بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

تولید ابرپیوستار در ناحیه تراهرتز با استفاده از موجبر پله‌ای مبتنی بر سیلیکون

محبوبه بهرامی، حسن پاکارزاده، محسن حاتمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

Mahboubbahrami281@gmail.com

چکیده – در این مقاله، به شبیه سازی تولید ابرپیوستار در ناحیه تراهرتز در یک موجبر سیلیکونی پله‌ای با استفاده از معادله غیر خطی تعمیم یافته شرودینگر پرداخته می شود. ابتدا موجبر سیلیکونی با طول موج پاشندگی صفر در ناحیه تراهرتز، به کمک نرم افزارلومریکال طراحی و سپس پارامترهای خطی و غیرخطی آن نظیر افت، پارامتر غیرخطی و ضرایب پاشندگی مراتب بالاتر محاسبه می‌شود. در نهایت، طیف ابرپیوستار تراهرتز با کمک نرم افزار متلب به روش فوریه گام مجزا شبیه سازی می گردد و اثر پارامترهای مختلف از جمله پهنای پالس، توان قله پالس ورودی و طول موجبر مورد بررسی قرار می‌گیرد. بهترین نتیجه مربوط به T_0 = ۰/۱ ps، P_0 = ۱۰۰ kW، L = ۰/۱ m با پنای طیفی Δλ = ۷/۷ μm می‌باشد.

کلید واژه- ابرپیوستار، تراهرتز، موجبر سیلیکونی.

Supercontinuum generation in terahertz region using a silicon-based rib waveguide

Mahboube Bahrami, Hassan Pakarzadeh, Mohsen Hatami

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

Mahboubbahrami281@gmail.com

Abstract-In this paper, supercontinuum generation in terahertz region in a silicon-based rib waveguide is simulated via solving the generalized nonlinear Schrödinger equation (GNLSE). First, a silicon waveguide with a zero-dispersion wavelength in the terahertz region is designed with the help of Lumerical software and then its linear and nonlinear parameters such as loss, nonlinear parameter and high-order dispersion are calculated. Finally, terahertz supercontinuum spectrum, with the help of MATLAB software via the split-step Fourier (SSF) method is simulated and the effects of different parameters such as input pulse power, pulse width and length of waveguide are investigated. The best result is related to T_0=0.1 ps, P_0=100 kW, L=0.1 m with Spectral width Δλ=7.7 μm.

Keywords: Supercontinuum generation, Terahertz, Silicon-based waveguide.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

مقدمه

اخیراً تولید طیف ابرپیوستار به دلیل ایجاد یک طیف بسیار پهن باند و پیوسته از طریق انتشار پالس‌های قوی لیزر در یک موجبر نوری، توجهات زیادی را جلب کرده است[۱].

در طول دهه‌ی گذشته به طور گسترده تارهای نوری ریز ساختار، که قادر به تولید طیف گسترده‌ای از ناحیه ماوراءبنفش تا مادون‌قرمز هستند، برای تولید منابع ابرپیوستار به کار گرفته شده‌اند. که در کاربردهای بسیاری از جمله حسگری، ارتباطات تسهیم طول موجی(WDM)، توموگرافی همدوس نوری و... مورد استفاده قرار می‌گیرند. اخیرا استفاده از موجبرها با طول کوتاه که منجر به بهبود همدوسی طیف خروجی ابرپیوستار می‌شوند[۱]، مورد توجه قرار گرفته است. در بین موجبرهای رایج برای تولید ابرپیوستار، موجبرهای سیلیکونی که برای ساخت دستگاه‌های فوتونیکی و الکترونیکی بر روی یک تراشه مناسب هستند و یک بستر همساز CMOS را فراهم می‌کنند[۲]، دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. بزرگ بودن پارامتر غیرخطی سیلیکون نسبت به سیلیکون نیترید و سیلیکا، که منجر به برهمکنش غیرخطی قوی در موجبر می‌شود. شفاف بودن سیلیکون در طول موج‌های بیشتر از ۱۱۰۰ nm و کم بودن جذب آن در بازه‌ی طول موجی μm ۲۰۰-۲۵، همچنین اختلاف زیاد ضریب شکست سیلیکون و هوا که منجر به محبوس‌سازی بهتر نور می‌شود[۳] سیلیکون را به ماده‌ای مناسب برای تولید ابرپیوستار تبدیل کرده است.

