

23<sup>rd</sup> Iranian Conference on Optics and Photonics and 9<sup>th</sup> Conference on Photonics Engineering and Technology Tarbiat Modares University, Tehran, Iran January 31- February 2, 2017

# تأثیر پارامتر چرپ در تحول پالس در نانوسیمهای سیلیکونی با پاشندگی مهندسی شده

زینب دلیریان، حسن پاکارزاده و علیرضا کشاورز

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده – در این مقاله تأثیر پارامتر چرپ در تحول پالس در نانوسیمهای سیلیکونی با پاشندگی مهندسی شده از طریق حل معادله غیرخطی شرودینگر با استفاده از نرم افزار متلب به روش فوریه گام مجزا بررسی میشود. با در نظر گرفتن پالس ورودی سکانتهایپربولیک از مرتبه فمتوثانیه و نیز لحاظ کردن اثرات غیرخطی و ضریب پاشندگی مرتبه دوم و سوم بصورت تابعی از طول، تأثیر پارامتر چرپ در انتشار پالس در طول نانوسیم، مورد مطالعه قرار میگیرد. نتایج نشان میدهد که مقدار و علامت چرپ تاثیر بسزایی در تحول پالس و بخصوص پهن شدگی آن در طول نانوسیم، مورد مطالعه قرار میگیرد. نتایج نشان میدهد که مقدار و علامت چرپ تاثیر بسزایی در تحول پالس و بخصوص پهن شدگی آن پارامترهای پالس، به گونهای انتشار پالس را کنترل کرد که کمترین پهنشدگی حین انتشار ایجاد شود.

كليد واژه- چرپ، معادله غيرخطي شرودينگر، مهندسي پاشندگي، نانوسيم سيليكوني.

## Impact of Chirp Parameter on the Pulse Evolution in Dispersion- Engineered Silicon Nanowires

Zeinab Delirian, Hassan Pakarzadeh, and Alireza Keshavarz

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

Abstract- In this paper, we investigate the impact of chirp parameter on the pulse evolution in dispersion-engineered silicon nanowires by solving nonlinear Schrödinger equation (NLSE) using the split-step Fourier (SSF) method in MATLAB. By assuming femtosecond hyperbolic secant input pulse and including nonlinear effects, second- and third-order dispersion coefficients as a function of length the effect of chirp parameter on pulse propagation along nanowire, is investigated. The results show that the value and sign of the chirp has a significant impact on the pulse evolution and specially the pulse broadening along the nanowire so that the broadening can be reduced by adding a positive chirp to the input pulse. Hence, by choosing proper value of pulse parameters, pulse propagation can be controlled such that the minimum broadening during propagation happens.

Keywords: Chirp, Nonlinear Schrödinger equation, Dispersion engineering, Silicon Nanowire.

#### ۱– مقدمه

بیشترین انگیزه برای توجه به پدیدههای نوری غیرخطی در نانوسیمهای سیلیکونی Si حبسشدگی نوری قوی در این موجبرها با ابعاد زيرميكرومتر است. بدليل اختلاف ضريب شکست بالا و سطح مقطع بسیار کوچک موجبر، شدت میدان نوری چندین مرتبه از اندازه آن در درون مغزی تار تک مد بالاتر است. علاوه بر این، پاسخ غیرخطی بلور Si بسیار قوی است. در نتیجه، حتی برای یک سیگنال نوری با قله توان در محدوده چند ده میلی وات، اثرات نوری غيرخطى مى تواند قابل توجه باشد [1]. علاوه بر اثرات غيرخطي افزايش يافته، موجبرهاي با مغزى فوقالعاده کوچک خواص مفید دیگری مانند پاشندگی سرعت گروه بسیار قابل مهندسی، طول عمر حامل آزاد کاهش یافته در نیمه هادی ها، و طول کمینه برای مجتمع سازی بهینه تراشه-های فوتونیکی فراهم میکنند. ترکیبی از این خواص نمایش مؤثری از کاربرد موجبرهای با حبس کنندگی بیشینه از جمله مدولاتورهای تمام نوری، سوئیچها، تاخیردهندههای پالس، مولدها، تقویت کنندهها، فشرده کنندههای پالس، و مبدلهای طول موج ارائه میدهد [۳،۲].

