طراحی و شبیه سازی فیلتر نوری ماخ زندری مبتنی بر گریتینگ زیر طول موج

محدثه راستی، عباس ظریفکار و مهدی میری

شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، بخش مخابرات و الکترونیک.

چکیده –در این مقاله، طراحی و شبیه سازی یک فیلتر ماخ زندری مبتنی بر موجبر گریتینگ زیر طول موج و موجبر معمولی ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که استفاده از موجبر گریتینگ زیر طول موج در یکی از بازوهای ماخ زندر موجب ایجاد اختلاف ضریب شکست قابل توجه بین بازوها می‌شود که با تغییر این ضریب شکست می‌توان اختلاف فاز ایجاد شده بین بازوها را کنترل کرد. این کار نیاز به ایجاد اختلاف طول بین بازوها را از بین می‌برد و باعث کاهش قابل توجه ابعاد و تلفات قطعه می‌شود. فیلتر طراحی شده دارای نسبت تمایز ۲۸ dB، تلفات الحاقی ۰٫۳ dB ، پهنای باند ۳ dB– برابر با ۵ nm و محدوده‌ی طیفی آزاد ۱۲ nm می‌باشد.

کلید واژه- فیلتر ماخ زندر، فیلتر نوری، موجبر گریتینگ زیر طول موج.

Design and Simulation of Mach-Zehnder Optical Filter based on Subwavelength Grating

Mohadese Rasti, Abbas Zarifkar and Mehdi Miri

Department of Communications and Electronics, School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper, design and simulation of an optical filter based on Mach-Zehnder interferometer with a subwavelength grating waveguide (SWG) is presented. It is shown that the use of SWG in one of the Mach-Zehnder arms causes a significant difference in the refractive index between the arms and enables us to control the phase difference correspondingly. This eliminates the need for length difference between the arms and reduces the dimensions and the loss of the device. The designed filter has an extinction ratio of 28 dB, insertion loss of 0.3 dB, 3-dB bandwidth of 0.5 nm, and 12 nm free spectral range.

Keywords: Mach-Zehnder filter, optical filter, subwavelength grating waveguide.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱-مقدمه

فیلترهای نوری یکی از اجزای کلیدی برای محدوده ی وسیعی از کاربردها در ارتباطات نوری هستند. از سوی دیگر، یکی از ساختارهایی که به دلیل دارا بودن ویژگی-های خاص در سالهای اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است موجبر گریتینگ زیر طول موج است[1] [1]. این موجبرها در واقع یک ساختار کریستال فوتونی یک بعدی هستند که از نواحی ای با ضریب شکست بالا در محیطی با ضریب شکست پایین‌تر تشکیل شده اند به گونه‌ای که دوره تناوب ساختار، بسیار کوچکتر از طول موج نور منتشر شده است. در این حالت، باند انرژی ممنوعه تشکیل نمی‌شود که این خود موجب ممانعت از بازگشت نور به سمت منبع می شود. بنابراین انتشار نور در محیط مانند موجبر معمولی خواهد بود. موجبرهای بر مبنای گریتینگ زیر طول موج بر خلاف موجبر های کریستال فوتونی که دارای شبکه‌ای با نقص خطی می باشند، نور را طبق مکانیزم هدایت به وسیله ی ضریب شکست در هسته منتشر می کنند و هیچگونه رفتار رزونانسی از خود نشان نمی‌دهند[2]،[3]. به عبارتی SWG موجبری است که ضریب شکست موثر آن در جهت انتشار موج، یکنواخت می‌باشد. به همین دلیل، موجی که در SWG منتشر می‌شود را می‌توان با موج بلاخ مدل کرد به طوری که هر کدام از مودهای بلاخ دارای یک عدد موج به خصوص می باشند. به علاوه می‌توان با انتخاب چرخه‌ی کار[2] گریتینگ، ضریب شکست را اصلاح کرده، ویژگی های انتشار(مربوط به مودهای بلاخ) را کنترل نمود[1]. قابل تنظیم بودن پارامترهای گریتینگ زیر طول موج بدون اینکه فرایند ساخت قطعه پیچیده شود سبب آسان کردن کنترل پذیری ضریب شکست و منحنی پاشندگی می شود. به بیان دیگر، با تغییر عواملی نظیر دوره تناوب و چرخه‌ی کارگریتینگ، می توان به ضریب شکست معادلی بین ضریب شکست سیلیکون و سیلیس دست یافت[۴].

