تولید تابش تراهرتز کوک پذیر بر اساس ترکیب چهارموج در موجبرهای سیلیکونی

حسن پاکارزاده، سپیده صدیقی و غلامرضا هنرآسا
دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده – در این مقاله، چگونگی دستیابی به محدوده‌ی فرکانسی مناسب در ناحیه تراهرتز به وسیله ترکیب چهارموج در موجبرهای سیلیکونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور یک موجبر سیلیکونی با خواص پاشندگی مناسب انتخاب و با تغییر طول موج پمپ ورودی از رژیم پاشندگی عادی تا رژیم غیر عادی در مجاورت طول موج صفر پاشندگی، تابش تراهرتز تولید شده در ناحیه وسیعی تنظیم می شود. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر طول موج پمپ به اندازه μm ۱/۵ می توان به جابجایی فرکانسی از ۳۸ تا ۳۰۹ تراهرتز دست یافت.

کلید واژه- موجبر سیلیکونی، ترکیب چهارموج، رژیم پاشندگی عادی، رژیم پاشندگی غیر عادی، تابش تراهرتز.

Generation of tunable THz radiation based on four-wave mixing in silicon waveguides

H. Pakarzadeh; S. Sedighi ; G. Honarasa

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

Abstract- In this paper, the four-wave mixing in silicon waveguides is investigated for achieving suitable frequency range in the terahertz region. For this purpose, a silicon waveguide with appropriate dispersion properties is selected and by changing the input pump wavelength from the normal to the anomalous dispersion regimes around the vicinity of zero-dispersion wavelength, the generated terahertz radiation is tuned in a wide range. The results show that, via the change of the pump wavelength by 1.5 µm, a frequency shift from 38 to 309 THz can be obtained.

Keywords: Silicon waveguides, Four-wave mixing, Normal dispersion regime, Anomalous dispersion regime, THz radiation.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-08-07]

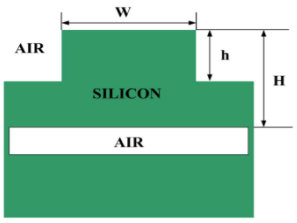
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

از آنجاییکه تابش تراهرتز در زمینه های مختلفی مانند فیزیک کاربردی، ارتباطات، سنجش و علوم زیستی کاربرد دارد، منابع تراهرتز حایز اهمیت می باشند. تولید تابش تراهرتز به روشهای مختلفی چون آنتن های نور رسانش(PC)، شتاب دهنده بزرگ ذرات[۱]، لیزرهای آبشاری کوانتومی[۲]، یکسوسازی نوری در بلورهای غیرخطی[۳] و تولید تفاضل فرکانسی DFG (Difference-frequency generation) [۴] صورت می گیرد. از جمله کار آمدترین آنها که اخیرا مورد توجه واقع شده، براساس ترکیب چهار موج در موجبرهای سیلیکونی است. هزینه پایین، دسترسی فراوان و همچنین خواص نوری خطی و غیرخطی سیلیکون، باعث شده است که سیلیکون مادهی ایدهآلی برای ساخت ادوات مجتمع فوتونیکی نانومقیاس شود[۵]. پذیرفتاری مرتبه سوم نوری غیرخطی بسیار بزرگ سیلیکون موجب می‌شود برای دستیابی به اثرات غیرخطی قوی، به ادوات نوری با طول کمتری از مرتبه چندصد میکرومتر تا چند میلی‌متر نیاز باشد[۶]. علاوه بر این موجبر سیلیکونی در مقایسه با تارهای معمولی دارای ساختار تواناتری برای تولید تابش تراهرتز می باشد و ضریب جذب سیلیکون در محدوده تراهرتز کمتر از $۰/۲۳\,cm^{-1}$ در حالی که برای تار نوری حدود $۵\,cm^{-1}$ می باشد. ترکیب چهارموج FWM (Four-wave mixing) یک اثر غیر خطی است که از خاصیت غیر خطی اپتیکی مرتبه سوم ناشی می شود. اساس فرآیند FWM بر پایه ی فاز نسبی بین چهار فوتون می باشد. در این فرآیند یک موج دیگر که سیگنال (ω_s) خوانده می شود، به همراه پمپ (ω_p) به درون یک محیط غیر خطی هدایت می شود. در خروجی سیگنال تقویت شده به همراه پمپ و یک مولفه جدید فرکانسی یعنی آیدلر (ω_a) پدیدار می شود. اگر پمپ به اندازه کافی قوی باشد و شرط جور شدگی فاز برآورده شود، بهره ی قابل توجهی بدست می آید برای یک FWM موثر باید اصل پایستگی تکانه و انرژی همزمان بر قرار شود. در حالتی که اختلاف بردارهای موج بین پمپ، سیگنال و تراهرتز صفر باشد جورشدگی فازی صورت می پذیرد و اصل پایستگی تکانه برآورده می شود. تبدیل فرکانسی یا طول موجی مبتنی بر ترکیب چهارموج است که به شدت به منحنی پاشندگی و بخصوص β_2 (ضریب پاشندگی مرتبه دوم) بستگی دارد. در این حالت برای ارضای شرط جورشدگی فازی، طول‌موج پمپ بایستی بسیار نزدیک به طول‌موج پاشندگی صفر ZDW (Zero-Dispersion Wavelength) موجبر و معمولا در ناحیه پاشندگی غیرعادی انتخاب شده باشد. در کارهای قبلی Wang و همکاران یک موجبر سیلیکونی طراحی کردند و FWM را فقط در $\lambda_p = 4.3\mu m$ شبیه سازی کردند[۷]. ما در این مقاله با تغییر طول موج پمپ ورودی از رژیم پاشندگی عادی تا رژیم غیر عادی در مجاورت طول موج صفر پاشندگی ($\lambda_0 = 6.4\mu m$)، β_2 و β_4 را در رژیم پاشندگی عادی($\lambda_p < \lambda_0$) و غیرعادی ($\lambda_p > \lambda_0$) تغییر می‌دهیم و از این طریق حداکثر جابجایی فرکانسی تراهرتز را کنترل می‌کنیم که بر این اساس می‌توان تابش تراهرتز تولید شده را در ناحیه وسیعی تنظیم کرد.