اخیراً تلاش زیادی برای طراحی و توسعه ادوات و منابع لیزر جدید که به خصوصیتهای طیفی و زمانی اجازه کنترل و ارتباط با دقت زیاد را میدهد، انجام شده است. این منجر به کارائی بهتر در کاربردهایی که از فوتونیک برای نمونهبرداری، علم اندازه گیری(مترولوژی) و پردازش سیگنال استفاده می-شود، گردیده است. بخصوص پالسهای چرپ شده و عدسی زمانی بعنوان ابزارهای اساسی که قادر به اندازهگیری، مشخصهیابی و دستکاری سیگنالها و پدیدههای نوری بسیار سريع بوسيله وسايل الكترونيكي با سرعت نسبتاً پايين هستند، پدیدار شدند. بیشتر کاربردها، از پالس چرپ شده بعنوان حاملی که اطلاعات روی آن کدگذاری می شوند، استفاده می کنند. چندین انبار اطلاعات بین هر پالس چرپ شده ضبط می شود و اطلاعات با استفاده از اکتساب داده الكترونيكي بازيابي ميشوند [۴]. پارامتر چرپ ورودي بهويژه تأثیر قابل ملاحظهای در روند تحول شکل و طیف پالس در طول نانوسیمهای معمولی دارد، بهطوریکه در رژیم پاشندگی غیرعادی برای پالسهای چرپشده مثبت (βrC<۰) فشردگی پالس رخ می دهد و بالعکس. به علاوه با

افزایش مقدار چرپ، میزان تغییر در شکل و طیف پالس خروجی بطور چشم گیری افزایش مییابد [۵]. در نانوسیم-های سیلیکونی با پاشندگی مهندسی شده، پارامترهای خطی و غیرخطی بصورت تابعی از طول نانوسیم تغییر میکنند که این خود منجر به مزایای فراوان نسبت به نانوسیمهای معمولی (بدون مهندسی شده) میشود [۶]. در این تحقیق برای اولین بار تأثیر چرپ در انتشار پالس در نانوسیم مهندسی شده مطالعه و برای چرپهای مختلف مثبت و منفی تحول پالس در طول نانوسیم شبیهسازی میشود. همچنین فاکتور پهنشدگی پالس در طول نانوسیم برای چرپهای مختلف محاسبه می گردد.

### ۲- مبانی نظری و نتایج شبیه سازی

در این تحقیق برای شبیه سازی انتشار یک پالس چرپ شده، که در اینجا از نوع سکانت هایپر بولیک است، در طول نانوسیم سیلیکونی مهندسی شده، که اثرات خطی و غیر خطی آن کنترل شده است، از نرمافزار متلب استفاده می شود. انتشار پالس توسط معادله غیر خطی شرودینگر می شود. انتشار پالس توسط معادله غیر خطی شرودینگر رفته است. پالس سکانت هایپر بولیک چرپ شده توسط رابطه زیر مشخص می گردد [۷]:

$$A = A_0 \sec h \left(\frac{t}{T_0}\right) \exp \left[-\frac{iC}{2} \left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right]$$
(1)

که در آن توان قله  $P_0 = A_0^2 = 2.21W$ ، پهنای پالس  $T_0 = 100 \, fs$ ، پهنای پالس  $T_0 = 100 \, fs$  وارد  $T_0 = 100 \, fs$  ورثيم پالس فوق کوتاه نمی شويم در معادله غيرخطی شرودينگر از اثر رامان و پاشندگی های مراتب بالاتر صرف نظر کردهايم و لذا برای معادله غيرخطی شرودينگر داريم[Y]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma |A|^2 A$$
(7)

