریب شکست ۱/۶۳ بین دو لایه پوشش به ضریب شکست ۱/۵۱ ساندویچ شده که اختلاف ضریب شکست ۰/۱۲ برای موجبری دارند. بنابراین برای موجبری با تلفات انتشاری حدود ۲٪ حداقل ضخامت نهایی فیلم طراحی شده، ۶ میکرومتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای ساخت مدولاتورهای الکترو-اپتیک روی زیرلایه سیلیکون پوشانده شده با SiO2 به ضخامت ۴۰۰ نانومتر و الکترود فلزی به منظور ایجاد شرایط موثر موجبری و حداقل تلفات، لایه‌های هسته و پوشش طراحی و شبیه‌سازی شد. در این طراحی و با توجه به نتایج شبیه سازی، به ازای طول موج ۹۸۰ نانومتر، برای لایه هسته به ضریب شکست ۱/۶۳ پلیمر PVA با ضریب شکست ۱/۵۱ به عنوان لایه پوشش زیر و رو به ترتیب ضخامت‌های ۱ میکرون ۱/۵ میکرومتر انتخاب شد. با توجه نتایج حاصل شده اختلاف ضریب شکست بیشتر بین هسته و پوشش منجر به کاهش ضخامت لایه هسته و تلفات کمتر می‌شود. برای موجبری با بازدهی نور خروجی حدود ۹۸٪ حداقل ضخامت نهایی فیلم طراحی شده، ۶ میکرومتر با لایه‌های به ترتیب ترتیب از سمت چپ شامل Si/Sio2/PVA/EO Polymer/PVA/Al طراحی شد.

مراجع

[1]. D. wivedi and A. Kumar, "A compact and ultra high sensitive RI sensor using modal interference in an integrated optic waveguide with metal under-cladding," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 240, pp. 1302-1307, 2017.

[2]. J. Liu, G. Xu, F. Liu, I. Kityk, X. Liu, and Z. Zhen, "Recent advances in polymer electro-optic modulators," *RSC Advances*, vol. 5, no. 21, pp. 15784-15794, 2015.

[3]. C. Hössbacher *et al*" ,.Plasmonic modulator with> 170 GHz bandwidth demonstrated at 100 GBd NRZ," *Optics Express*, vol. 25, no. 3, pp. 1762-1768, 2017.

[4]. C. Kieninger *et al.*, "Ultra-High In-Device Electro-Optic Coefficient of r33= 390 pm/V Demonstrated in a Silicon-Organic Hybrid (SOH (Modulator," *arXiv preprint arXiv:1709.06338*, 2017.

[5]. Enami, A. Seki, S. Masuda, J. Luo, and A. Jen, "Ultra-Broadband Mach-Zehnder Hybrid Electro-Optic Polymer/Sol-Gel Silica Waveguide Modulators," in *CLEO: Science and Innovations*, 2017, p. SM2O. 5: Optical Society of America.

[6]. R. Palmer *et al.*, "Low power Mach–Zehnder modulator in silicon-organic hybrid technology," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 25, no. 13, pp. 1226-1229, 2013.

[7]. S. Hamedi and A. Gharavi, "Fabrication of an Azo Ploymeric Mach-Zehnder Electro- Optic Modulator," *presented at the Iran. Conf. optics and photonics (ICPET)*, 2013 .

[8]. S. Hamedi and A. Gharavi, "Effect of heat treatment on optical properties of crosslinkable Azo Chromophore doped in poly amic acid," *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, vol. 10, 2015.

[9]. J. G. Grote *et al.*, "Effect of conductivity and dielectric constant on the modulation voltage for optoelectronic devices based on nonlinear optical polymers," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 11, pp. 2464-2473, 2001.

[10]. A. Yeniay, R. Gao, K. Takayama, R. Gao, and A. F. Garito, "Ultra-low-loss polymer waveguides," *Journal of lightwave technology*, vol. 22, no. 1, p. 154, 2004.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]