۲- مبانی نظری و نتایج شبیه‌سازی

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، موجبر سیلیکونی انتخاب شده در این تحقیق شامل مغزی سیلیکون می باشد که روی لایه ای از هوا قرار گرفته است که مانند یه غلاف برای آن عمل می کند و پارامترهای آن $H = 15\mu m$ ، $h = \frac{H}{2}$ ، $W = 10\mu m$ و $A_{eff} = 48\mu m^2$ می باشد [۷].

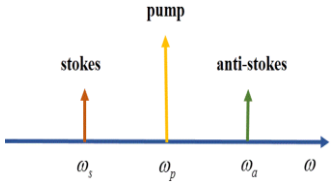


شکل۱: نمایی از موجبر سیلیکونی استفاده شده در شبیه سازی[۷].

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، در ترکیب چهارموج فرکانس باندهای جانبی (استوکس و آنتی‌استوکس) بطور متقارن نسبت به فرکانس پمپ (با 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 آنتی‌استوکس می‌باشد.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-08-07]



شکل۲: مؤلفه‌های فرکانسی تولیدشده توسط پدیده ترکیب چهار موج.

واکوکی فرکانسی نسبت به فرکانس پمپ توسط رابطه زیر داده شده است.

$$\Omega = \omega_p - \omega_s = \omega_a - \omega_p \qquad (1)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi c}{\lambda_s} \quad \text{و} \quad \omega_a = \frac{2\pi c}{\lambda_a} \qquad (2)$$

که Ω جابه جایی فرکانسی باندهای جانبی و λ_a و λ_s به ترتیب طول‌موج استوکس وآنتی استوکس می‌باشند. با استفاده از شرط جورشدگی فازی، بیشینه جابجایی فرکانسی Ω_{Max} را بدست می‌آوریم.

$$k = (\beta_4/12)\Omega^4 + \beta_2\Omega^2 + 2\gamma P_p = 0 \qquad (3)$$

$$\Omega_{Max} = \pm\sqrt{-2\beta_4(3\beta_2 + \sqrt{9\beta_2^2 - 6\beta_4\gamma P_p})}\Big/\beta_4 \qquad (4)$$

که P_p توان قله ورودی لیزر پمپ و γ ضریب غیرخطی موجبر است و طبق رابطه ی زیر با سطح مقطع موثر مد (A_{eff}) رابطه ی عکس دارد.

