

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 می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر طول موج پمپ به اندازه $1.5 \mu m$ می‌توان 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 $1.5 \mu m$, a frequency shift from 38 to 309 THz can be obtained.

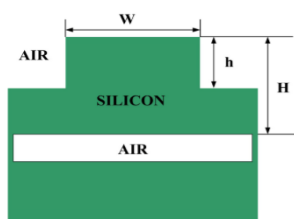
Keywords: Silicon waveguides, Four-wave mixing, Normal dispersion regime, Anomalous dispersion regime, THz radiation.

۱- مقدمه

(ضریب پاشندگی مرتبه دوم) بستگی دارد. در این حالت برای ارضای شرط جورشدگی فازی، طول موج پمپ بایستی بسیار نزدیک به طول موج 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 می‌شود، موجبر سیلیکونی انتخاب شده در این تحقیق شامل مغزی سیلیکون می‌باشد که روی لایه ای از هوا قرار گرفته است که مانند یه غلاف برای آن عمل می‌کند و پارامترهای آن $W = 10 \mu m$ ، $h = \frac{H}{2}$ ، $H = 15 \mu m$ و $A_{eff} = 48 \mu m^2$ می‌باشد [۷].



شکل ۱: نمایی از موجبر سیلیکونی استفاده شده در شبیه‌سازی [۷].

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، 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.

از آنجاییکه تابش تراهرتز در زمینه‌های مختلفی مانند فیزیک کاربردی، ارتباطات، سنجش و علوم زیستی کاربرد دارد، منابع تراهرتز حایز اهمیت می‌باشند. تولید تابش تراهرتز به روشهای مختلفی چون آنتن‌های 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 می‌گیرد. از جمله کارآمدترین 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 فوتونیک 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 می‌باشد و ضریب جذب سیلیکون در محدوده تراهرتز کمتر از 0.123 cm^{-1} در حالی که برای تار نوری حدود 5 cm^{-1} می‌باشد. ترکیب چهارموج FWM (Four-wave mixing) یک اثر غیر خطی است که از خاصیت غیر خطی اپتیکی مرتبه سوم ناشی می‌شود. اساس فرآیند FWM بر پایه‌ی فاز نسبی بین چهار فوتون می‌باشد. در این فرآیند یک موج دیگر که سیگنال (ω_s) خوانده می‌شود، به همراه پمپ (ω_p) به درون یک محیط غیر خطی هدایت می‌شود. در خروجی سیگنال تقویت شده به همراه پمپ و یک مولفه جدید فرکانسی یعنی آیدلر (ω_a) پدیدار می‌شود. اگر پمپ به اندازه کافی قوی باشد و شرط جور شدگی فاز برآورده شود، بهره‌ی قابل توجهی بدست می‌آید برای یک FWM موثر باید اصل پایستگی تکانه و انرژی همزمان برقرار شود. در حالتی که اختلاف بردارهای موج بین پمپ، سیگنال و تراهرتز صفر باشد جورشدگی فازی صورت می‌پذیرد و اصل پایستگی تکانه برآورده می‌شود. تبدیل فرکانسی یا طول موجی مبتنی بر ترکیب چهارموج است که به شدت به منحنی پاشندگی و بخصوص β_2

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 ۱ و ۲ آمده است.

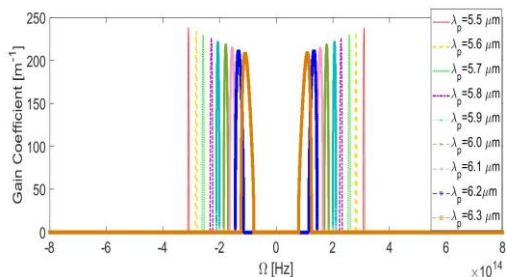
جدول ۱: پارامترهای مختلف پاشندگی و غیرخطی موجبر و نیز جابجایی فرکانسی ایجاد شده برای طول موج‌های مختلف پمپ در رژیم پاشندگی عادی.

چنان که از جدول ۱ ملاحظه می‌شود، در رژیم پاشندگی

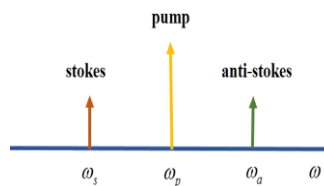
λ_p (μm)	β_2 (ps^2/km)	β_4 (ps^4/km)	γ ($1/\text{W}\cdot\text{km}$)	Ω (THz)
5.5	0.151	-0.192×10^{-4}	118.9	309
5.6	0.133	-0.205×10^{-4}	116.8	282
5.7	0.121	-0.224×10^{-4}	114.8	258
5.8	0.101	-0.241×10^{-4}	112.8	228
5.9	0.0865	-0.259×10^{-4}	110.9	206
6.0	0.0667	-0.278×10^{-4}	109	178
6.1	0.0523	-0.303×10^{-4}	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 β_4 جابه جایی فرکانس تراهرتز کاهش می‌یابد که بیشترین جابه جایی فرکانسی متعلق به طول موج پمپ ۵/۵ میکرومتر می‌باشد. به عبارت دیگر، همچنان که طول موج پمپ به λ_0 (طول موج صفر پاشندگی) نزدیک می‌شود، به مقدار β_4 افزوده شده و جابجایی فرکانسی کاهش می‌یابد.

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



شکل ۳: نمودار تغییرات بهره بر حسب فرکانس در رژیم پاشندگی عادی به ازای طول موج‌های مختلف و توان قله پمپ ۱۰۰۰ W.



شکل ۲: مؤلفه‌های فرکانسی تولیدشده توسط پدیده ترکیب چهار موج.

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

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

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

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

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

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

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.

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

که λ_p طول موج پمپ و c سرعت نور است. در آن n_2 ضریب شکست غیرخطی است که مقدار آن برابر با β_2 می‌توان از رابطه ی زیر که ارتباط بین β_2 و پاشندگی (D) می‌باشد استفاده کرد.

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

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

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

انتخاب و تبدیل طول موجی 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 می‌شود.

۴- مراجع

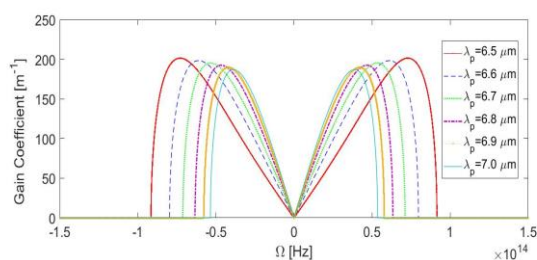
- [1] G. L. Carr, M. C. Martin, W. R. McKinney, K. Jordan, G. R. Neil and G. P. Williams, "High-power terahertz radiation from relativistic electrons", Nature 420 153-156, (2002).
- [2] Kohler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H., Linfield E., Davies G., Ritchie D., Iotti R. and Rossi F., Nature, 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).

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

جدول ۲: 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 می‌شود. به عبارتی هر چه طول موج پمپ از λ_0 (طول موج صفر پاشندگی) دور می‌شود، جابجایی فرکانسی کاهش می‌یابد که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: نمودار تغییرات بهره بر حسب فرکانس در رژیم پاشندگی غیر عادی به ازای طول موج های مختلف و توان قله پمپ ۱۰۰۰ W.

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