بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی یک موجبر سیلیکونی برای تبدیل طول موجی کوک‌پذیر براساس ناپایداری مدولاسیون

شهرزاد حسین آبادی، حسن پاکارزاده، سید مهدی حسینی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

pakarzadeh@sutech.ac.ir

چکیده – در این مقاله، به طراحی یک موجبر سیلیکونی پرداخته می‌شود که با تغییر هندسه آن می‌توان منحنی پاشندگی را کنترل کرد . با استفاده از ناپایداری مدولاسیون بر پایه‌ی فرآیند ترکیب چهارموج در ناحیه پاشندگی غیرعادی ، تبدیل طول موجی کوک پذیر در محدوده فروسرخ شبیه سازی می شود. این نوع موجبر دارای افت کمتر از ۱ $dBcm^{-1}$ برای انتشار امواج در محدوده‌ی طول موجی فروسرخ می‌باشد که نسبت به تارهای نوری مرسوم تلفات عبوری بسیار کمتر را نشان می دهد.

کلید واژه- تبدیل طول موجی تنظیم پذیر، رژیم پاشندگی غیرعادی، ضریب بهره، موجبر سیلیکونی، ناپایداری مدولاسیون.

Designing a silicon waveguide for tunable wavelength conversion based on modulation instability

Shahrzad Hosseinabadi, Hassan Pakarzadeh, Seyyed Mehdi Hosseini

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran,

pakarzadeh@sutech.ac.ir

Abstract- In this paper, a silicon waveguide is designed so that by changing its geometry the dispersion curve is controlled. Using the modulation instability based on the four-wave mixing in the anomalous dispersion regime, the tunable wavelength conversion in the infrared region is simulated. This type of waveguide has transmission losses less than 1 $dBcm^{-1}$ for waves propagated in the infrared region which is much less than those of conventional optical fibers.

Keywords: Tunable wavelength conversion, gain coefficient, silicon waveguide, anomalous dispersion regime, modulation instability.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]

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

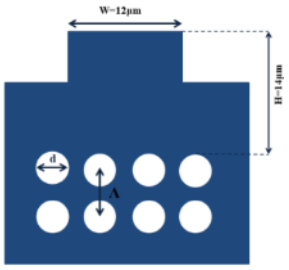
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، فوتونیک سیلیکون به عنوان یک فناوری در حال ظهور برای ارتباطات و اتصالات نوری در میکروالکترونیک توجه‌ها را به خود جلب کرده است. براساس فناوری متکامل شده‌ی نیمه هادی سیلیکون، فوتونیک سیلیکون یک بستر بسیار یکپارچه الکترونیکی-فوتونیکی ارزان قیمت را فراهم می‌کند که در آن ادوات فوتونیکی بسیار کم حجم با مدارهای الکترونیکی بطور یکجا جمع می‌شوند [۱]. موجبرهای سیلیکون بر روی عایق (SOI) طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های کلیدی برای سیستم‌های ارتباطات تمام اپتیکی مانند تبدیل فرکانسی [۲] و تولد ابرپیوستار [۳] را فراهم می‌سازند. ترکیب چهارموج (FWM) [۴] یک اثر غیرخطی مهم است که مسئول بسیاری از این پدیده‌ها می‌باشد. به دلیل خاصیت غیرخطی موجبرهای SOI قدرت FWM می‌تواند بسیار زیاد باشد[۵].

در این مقاله، تبدیل طول موجی در ناحیه پاشندگی غیرعادی برای یک موجبر سیلیکونی شامل حفره‌های هوا برای اولین بار شبیه سازی می‌شود. تبدیل طول موجی به شدت به منحنی پاشندگی و بخصوص β_2 (ضریب پاشندگی مرتبه دوم) بستگی دارد. این تبدیل طول موجی می‌تواند برای کاربردهای تراهرتز مورد استفاده قرار گیرد. در اینجا با تغییر قطر حفره‌های هوای اطراف مغزی خواص پاشندگی و β_2 را در رژیم پاشندگی غیرعادی تغییر می-دهیم و به این ترتیب جا به جایی طول موجی را کنترل می‌کنیم.