همچنین از لحاظ تئوری، دستیابی به تلفات صفر برای این موجبرها میسر است اگرچه در عمل تلفات ناچیز ۲,۱ دسیبل بر سانتیمتر برای آن‌ها مشاهده شده است[۵]. از این‌رو، گریتینگ زیر طول موج می تواند به عنوان یک محیط مهندسی شده برای انتقال نور با ضریب شکست موثر معادل در ساختار فیلترهای نوری استفاده شده و بدین ترتیب از خصوصیات مطلوب این موجبرها شامل تلفات کم و همچنین کنترل پذیر بودن ضریب شکست، در بهبود مشخصات فیلتر بهره برداری گردد. در این مقاله یک فیلتر نوری با ساختار ماخ زندری که در یک بازوی آن از گریتینگ زیر طول موج استفاده شده است ارائه می شود که مشخصات بهتری نسبت به طراحی های پیشین از خود نشان می دهد.

۲-تئوری کار

در این مقاله، هدف، طراحی یک فیلتر نوری مبتنی بر تداخلگر ماخ زندر است که به طور شانه ای چندین طول موج را فیلتر می‌کند. رابطه ی اختلاف فاز بین بازوهای ماخ زندر با اختلاف ضریب شکست بازوها و اختلاف طول آن‌ها عبارتست از:

$$\Delta\Phi = \frac{2\Pi f \Delta n \Delta L}{c} \qquad (۱)$$

با قرار دادن موجبر گریتینگ زیر طول موج در یکی از بازوهای ماخ زندر و موجبر نواری[3] در دیگری می‌توان اختلاف ضریب شکست قابل توجهی بین بازوهای تداخلگر ایجاد کرد و به اختلاف فاز π رسید. با تغییر چرخه‌ی کار و یا تناوب موجبر SWG ضریب شکست بازوی مربوطه تغییر می‌کند و بدین طریق می‌توان اختلاف فاز بین بازوها را کنترل کرد.

۳-طراحی و شبیه سازی

شکل ۱ ساختار کلی فیلتر ماخ زندر را نمایش می‌دهد که

[1] Subwavelength grating (SWG)

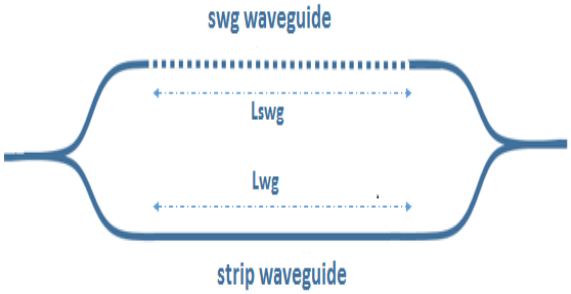
[2] Duty cycle

[3] Strip waveguide

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

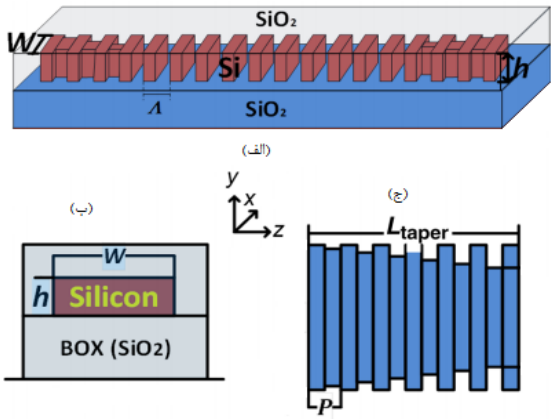
شامل کاپلر نصف کننده‌ی توان[4] در ورودی و خروجی موجبر گریتینگ زیرطول موج در یک بازو و موجبر معمولی در بازوی دیگر است. برای شبیه سازی از نرم افزار FDTD استفاده شده است.