به دلیل گسترش و پیشرفت علم و فناوری تراهرتز (محدوده فرکانسی THz ۱۰-۰/۱ یا محدوده طول موجی mm ۳ تا μm ۳۰). با توجه به اینکه طبق مطالعات ما تولید ابرپیوستار در ناحیه تراهرتز تاکنون مورد مطالعه و تحقیق قرار نگرفته است، در این مقاله برای اولین بار به شبیه سازی تولید ابرپیوستار در ناحیه تراهرتز در یک موجبر پله‌ای مبتنی بر سیلیکون می پردازیم.

مبانی نظری و نتایج شبیه سازی

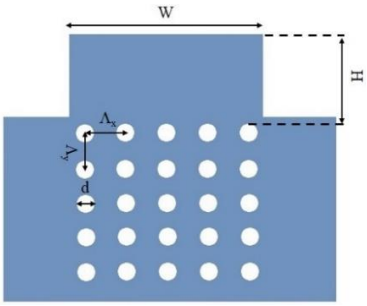
برای شبیه سازی از نرم افزار لومریکال (Lumerical) و ماژول مدسلوشن (Mode Solution) استفاده شده است. شکل ۱ طرح کلی موجبر را نشان می‌دهد. موجبر طراحی شده با هدف قرار گرفتن طول موج صفر پاشندگی λ_{ZWD} در ناحیه تراهرتز، شامل یک قسمت پله‌ای شکل سیلیکونی با پهنای $W=۹۶\mu m$ و یک زیرلایه سیلیکونی می‌باشد، به نحوی که فاصله از بالای آرایه‌ی بلور فوتونی تا انتهای پله‌ی موجبر $H=۵۸/۲\mu m$ می‌باشد. زیرلایه به صورت بلور فوتونی با حفره‌های هوا با ثابت شبکه $\Lambda_x=۱۸/۵۲\mu m$ و $\Lambda_y=۱۷/۵۲\mu m$ می‌باشد. شرایط مرزی PML انتخاب شده است. برای محاسبه دقیق مقدار پاشندگی موجبر در هر طول موج، میبایست ضریب شکست موجبر برای هر فرکانس معلوم باشد. برای تعریف ماده در نرم افزار از معادله سلمیر استفاده شده است.

$$n^2-1=\frac{10.6684293\lambda^2}{\lambda^2-0.301516485^2}+\frac{0.0030434748\lambda^2}{\lambda^2-1.13475115^2}+\frac{1.54133408\lambda^2}{\lambda^2-1104^2} \quad (۱)$$

قبلاً موجبری مشابه با هدف λ_{ZWD} در ناحیه تراهرتز به منظور استفاده در کاربردهای تولید ابرپیوستار و... توسط پاکارزاده و همکاران طراحی و گزارش شده است[۴].

ضریب شکست غیرخطی سیلیکون $n_2=۵\times۱۰^{-۱۸}\ m^2/W$ [۵]، و اتلاف موجبر برای مد TM، مد مورد استفاده در این مقاله، $\alpha=۰/۰۳\ dB/cm$ و $\lambda_{ZWD}=۳۰/۵۵\mu m$ می‌باشد. سطح مقطع مؤثر مد که از نرم افزار لومریکال به دست آورده شده $A_{eff}=۳۵۲۰/۷۳\ \mu m^2$. با جایگذاری این مقادیر دررابطه $\gamma=2n_2\pi/\lambda_0A_{eff}$، ضریب غیرخطی موجبر به‌دست خواهد آمد. منحنی پاشندگی مربوط به مد TM موجبر در شکل۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

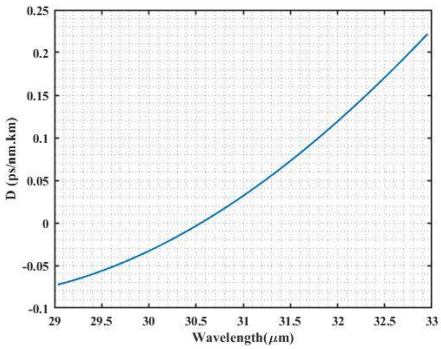


شکل۱: طرح کلی موجبر پله ای سیلیکونی در ناحیه تراهرتز [۴].