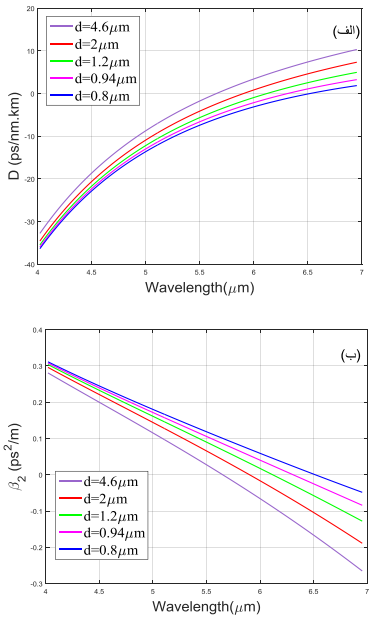
۲- مبانی نظری و نتایج شبیه سازی

موجبر طراحی شده در این مقاله شامل حفره‌های هوای دایره‌ای با گام ثابت $\Lambda = ۴/۸$ µm در یک ماده زمینه سیلیکونی، که از رابطه‌ی سلمیر پیروی می‌کند[۶]، است که با تغییر قطر حفره‌ها (d)، می‌توان منحنی پاشندگی را کنترل نمود. شکل (۱) طرح کلی این موجبر را نشان می-دهد.



شکل ۱: موجبر سیلیکونی شامل حفره‌های هوا در اطراف مغزی.

در شکل (۲) پروفایل پاشندگی و همچنین ضریب پاشندگی مرتبه دوم برای قطرهای مختلف حفره بدست آمده است. تمام شبیه سازی ها به کمک نرم افزار لومریکال و با شرایط مرزی PML و در طول موج پمپ ۶/۶۰۵ µm انجام شده که در آن برای تمامی قطرها رژیم پاشندگی غیرعادی و در نتیجه ضریب پاشندگی مرتبه دوم، منفی است.

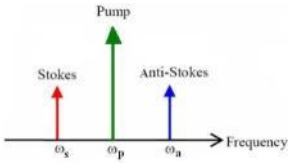


شکل ۲: الف) مقایسه پروفایل پاشندگی برای قطرهای مختلف حفره. ب) مقایسه ضریب پاشندگی مرتبه دوم برای قطرهای حفره متفاوت.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]

ناپایداری مدولاسیون یک طرح کلی انتشار نور در یک محیط نوری غیرخطی پاشنده می‌باشد که با توجه به شکل (۳) فرکانس باندهای جانبی (استوکس و آنتی استوکس) به طور متقارن نسبت به فرکانس پمپ (واکوکی صفر) به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که شرط بقاء انرژی برآورده شده است؛ یعنی $2\omega_p = \omega_a + \omega_s$ که در اینجا ω_p و ω_a و ω_s به ترتیب فرکانس زاویه‌ای امواج پمپ، استوکس و آنتی استوکس می‌باشند.



شکل ۳: مؤلفه‌های فرکانسی تولید شده توسط SMI بر پایه‌ی ترکیب چهار موج.

واکوکی فرکانسی نسبت به فرکانس پمپ به کمک رابطه $\Omega = \omega_p - \omega_s = \omega_a - \omega_p$ می‌شود که در آن $\omega_s = \frac{2\pi c}{\lambda_s}$ و $\omega_a = \frac{2\pi c}{\lambda_a}$ و λ_s و λ_a به ترتیب طول موج استوکس و آنتی استوکس و Ω فرکانس زاویه‌ای باندهای جانبی می‌باشند. برای بدست آوردن Ω_{max} در رژیم پاشندگی غیرعادی نیاز به شرط جورشدگی فاز [۷] داریم که برابر است با: $\Delta k = \beta_2\Omega^2 + 2\gamma P_0 = 0$، که در آن P_0 توان ورودی لیزر پمپ ، γ ضریب غیرخطی موجبر و β_2 ضریب پاشندگی مرتبه دوم و Ω فرکانس جابه‌جایی استوکس و آنتی‌استوکس است. جمله‌ی اول در معادله Δk نشان دهنده اختلاف فاز خطی و جمله‌ی دوم نشان دهنده اختلاف فاز غیرخطی است. لازم به ذکر است که در رژیم پاشندگی غیرعادی فقط ثابت انتشار مد مرتبه دوم ، β_2، مورد نیاز است و β_4 تقریباً صفر است.