$$\gamma = \frac{n_2\omega_p}{cA_{eff}} = \frac{n_2 2\pi}{\lambda_p A_{eff}} \qquad (5)$$

که λ_p طول‌موج پمپ و c سرعت نور است. n_2 در آن ضریب‌شکست غیرخطی است که مقدار آن برابر با $n_2 = 5\times10^{-18}(m^2/W)$ است. برای محاسبه ی β_2 می توان از رابطه ی زیر که ارتباط بین β_2 و پاشندگی (D) می باشد استفاده کرد.

$$\beta_2 = -\frac{D\lambda_p^{\,2}}{2\pi c} \qquad (6)$$

در نهایت ضریب بهره را که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود بدست آورده‌ایم [۸].

$$g(\Omega) = \pm\frac{1}{12}\mathrm{Im}[(\sqrt{\beta_4\Omega^2 + 12\beta_2} \times \sqrt{\beta_4\Omega^4 + 12\beta_2\Omega^2 + 48\gamma P_p})\Omega] \qquad (7)$$

جابجایی فرکانسی در رژیم عادی $\lambda_p < \lambda_0$ و غیر عادی $\lambda_p > \lambda_0$، بر اساس پارامترهای پاشندگی و غیرخطی موجبر مورد نظر با استفاده از فرمول‌های بالا در جدول‌های ۱و۲ آمده است.

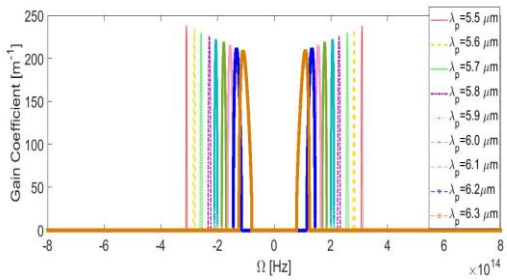
جدول۱: پارامترهای مختلف پاشندگی و غیرخطی موجبر و نیز جابجایی فرکانسی ایجاد شده برای طول موج های مختلف پمپ در رژیم پاشندگی عادی.

چنان که از جدول ۱ ملاحظه می شود، در رژیم پاشندگی

λ_p (μm)	β_2 (ps^2/km)	β_4 (ps^4/km)	γ $(1/W.km)$	Ω (THz)
5.5	0.151	-0.192×10^{-4}	118.9	309
5.6	0.133	-0.205×10^{-4}	116.8	282
5.7	0.121	-0.224×10^{-4}	114.8	258
5.8	0.101	-0.241×10^{-4}	112.8	228
5.9	0.0865	-0.259×10^{-4}	110.9	206
6.0	0.0667	-0.278×10^{-4}	109	178
6.1	0.0523	-0.303×10^{-4}	107.2	155
6.2	0.036	-0.324×10^{-4}	105.5	133
6.3	0.018	-0.349×10^{-4}	103.8	109

عادی با افزایش اندازه ی β_4 جابه جایی فرکانس تراهرتز کاهش می یابد که بیشترین جابه جایی فرکانسی متعلق به طول موج پمپ ۵/۵ میکرومتر می باشد. به عبارت دیگر، همچنان که طول موج پمپ به λ_0 (طول موج صفر پاشندگی) نزدیک می شود، به مقدار β_4 افزوده شده و جابجایی فرکانسی کاهش می یابد.

همانطور که در شکل ۳ دیده می شود، در رژیم پاشندگی عادی پهنای باند بهره با افزایش طول موج زیاد می شود و از ارتفاع ضریب بهره کاسته می شود. چنانچه در جدول ۱ هم اشاره شد.



شکل۳: نمودار تغییرات بهره بر حسب فرکانس در رژیم پاشندگی عادی به ازای طول موج های مختلف و توان قله پمپ ۱۰۰۰ W.

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

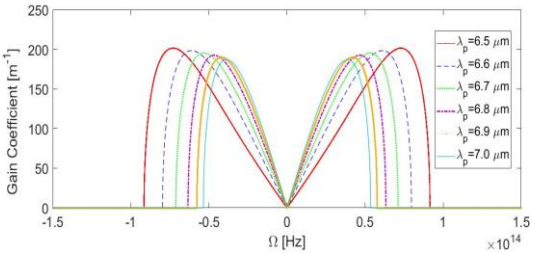
[Downloaded from opsi.ir on 2026-08-07]

چنانچه از جدول ۲ ملاحظه می شود، در رژیم پاشندگی غیر عادی با افزایش اندازه ی β_2 جابه جایی فرکانس تراهرتز کاهش می یابد. که بیشترین جابه جایی فرکانسی متعلق به طول موج پمپ ۶/۵ میکرومتر می باشد. به عبارت دیگر، هر چه طول موج پمپ از λ_0 (طول موج صفر پاشندگی) دور می شود، به مقدار β_2 افزوده شده و جابجایی فرکانسی کاهش می یابد.