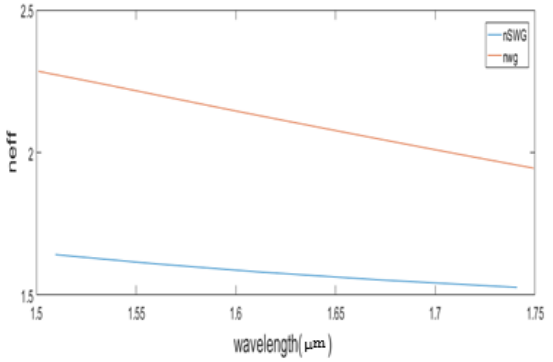
شکل ۱: ساختار فیلتر ماخ زندر. شامل 3dB coupler در ورودی و خروجی، موجبر گریتینگ معمولی و موجبر strip، $Lwg=Lswg=70\ \mu m$ ،

موجبر گریتینگ استفاده شده در این ساختار دارای پریود (Λ) برابر ۲۰۰ نانومتر، ارتفاع(h) برابر ۲۲۰ نانومتر، عرض(w) برابر ۴۰۰ نانومتر و چرخه‌ی کار برابر با ۵۰٪ و به طول Lswg ۷۰میکرومتر می‌باشد. مطابق با شکل ۲ به دلیل عدم تطابق مودها در مرز موجبر معمولی و موجبر SWG یک ساختار باریک شونده[5] به طول (L_{taper}) برابر ۲۵ میکرومتر تعبیه شده است که وظیفه‌ی تبدیل مود و انتقال کم تلف را به عهده دارد [6].

شکل ۳ اختلاف ضریب شکست دو بازوی ماخ زندر را به ازای طول موج‌های مختلف نشان می‌دهد. اندازه‌ی بزرگ اختلاف ضریب شکست بین دو بازوی ماخ زندر نشان می‌دهد که می‌توان بدون ایجاد اختلاف طول بین بازوها فیلتری شانه‌ای[6] با ابعاد کوچک و تلفات کم طراحی کرد که به طور همزمان چندین طول موج را فیلتر کند.



شکل ۲: (الف)ساختار موجبر گریتینگ زیرطول موج. (ب) موجبر معمولی، (ج) ساختار taper



شکل ۳ : اختلاف ضریب شکست بازوها در طول موج های مختلف

۴-نتیجه گیری و بحث

شکل ۴ طیف انتقال فیلتر طراحی شده را نشان می‌دهد. فیلتر مورد نظر دارای نسبت تمایز[7] ۲۸ dB، تلفات الحاقی[8] ۰,۳ dB، پهنای باند ۳ dB– ۵ nm و محدوده‌ی طیفی آزاد[9] برابر با ۱۲ nm می‌باشد. در ادامه در جدول ۱ مشخصات این فیلتر با تعدادی از کارهای مشابه اخیر مقایسه شده است.

[4] 3-dB coupler
[5] Taper
[6] Comb filter
[7] Extinction ratio (ER)
[8] Insertion loss
[9] Free Spectral Range (FSR)

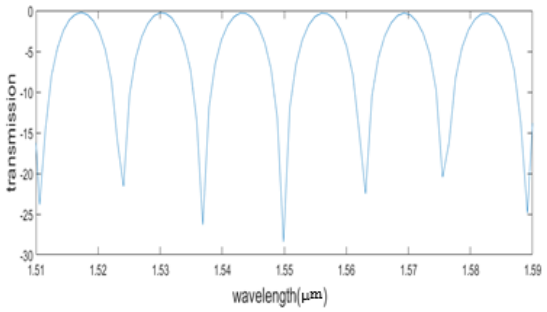
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