β_2 مربوط به مد از رابطه $\beta_2 = -\lambda_0^2 D/2\pi c$ که در آن λ_0 طول موج و c سرعت نور می‌باشد و با جایگذاری مقادیرD با استفاده از نمودار مربوطه شکل ۲، محاسبه می‌گردد. پاشندگی مراتب بالاتر از رابطه $\beta_m = \left(d^m\beta/d\omega^m\right)_{\omega=\omega_0}, m = 0,1,2,..$ به دست می‌آید. در جدول ۱ مقادیر ضرایب پاشندگی مرتبه بالاتر موجبر آورده شده است.

جدول ۱: ضرایب پاشندگی مرتبه بالاتر موجبر پله ای سیلیکونی .

$\beta_2\,(s^2.m^{-1})$	$\beta_3\,(s^3.m^{-1})$	$\beta_4\,(s^4.m^{-1})$
$-۵/۷۵۷۷\times۱۰^{-۲۸}$	$۱/۶۳۷۳\times۱۰^{-۳۸}$	$-۴/۴۴۸۸\times۱۰^{-۵۱}$
$\beta_5\,(s^5.m^{-1})$	$\beta_6\,(s^6.m^{-1})$	$\beta_7\,(s^7.m^{-1})$
$۶/۱۵۰۵\times۱۰^{-۶۴}$	$-۵/۸۷۰۱\times۱۰^{-۷۷}$	$۴/۵۶۱۱\times۱۰^{-۹۰}$



شکل۲ : منحنی پاشندگی موجبر پله ای سیلیکونی در ناحیه تراهرتز.

فرآیند تولید ابرپیوستار برای پالس‌های فوق کوتاه در موجبرها را همانند تارهای نوری با حل معادله غیرخطی تعمیم یافته شرودینگر (GNLSE) می‌توان مطالعه کرد، با این تفاوت که برای موجبرها جملات مربوط به جذب دو فوتونی و جذب حامل آزاد باید در معادله لحاظ شود[۶]. از آنجاییکه انرژی فوتون تراهرتز (۴/۱ meV در ۱ THz) بسیار کوچک است و نمی‌تواند حامل‌های جدیدی را از طریق جذب دو فوتونی ایجاد کند، از آن چشم پوشی می شود[۳]. GNLSE برای موجبر به صورت زیر تعریف می‌شود. $A(z,t)$ پوش میدان، c سرعت نور در خلاء، ω_0 فرکانس مرکزی، α ضریب اتلاف خطی می‌باشند.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A + i\sum_{m=2}^{\infty} i^m \frac{\beta_m}{m!}\frac{\partial^m A}{\partial t^m} + i\gamma\left(1+\frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial t}\right)A(z,t) \times\left(\int_{-\infty}^{t} R(t-t')\left|A(z,t')\right|^2 dt'\right) \quad (۲)$$

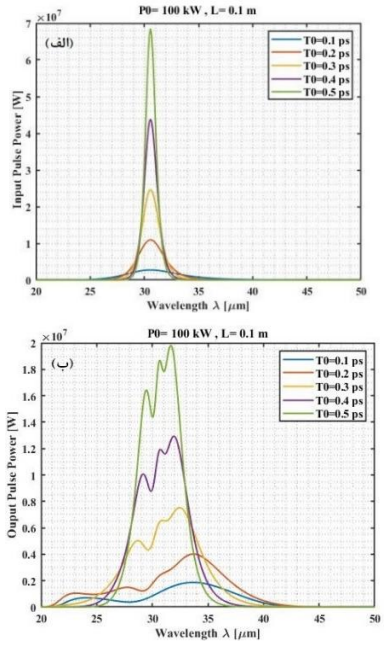
سمت راست معادله جمله اول اتلاف موجبر و جمله دوم پاشندگی مراتب بالاتر و جمله سوم شامل اثرات غیر خطی از جمله: مدولاسیون خودفاز، خود سرازیری و پراکندگی رامان است. تابع پاسخ رامان موجبر به صورت $R(t) = (1-f_R)\delta(t) + f_R\, h_R(t)$ [۶] شامل پاسخ آنی الکترون و سهم رامان تأخیری است. $h_R(t)$ مربوط به ارتعاشات ماده $h_R(t) = \Omega_R^2\,\tau_1 \exp(-t/\tau_2)\sin(t/\tau_1)$.