جدول۲: پارامترهای مختلف پاشندگی و غیرخطی موجبر و نیز جابجایی فرکانسی ایجاد شده برای طول موج های مختلف پمپ در رژیم پاشندگی غیر عادی.

λ_p (μm)	β_2 (ps^2/km)	β_4 (ps^4/km)	γ $(1/W.km)$	Ω (THz)
6.5	-0.0198	-0.405×10^{-4}	100.6	73
6.6	-0.0396	-0.432×10^{-4}	99.1	61
6.7	-0.0577	-0.462×10^{-4}	97.6	53
6.8	-0.0793	-0.497×10^{-4}	96.2	46
6.9	-0.0991	-0.532×10^{-4}	94.8	42
7.0	-0.117	-0.565×10^{-4}	93.4	38

در رژیم پاشندگی غیر عادی با افزایش طول موج پمپ پهنای قله ی بهره کم می شود. به عبارتی هر چه طول موج پمپ از λ_0 (طول موج صفر پاشندگی) دور می شود، جابجایی فرکانسی کاهش می یابد که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل۴: نمودار تغییرات بهره بر حسب فرکانس در رژیم پاشندگی غیر عادی به ازای طول موج های مختلف و توان قله پمپ W ۱۰۰۰.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، چگونگی دستیابی به محدوده‌ی فرکانسی مناسب در ناحیه تراهرتز به وسیله ترکیب چهارموج در موجبرهای سیلیکونی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور یک موجبر سیلیکونی با خواص پاشندگی مناسب را انتخاب و تبدیل طول‌موجی در این موجبر، از طریق فرآیند ترکیب چهارموج بررسی کردیم. نتایج نشان می‌دهد با تغییر طول موج پمپ ورودی از رژیم پاشندگی عادی تا غیر عادی در مجاورت طول موج صفر پاشندگی، می‌توان جابجایی فرکانسی تابش تراهرتز تولید شده را در ناحیه وسیعی از ۳۸ تا ۳۰۹ تراهرتز تنظیم کرد. در هر دو رژیم با نزدیک شدن طول موج پمپ به λ_0 پهنای باند ضریب بهره افزوده می شود.

۴- مراجع

[1] G. L. Carr, M. C. Martin, W. R. McKinney, K. Jordan, G. R. Neil and G. P. Williams, "*High-power terahertz radiation from relativistic electrons*" , Nature 420 153-156, (2002).

[2] Kohler R.,Tredicucci A., Beltram F., Beere H., Linfield E., Davies G., Ritchie D., Iotti R. and Rossi F., *Nature*, 417, 156 (2002).

[3] W. R. Huang, S. W. Huang, E. Granados, K. Ravi, K. H. Hong, L. E. Zapata and F. X. Kartner, "*THz generation by two-color femtosecond filaments with complex polarization states: four-wave mixing versus photocurrent contributions*", J. Mod. Opt. 62 1, (2014).

[4] T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, K. Saito and T. Kimura, "*Tunable terahertz wave generation in the 3 to 7THz region from GaP*", Appl. Phys. Lett. 83, 237–239 (2003).

[5] M. Foster, A. Turner, M. Lipson and A. Gaeta, "*Nonlinear Optics in Photonic Nanowires*", Opt. Express, 16, 1300-1320 (2008).

[6] S. Lavdas, J. B. Driscoll, R. R. Grote, R. M. Osgood and N. C. Panoiu, "*Generation and Collision of Optical Similaritons in Dispersion-engineered Silicon Photonic Nanowires*", SPIE, 8816, 88160J-88169J (2013).

[7] Z. Wang, H. Liu, N. Huang, Q. Sun and J. Wen, "*Efficient terahertz-wave generation via fourwave mixing in silicon membrane waveguides*" , Optics express 20 (2012).

[8] G. P. Agrawal, "*Nonlinear fiber optics*", 5th edition, Academic press. (2007).

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-08-07]