با توجه به شرط جورشدگی فاز، Ω_{max} برای ناحیه پاشندگی غیرعادی به صورت زیر بدست می‌آید [۷]:

$$\Omega_{max} = \pm\sqrt{2\gamma P_0 / |\beta_2|} \qquad (۱)$$

که در اینجا رابطه β_2 با پاشندگی D به صورت $\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c}D$ می‌باشد که برای محاسبه‌ی β_2 آورده شده است و در آن λ_0 طول موج پمپ و c سرعت نور است. با جایگذاری D از نقاط روی نمودار شکل (۲-الف) در طول‌موجی نزدیک به طول‌موج صفر پاشندگی و بزرگتر از آن ($\lambda_p > ZDW$) β_2 محاسبه می‌گردد. ضریب غیرخطی مربوط به موجبر سیلیکونی (γ) طبق رابطه‌ی $\gamma = \frac{n_2\omega_0}{cA_{eff}} = \frac{n_2 2\pi}{\lambda_0 A_{eff}}$ با سطح مقطع مؤثر مد A_{eff} که از نرم افزار لومریکال آن را بدست آوردیم، رابطه‌ی معکوس دارد. در اینجا n_2 ضریب شکست غیرخطی سیلیکون است که مقدار آن برابر با: $n_2 = 5\times10^{-18}(m^2/W)$. در آخر شدت بهره را که توسط رابطه‌ی زیر داده می‌شود، بدست آوردیم [۷]:

$$g(\Omega) = 2\mathrm{Im}(k) = 2\sqrt{\left|\frac{1}{2}\beta_2\Omega^2\left(\frac{\beta_2\Omega^2}{2} + 2\gamma P_0\right)\right|} \qquad (۲)$$

جدول (۱) پارامترهای پاشندگی و غیرخطی و همچنین جابه‌جایی طول‌موجی که به کمک روابط بالا و شبیه سازی برای این موجبر بدست آمده‌اند را نشان می‌دهد.

جدول (۱) : پارامترهای پاشندگی و غیرخطی مربوط به موجبر طراحی شده و جابه‌جایی طول موجی برای قطرهای مختلف حفره در رژیم پاشندگی غیرعادی در طول موج ۶/۶۰۵ میکرون.

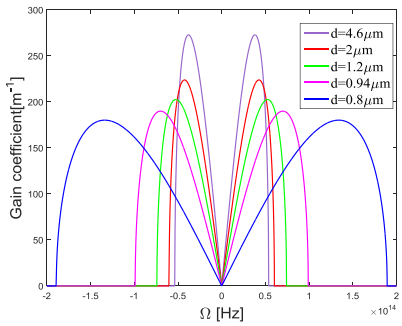
d (μm)	β_2 ($s^2.m^{-1}$)	A_{eff} (μm^2)	γ ($W^{-1}.m^{-1}$)	$\Delta\lambda$ (μm)
۴/۶۰	-۰/۱۹	۶۹/۷۴	۰/۰۶۸	۰/۶۹
۲/۰۰	-۰/۱۲	۸۴/۹۹	۰/۰۵۶	۰/۷۸
۱/۲۰	-۰/۰۷۴	۹۳/۹۳	۰/۰۵۱	۰/۹۹
۰/۹۴	-۰/۰۳۹	۱۰۰/۱۷	۰/۰۴۷	۱/۳۹
۰/۸۰	-۰/۰۱۰	۱۰۵/۶۲	۰/۰۴۵	۳/۲۸

با کاهش قطر حفره‌ها، میزان تفاوت ضریب‌شکست مغزی-غشاء کم و حبس‌شدگی کاهش می‌یابد در نتیجه A_{eff} زیاد می‌شود. با توجه به معادله‌ی (۱) هرچه β_2 کوچکتر

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]