$\Omega_R/2\pi = 15.6\,\text{THz}$. $\tau_2 = 1/\Gamma_R$ ، $\tau_1 = 1/(\Omega_R^2 - \Gamma_R^2)^{1/2}$

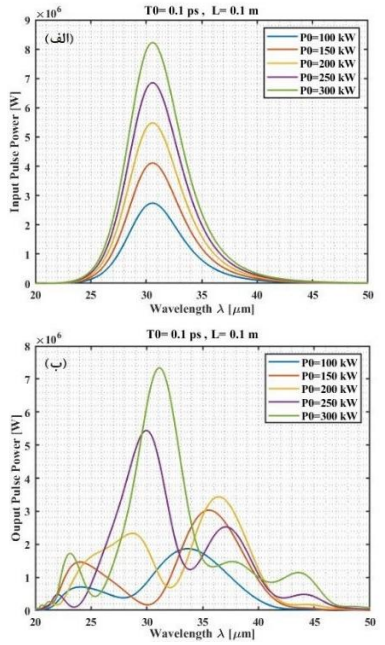
و پهنای کل در نصف بیشینه طیف بهره رامان در دمای اتاق $\Gamma_R/\pi = 105\,\text{GHz}$ [۷]. پدیده پراکندگی رامان القایی برای پالس ورودی با قطبش TM اتفاق نمی‌افتد[۵] پس $f_R = 0$ است. در این مقاله شبیه سازی طیف ابرپیوستار با استفاده از برنامه متلب و با روش فوریه گام مجزا انجام شده است. به منظور دستیابی به طیف ابرپیوستار هموار طول موج پمپ ورودی در رژیم پاشندگی غیرعادی موجبر و در نزدیکی λ_{ZWD} انتخاب شده است $\lambda_{pump} = ۳۰/۶\mu m$.

شکل ۳ نتایج شبیه سازی پارامترهای ۰/۱ – ۰/۵ ps = T_0 ، $P_0 = ۱۰۰$ kW ، $L = ۰/۱$ m را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین پهن‌شدگی مربوط به $T_0 = ۰/۱$ ps است. با تغییر توان قله پالس ۳۰۰ kW- $P_0 = ۱۰۰$ ، نتایج مربوطه در شکل ۴ آمده است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

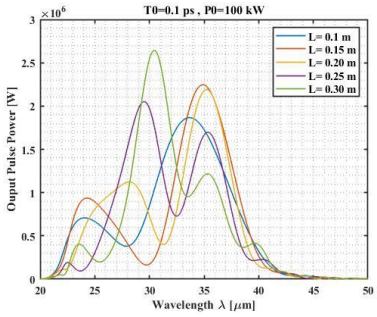


شکل ۳: طیف شبیه سازی شده (الف) پالس ورودی، (ب) ابرپیوستارخروجی به ازای پهنای پالس مختلف و $P_0 = ۱۰۰$ kW، $L = ۰/۱$ m.



شکل ۴: طیف شبیه سازی شده (الف) پالس ورودی، (ب) ابرپیوستارخروجی به ازای توان های قله پالس مختلف و $T_0 = ۰/۱$ ps، $L = ۰/۱$ m.

با توجه شکل ۴ پالس ورودی $T_0 = ۰/۱$ ps، $P_0 = ۱۰۰$ kW، $L = ۰/۱$ m پهن شدگی قابل قبولی دارد. با تغییر $L = ۰/۱ - ۰/۳$ m نتایج مربوطه در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: طیف ابرپیوستاردرخروجی موجبر به ازای طول های مختلف و $T_0 = ۰/۱$ ps، $P_0 = ۱۰۰$ kW.

نتیجه گیری

در این مقاله، برای اولین بار تولید ابرپیوستار در ناحیه تراهرتز در یک موجبر سیلیکونی پله‌ای با استفاده از حل معادله غیر خطی تعمیم یافته شرودینگر به روش فوریه گام مجزا شبیه سازی شد. با توجه به نتایج به دست آمده گسترده‌ترین و هموارترین طیف مربوط به $T_0 = ۰/۱$ ps، $P_0 = ۱۰۰$ kW، $L = ۰/۱$ m است.