بهطوریکه افت نانوسیم  $\alpha = 2dB/cm$ ، ضریب پاشندگی مرتبه مرتبه دوم  $\beta_2 = \beta_{2_0} \exp^{-\alpha_1 L}$  مرتبه دوم  $\beta_3 = \beta_{3_0} \exp^{-\alpha_1 L}$  سوم  $\beta_3 = \beta_{3_0} \exp^{-\alpha_1 L}$  و سطح مؤثر مدی موجبر  $A_{eff} = -3 \times 10^{-7} (W - 375 \times 10^{-9}) + 0.215 \times 10^{-12}$  ۱۴–۱۲ بهمن ۱۳۹۵

$$W$$
 ,  $\beta_{3_0} = -0.04 \, ps^3 / m$  ,  $\beta_{2_0} = -2.56 \, ps^2 / m$  پهنای   
نانوسیم و  $\alpha_1 = 4.5 dB / cm$  هستند. به علاوه پارامتر  
غیرخطی نانوسیم  $\gamma = \Gamma + \Gamma$  هستند. به علاوه پارامتر  
 $n_2 = 6 \times 10^{-18} m^2 / W$  است به طوری که  
 $\Gamma = \frac{2m_2}{\lambda A_{eff}}$  میباشد که در آن  $M/M^2 = 10 \times 6 \times 6$   
 $\sigma_{CP} = \frac{2m_2}{\lambda A_{eff}}$  موج  
 $r_{TPA} = \frac{\Gamma}{\Gamma} = 0.12$  میباشد و نسبت  $120 = \frac{\Gamma}{\Gamma} = 1550 \, nm$   
 $r_{TPA} = \frac{\Gamma}{\Gamma} = 0.12$  میباشد و نسبت  $\lambda = 1550 \, nm$   
 $r_{TPA} = \frac{\Gamma}{\Gamma} = 0.12$  میباشد و نسبت  $\lambda = 1550 \, nm$   
 $r_{TPA} = \frac{1}{2} + 100 \, nm$  مریب شکمینی از قدرت مربوط به پدیده جذب دو فوتونی است که  
 $r_{TPA} = \frac{1}{2} + 100 \, nm$  می میباشد و نسبت  $\lambda = 0.12$  مربو  
 $\gamma_{TPA} = \frac{1}{2} + 100 \, nm$  مربe (100 \, nm)



شکل ۱: طرح نانوسیم سیلیکونی با پاشندگی مهندسی شده [۸].

شکل ۲ چگونگی تحول پالس را برحسب طول بهنجار (مسافت تقسیم بر طول پاشندگی) نانوسیم نشان میدهد. همانطور که دیده میشود به ازای چرپ مثبت (شکل ۲ (الف)) به دلیل  $0 > \beta_2 C$  در نزدیکی طول بهنجار  $1 = \frac{z}{L_D}$ فشردگی داریم و همچنین چرپ مثبت باعث افزایش نوسانات ناشی از پاشندگی مرتبه سوم (TOD) شده و پالس را به شدت پهن می کند، اما چرپ منفی (شکل ۲ (ب)) به نحوی نوسانات یا همان چرپ اکتسابی را خنثی کرده و با حفظ تقارن شکل پالس آن را با سرعت کمتری نسبت به چرپ مثبت پهن می گرداند.

برای واضحتر دیدن اثر چرپ بر پهنشدگی پالس نمودار پهنشدگی بهنجار  $\frac{\sigma}{\sigma_0}$  را به ازای چرپهای مختلف در حین انتشار رسم کردهایم (شکل ۳). پهنشدگی بهنجار به این صورت تعریف میشود [۷]

$$\frac{\sigma(z)}{\sigma(0)} = \sqrt{\frac{\left\langle T(z)^2 \right\rangle - \left\langle T(z) \right\rangle^2}{\left\langle T(0)^2 \right\rangle - \left\langle T(0) \right\rangle^2}} \tag{(\texttt{``)}}$$

که در آن  $\sigma_0$  پهنای زمانی پالس ورودی است. این نمودار نشان میدهد که با منفیتر شدن چرپ پهنشدگی بسیار زیاد شده و با مثبت شدن آن تا حدودی پهنشدگی کم و فشردهسازی ایجاد میگردد که در نتیجه با تنظیم دقیق چرپ و TOD میتوان به رفتار سالیتون رسید.





شکل ۲: تحول پالس چرپ شده الف) مثبت C = +2 ب) منفی C = -2 در طول نانوسیم با پاشندگی مهندسی شده.



شکل ۱: تحول پهنشد کی پالس در طول نانوسیم با پاشند کی مهندسی-شده به ازای مقادیر مختلف چرپ.