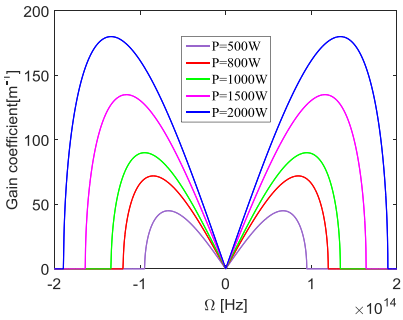
باشد Ω بیشتر می‌شود. بنابراین جابجایی فرکانسی بیشتر می‌شود. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود کمترین مقدار β_2 مربوط به حفره‌هایی با قطر ۰/۸۰ میکرون است. همچنین مشخص می‌شود که بیشترین جابه‌جایی طول موجی برای حالتی است که قطر حفره‌ها کمترین مقدار یعنی ۰/۸۰ میکرون را دارا می‌باشد. در این حالت: $\Delta\lambda$ =۳/۲۸ μm .

شکل (۴) نمودار بهره برحسب واکوکی فرکانسی (Ω) را برای ناحیه پاشندگی غیرعادی، به ازای قطرهای مختلف حفره‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل به ازای قطر ۰/۸۰ میکرون قله‌ی فرکانسی باندهای جانبی به بیشترین مقدار می‌رسد که این عامل به سبب کوچکی مقدار β_2 برای این قطر می‌باشد که در جدول (۱) هم به آن اشاره شد.



شکل ۴: ضریب بهره برحسب واکوکی فرکانسی برای قطرهای مختلف حفره در طول موج ۶/۶۰۵ میکرون و توان قله پمپ ۲۰۰۰ W.

شکل (۵) نمودار بهره بر حسب واکوکی فرکانسی را برای حالتی که قطر حفره‌ها ۰/۸۰ میکرون است برای توان‌های قله پمپ متغیر (۵۰۰-۲۰۰۰ W) نشان می‌دهد.



شکل ۵: ضریب بهره بر حسب واکوکی فرکانسی برای توان‌های قله پمپ متفاوت.

همان طور که در شکل (۵) مشخص است با افزایش توان قله پمپ، میزان ضریب بهره افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که برای توان قله پمپ ۲۰۰۰ W ، ضریب بهره دارای بیشترین مقدار است.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک موجبر سیلیکونی برای کاربردهای تبدیل طول موجی کوک پذیر طراحی و سپس در ناحیه پاشندگی غیرعادی ضریب بهره بر حسب واکوکی فرکانسی شبیه سازی شد. با توجه به نتایج بدست‌آمده از شبیه-سازی‌ها مشخص گردید که در رژیم پاشندگی غیرعادی بیشترین جابه جایی طول موجی یعنی مقدار $\Delta\lambda$= ۳/۲۸ μm برای حالتی ایجاد می‌شود که قطر حفره-ها ۰/۸۰ میکرون است. همچنین در این حالت می توان با افزایش توان قله پمپ، Ω_{max} را افزایش داد.

مرجع‌ها

[1] C. R. Pollock, M. Lipson.' *Integrated Photonics*' Springer Science Business Media, LLC, (2003).
[2] B. A. Bell, J. He, C. Xiong, and B. J. Eggleton, "Frequency conversion in silicon in the single photon regime," Opt. Express 24, 5235–5242(2016).
[3] I.-W. Hsieh, X. Chen, X. Liu, J. I. Dadap, N. C. Panoiu, C.-Y. Chou, F. Xia, W. M. Green, Y. A. Vlasov, and R. M. Osgood, "Supercontinuum generation in silicon photonic wires," Opt. Express **15**, 15242–15249, (2007).
[4] H. Fukuda, K. Yamada, T. Shoji, M. Takahashi, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, J.-I. Takahashi,and S.-I. Itabashi, "Four-wave mixing in silicon wire waveguides," Opt. Express 13, 4629–4637 (2005).
[5] J. Leuthold, C. Koos, and W. Freude,' Nonlinear silicon photonics,' Nat. Photonics **4**, 535–544 (2010).
[6] Z. Wang, H. Liu, N. Huang, Q. Sun, J. Wen, ' Efficient terahertz-wave generation via four wave mixing in silicon membrane waveguides,' Opt. Express, 20(8), 8920-8929,(2012).
[7] G.P. Agrawal, '*Nonlinear fiber optics*,' Academic Press, San Diago, (2013).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]