



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



## طراحی یک موجبر سیلیکونی برای تبدیل طول موجی کوک پذیر براساس ناپایداری مدولاسیون

شهرزاد حسین آبادی، حسن پاکرزاده، سید مهدی حسینی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

[pakarzadeh@sutech.ac.ir](mailto:pakarzadeh@sutech.ac.ir)

چکیده - در این مقاله، به طراحی یک موجبر سیلیکونی پرداخته می شود که با تغییر هندسه آن می توان منحنی پاشندگی را کنترل کرد. با استفاده از ناپایداری مدولاسیون بر پایه ی فرآیند ترکیب چهارموج در ناحیه پاشندگی غیرعادی، تبدیل طول موجی کوک پذیر در محدوده فرسرخ شبیه سازی می شود. این نوع موجبر دارای افت کمتر از  $1 \text{ dBcm}^{-1}$  برای انتشار امواج در محدوده ی طول موجی فرسرخ می باشد 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

Shahzad Hosseinabadi, Hassan Pakarzadeh, Seyyed Mehdi Hosseini

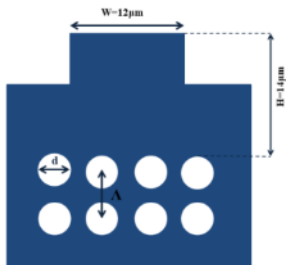
Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran,

[pakarzadeh@sutech.ac.ir](mailto: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  $1 \text{ dBcm}^{-1}$  for waves propagated in the infrared region which is much less than those of conventional optical fibers.

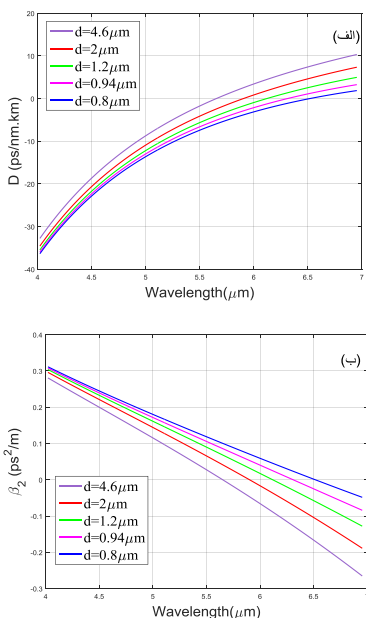
Keywords: Tunable wavelength conversion, gain coefficient, silicon waveguide, anomalous dispersion regime, modulation instability.

که با تغییر قطر حفره‌ها ( $d$ )، می‌توان منحنی پاشندگی را کنترل نمود. شکل (۱) طرح کلی این موجبر را نشان می‌دهد.



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 شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم افزار لومریکال و با شرایط مرزی PML و در طول موج پمپ  $6/605 \mu\text{m}$  انجام شده که در آن تمامی قطرهای 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.

## 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 شبیه‌سازی می‌شود. تبدیل طول موجی به شدت به منحنی پاشندگی و بخصوص  $\beta_2$  (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  $\beta_2$  را در رژیم پاشندگی غیرعادی تغییر می‌دهیم و به این ترتیب جا به جایی طول موجی را کنترل می‌کنیم.

## ۲- مبانی نظری و نتایج شبیه‌سازی

موجبر طراحی شده در این مقاله شامل حفره‌های هوای دایره‌ای با گام ثابت  $\Lambda = 4/8 \mu\text{m}$  در یک ماده زمینه سیلیکونی، که از رابطه‌ی سلمیر پیروی می‌کند [۶]، است

که در اینجا رابطه  $\beta_2$  با پاشندگی  $D$  به صورت  $\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} D$  می‌باشد که برای محاسبه  $\beta_2$  آورده شده است و در آن  $\lambda_0$  طول موج پمپ و  $c$  سرعت نور است. با جایگذاری  $D$  از نقاط روی نمودار شکل (۲-الف) در طول موجی نزدیک به طول موج صفر پاشندگی و بزرگتر از آن  $(\lambda_p > ZDW)$  محاسبه می‌گردد. ضریب غیرخطی مربوط به موجبر سیلیکونی ( $\gamma$ ) طبق رابطه‌ی 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:  $n_2 = 5 \times 10^{-18} (\text{m}^2/\text{W})$  در آخر شدت بهره را که توسط رابطه‌ی زیر داده می‌شود، بدست آوردیم  $[7]$ :

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

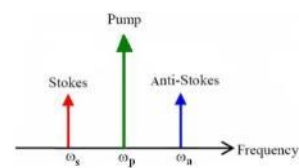
جدول (۱) پارامترهای پاشندگی و غیرخطی و همچنین جابه‌جایی طول موجی که به کمک روابط بالا و شبیه سازی برای این موجبر بدست آمده‌اند را نشان می‌دهد.

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.