مراجع

[1] H. Ahmad, M. R. Karim and B. M. A. Rahman, “Dispersion-engineered silicon nitride waveguides for mid-infrared supercontinuum generation covering the wavelength range 0.8–6.5 μm”, Laser Phys, Vol. 29, No. 2, pp 1-10, 2018.

[2] J. Wei, C. Ciret, M. Billet, F. Leo, B. Kuyken, S. P. Gorza, “Supercontinuum generation assisted by wave trapping in dispersion-managed integrated silicon waveguides”, Phys. Rev. Appl, Vol. 14, No. 5, pp. 1-11, 2020.

[3] S. Li, G. Kumar, and T. E. Murpy,’’ Terahertz nonlinear conduction and absorption saturation in silicon waveguides”, Optica, Vol. 2, No. 6, pp. 553–557, 2015

[۴] پاکارزاده، حسن، بهرامی، محبوبه، حسین‌آبادی شهرزاد،" طراحی یک موجبر بلور فوتونی با طول موج صفر پاشندگی در ناحیه تراهرتز"، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، **۱۳۶**، ۷۱۵-۷۱۲، ۱۴۰۰.

[5] H. Pakarzadeh and F. Akbari, “Propagation of terahertz pulses in photonic crystal-based rib silicon waveguides”, *Silicon*, https://doi.org/10.1007/s12633-021-pp. 01092-6, 2021.

[6] L. Yin, Q. Lin and G. P. Agrawal, “Soliton fission and supercontinuum generation in silicon waveguides”, Opt. Lett., Vol. 32, No. 4, pp 391-393, 2007.

[7] Q. Lin, O. J. Painter and G. P. Agrawal, “Nonlinear optical phenomena in silicon waveguides: Modeling and applications”, Opt. Express, Vol. 15, No. 25, pp 16604-16644, 2007.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

با سلام و تشکر از داوران محترم بخاطر نظرات دقیق و سازنده، موارد به شرح زیر تقدیم می‌شود:

۱) معیار و مبنای انتخاب ساختار پیشنهادی مرجع[۵] می‌باشد. در این مرجع پاکارزاده و همکاران به تولید تابش تراهرتز در یک موجبر پله‌ای پرداخته‌اند. ابعاد بیان شده بر اساس هدف طراحی موجبر که همان قرار گرفتن طول موج پاشندگی صفر موجبر در ناحیه تراهرتز است، تعیین شده است. زیراکه با توجه به مطالعات صورت گرفته، هموارترین طیف ابرپیوستار هنگام دمش در نزدیکی صفر پاشندگی ایجاد می‌شود.

۲) از نرم افزار لومریکال به منظور طراحی موجبر و به دست آوردن پارامترهایی مانند پاشندگی و در پی آن پاشندگی مرتبه دوم با استفاده از رابطه $\beta_2 = -\lambda_0^2 D/2\pi c$ و پاشندگی مراتب سوم و بالاتر با مشتق گیری از β_2 طبق رابطه $\beta_m = \left(d^m\beta/d\omega^m\right)_{\omega=\omega_0}, m = 0,1,2,..$ ، سطح مقطع مؤثر مد، اتلاف موجبر و ... استفاده شده است. معادله غیر خطی تعمیم یافته شرودینگر به منظور شبیه سازی طیف ابرپیوستار استفاده گردیده است. این معادله به روش فوریه گام مجزا و با کمک برنامه نویسی در برنامه متلب حل شده است. تمامی نمودارهای نشان دهنده طیف ابرپیوستار، با استفاده از برنامه متلب رسم شده است.

۳) بنا به نظر داور محترم مهمترین نتیجه در چکیده بیان شد.

۴) در صورت انتخاب گرافن ابتدا باید مشخصات پاشندگی و مشخصات غیرخطی موجبر را به دست آورد. سپس از این مشخصات به عنوان ورودی برای حل معادله تعمیم یافته غیرخطی شرودینگر استفاده شود و انتشار پالس و تولید ابرپیوستار در آن بررسی گردد منوط به اینکه افت آن در ناحیه تراهرتز زیاد نباشد که نیازمند مطالعات و بررسی مقالات بیشتری در این زمینه می‌باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]