جدول ۱: مقایسه‌ی مشخصات فیلتر ارائه شده در این تحقیق و فیلترهای مشابه قبلی

studies	Foot print	BW	FSR	Loss	ER
Y.Hao[7]	در حد cm	_	_	<1.5dB	_
F.Horst[8]	400*500μm	_	_	1.6dB	_
Q.Deng[9]	170*580μm	5.5nm	14.7nm	0.4dB	_
P.xing[10]	_	15nm	15nm	2dB	25dB
T.Segawa [11]	_	1nm	16nm	7dB	20dB
A.P.Ovvya [12]	_	10.5nm	_	_	25dB
this study	130*6 μm	5nm	12nm	0.3dB	28dB

مشاهده می‌شود که فیلتر ارائه شده در این مقاله دارای تلفات کمتر و ابعاد کوچکتر نسبت به موارد ارائه شده ی پیشین و پهنای باند قابل قبول می‌باشد.



شکل ۴: طیف انتقال فیلتر طراحی شده.

مراجع

[1] J. Wang, I. Glesk, and L. R. Chen, "Subwavelength grating filtering devices," Optics Express, vol. 22, pp. 15335-15345, 2014.

[2] T. Föhn, N. Hoppe, W. Vogel, M. Schmidt, M. F. Rosa, M. Berroth, et al., "3D-simulation and characterization of subwavelength grating waveguides in SOI," in Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), 2014 14th International Conference on, 2014, pp. 137-138.

[3] I. Glesk, P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, J. Lapointe, and S. Janz, "All-optical switching using nonlinear subwavelength Mach-Zehnder on silicon," Optics Express, vol. 19, pp. 14031-14039, 2011.

[4] J. Čtyroký, P. Kwiecien, J. Wang, I. Richter, I. Glesk, and L. Chen, "Simulations of waveguide Bragg grating filters based on subwavelength grating waveguide," in SPIE Optics+ Optoelectronics, 2015, pp. 95160M-95160M-7.

[5] J. Wang, I. Glesk, and L. R. Chen, "Subwavelength grating devices in silicon photonics," Science Bulletin, vol. 61, pp. 879-888, 2016.

[6] G.Gao, M.Luo, X. Li, Y.Zhang, Q.Huang, Y.Wang, and J.Xia, "Transmission of 2.86 Tb/s data stream in silicon subwavelength grating waveguides," Optics Express, vol. 25(3), pp.2918-2927, 2017

[7] Y. Hao, N. Bamiedakis, R. Penty, and I. White, "Optical Filters Based on Casacaded Point-Symmetric Mach-Zehnder Interferometers." in Proceeding of European Conference on Integrated Optics, 2010.

[8] F. Horst, W. M. Green, S. Assefa, S. M. Shank, Y. A. Vlasov, and B. J. Offrein, "Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexing," Optics Express, vol. 21, pp. 11652-11658, 2013.

[9] Q. Deng, L. Liu, R. Zhang, X. Li, J. Michel, and Z. Zhou, "Athermal and flat-topped silicon Mach-Zehnder filters," Optics Express, vol. 24, pp. 29577-29582, 2016.

[10] P. Xing and J. Viegas, "Subwavelength grating waveguide-integrated athermal Mach-Zehnder interferometer with enhanced fabrication error tolerance and wide stable spectral range," in SPIE OPTO, 2016, pp. 97520U-97520U-7.

[11] T. Segawa, S. Matsuo, T. Ishii, Y. Ohiso, Y. Shibata, and H. Suzuki, "High-speed wavelength-tunable optical filter using cascaded Mach–Zehnder interferometers with apodized sampled gratings," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 44, pp. 922-930, 2008.

[12] A. Ovvyan, N. Gruhler, S. Ferrari, and W. Pernice, "Cascaded Mach–Zehnder interferometer tunable filters," Journal of Optics, vol. 18, p. 064011, 2016.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]