$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$\beta_2$ ( $\text{s}^2.\text{m}^{-1}$ )	$A_{\text{eff}}$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$\gamma$ ( $\text{W}^{-1}.\text{m}^{-1}$ )	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
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 ضریب شکست مغزی-غشاء کم و حبس‌شدگی کاهش می‌یابد در نتیجه  $A_{\text{eff}}$  زیاد می‌شود. با توجه به معادله‌ی (۱) هرچه  $\beta_2$  کوچکتر

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  $\omega_p$  و  $\omega_a$  و  $\omega_s$  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  $\omega_a = \frac{2\pi c}{\lambda_a}$  و  $\omega_s = \frac{2\pi c}{\lambda_s}$  به ترتیب طول موج استوکس و آنتی استوکس و  $\Omega$  فرکانس زاویه‌ای باندهای جانبی می‌باشند. برای بدست آوردن  $\Omega_{\text{max}}$  در رژیم پاشندگی غیرعادی نیاز به شرط جورشدگی فاز  $[7]$  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،  $\gamma$  ضریب غیرخطی موجبر و  $\beta_2$  ضریب پاشندگی مرتبه دوم و  $\Omega$  فرکانس جابه‌جایی استوکس و آنتی استوکس است. جمله‌ی اول در معادله  $\Delta k$  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،  $\beta_2$ ، مورد نیاز است و  $\beta_4$  تقریباً صفر است.

با توجه به شرط جورشدگی فاز،  $\Omega_{\text{max}}$  برای ناحیه پاشندگی غیرعادی به صورت زیر بدست می‌آید  $[7]$ :

$$\Omega_{\text{max}} = \pm \sqrt{2\gamma P_0 / |\beta_2|} \quad (1)$$

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  $2000\text{ W}$ ، ضریب بهره دارای بیشترین مقدار است.

### ۳- نتیجه‌گیری

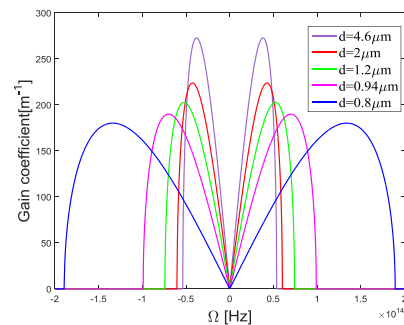
در این مقاله، یک موجبر سیلیکونی برای کاربردهای تبدیل طول موجی کوک پذیر طراحی و سپس در ناحیه پاشندگی غیرعادی ضریب بهره بر حسب واکوکی فرکانسی شبیه سازی شد. با توجه به نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها مشخص گردید که در رژیم پاشندگی غیرعادی بیشترین جابه جایی طول موجی یعنی مقدار  $\Delta\lambda = 3/28\ \mu\text{m}$  برای حالتی ایجاد می‌شود که قطر حفره-ها  $0/80$  میکرون است. همچنین در این حالت می‌توان با افزایش توان قله پمپ،  $\Omega_{\text{max}}$  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).

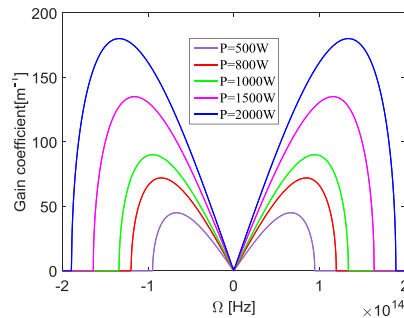
باشد  $\Omega$  بیشتر می‌شود. بنابراین جابجایی فرکانسی بیشتر می‌شود. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود کمترین مقدار  $\beta_2$  مربوط به حفره‌هایی با قطر  $0/80$  میکرون است. همچنین مشخص می‌شود که بیشترین جابه‌جایی طول موجی برای حالتی است که قطر حفره‌ها کمترین مقدار یعنی  $0/80$  میکرون را دارا می‌باشد. در این حالت:  $\Delta\lambda = 3/28\ \mu\text{m}$ .

شکل (۴) نمودار بهره بر حسب واکوکی فرکانسی ( $\Omega$ ) را برای ناحیه پاشندگی غیرعادی، به ازای قطرهای مختلف حفره‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل به ازای قطر  $0/80$  میکرون قله‌ی فرکانسی باندهای جانبی به بیشترین مقدار می‌رسد که این عامل به سبب کوچکی مقدار  $\beta_2$  برای این قطر می‌باشد که در جدول (۱) هم به آن اشاره شد.



شکل ۴: ضریب بهره بر حسب واکوکی فرکانسی برای قطرهای مختلف حفره در طول موج  $6/605$  میکرون و توان قله پمپ  $2000\text{ W}$ .

شکل (۵) نمودار بهره بر حسب واکوکی فرکانسی را برای حالتی که قطر حفره‌ها  $0/80$  میکرون است برای توان‌های قله پمپ متغیر ( $2000\text{ W}$ – $500\text{ W}$ ) نشان می‌دهد.



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