تاکنون فرض بر این بود که توان ورودی  $P_0 = 2.21W$  ثابت

است حال اگر برای C = 1 توانهای ورودی مختلف را در نظر بگیریم میبینیم که با افزایش توان پهنشدگی افزایش مییابد. کمترین پهنشدگی در  $W = P_0$  روی میدهد. شکل ۴ این تغییرات را نشان میدهد.



شکل ۴: تحول پهنشدگی پالس در طول نانوسیم با پاشندگی مهندسی شده به ازای مقادیر مختلف توان و مقدار چرپ ثابت C=1 و  $T_0=100 fs$ .

همانطور که در شکلهای قبل مشاهده شد  $P_0$  و P و  $P_0$  میانلور که در شکلهای قبل مشاهده شد  $P_0$  و  $P_0$  پارامترهای مهم تاثیرگذار در انتشار پالس در نانوسیم می باشند. بنابراین میتوان با انتخاب مناسب این پارامترها، به گونه ای انتشار پالس را کنترل کرد که کمترین پهن شدگی ایجاد شود. در شکل ۵ با درنظر گرفتن 1=7،  $W^1 = 0$  و  $P_0 = 100 fs$  ایجاد شود. در شکل ۵ با در طول نانوسیم شبیه سازی شده است چنانچه ملاحظه می گردد شکل پالس در طول انتشار خون با تشار گرفتا ایتشار گرفت. تقریبا



شکل ۵: تحول پالس بهینه در طول نانوسیم با پاشندگی مهندسی شده.



شکل ۶: تحول پهنشدگی پالس بهینه در طول نانوسیم با پاشندگی مهندسی شده.

### ۳- نتیجهگیری

با انتشار پالس در طول نانوسیم با پاشندگی مهندسی شده ملاحظه می گردد که با افزودن چرپ مثبت به پالس ورودی پهنشدگی کاهش مییابد. همچنین با افزایش اندازه چرپ و توان ورودی پهنشدگی زیاد می شود. بنابراین می توان با انتخاب مناسب این پارامترها، به گونه ای انتشار پالس را کنترل کرد که کمترین پهنشدگی ایجاد شود. همچنین با تنظیم مناسب پارامترهای پالس می توان در نانوسیمهای سیلیکونی رفتار سالیتونی ایجاد و یا سیگنال را پردازش کرد.

#### مراجع

- [1] R. M. Osgood, N. C. Panoiu, J. I. Dadap, X. Liu, X. Chen, I-Wei Hsieh, E. Dulkeith, W. M. J. Green, Y. A. Vlasov, "Engineering nonlinearities in nanoscale optical systems: physics and applications in dispersion-engineered silicon nanophotonic wires", Adv. Opt. Photonics, Vol. 1, pp. 162– 235, 2009.
- [2] J. B. Driscoll, R. M. Osgood, R. R. Grote, J. I. Dadap, N. C. Panoiu, "Squeezing Light in Wires: Fundamental Optical Properties of Si Nanowire Waveguides", J. Lightwave Technol., Vol. 33, No. 14, pp. 3116-3131, 2015.
- [3] M. A. Foster, A. C. Turner, M. Lipson, A. L. Gaeta, "Nonlinear Optics in Photonic Nanowires", Opt. Express, Vol. 16, pp. 1300-1320, 2008.
- [4] P. J. Delfyett, D. Mandridis, M. U. Piracha, D. Nguyen, K. Kim, S. Lee, "Chirped pulse laser sources and applications", Prog. Quant. Electron., Vol. 36, pp. 475–540, 2012.
- [5] H. Pakarzadeh, Z. Delirian, M. Taghizadeh, "Simulation of Chirped Pulse Propagation in Silicon Nanowires: Shape and Spectrum Analysis", Opt. Photonics J., Vol. 6, pp. 53-61, 2016.

- [7] G. p. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* 4<sup>th</sup> edition, Academic Press, 2006.
- [8] D.C. Zografopoulos, R. Beccherelli, E.E. Kriezis, "Quasisoliton propagation in dispersion-engineered silicon nanowires", Opt. Commun., Vol. 285, pp. 3306–3311, 2012.