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

فشرده‌سازی پالس تا محدوده فمتوثانیه با درنظر گرفتن مرتبه‌های بالای سالیتون در تارهای بلوری فوتونی

رضا سعیدی‌زاده، علیرضا خورسندی، سعید قوامی صبوری، مسعود سعید

گروه فیزیک دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده – در این مقاله فشرده‌سازی پالس‌ها از محدوده‌ی پیکوثانیه به فمتوثانیه به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته شده است. روش مورد استفاده برای فشرده‌سازی پالس، تکنیک مرتبه‌های بالای سالیتون است که بدون نیاز به قطعه اپتیکی می‌توان یک پالس فشرده در اختیار داشت. تار نوری مورد استفاده در این مقاله از نوع تارهای فوتونیک کریستال میان‌تهی مملوء از گاز زنون است که با فرض ناچیز در نظر گرفتن اتلاف، در طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر می‌توان پالس ۱ پیکوثانیه را تا ۱۰ فمتوثانیه فشرده کرد.

کلید واژه- فشرده‌سازی پالس، مرتبه‌های بالای سالیتون ، تار فوتونیک کریستال میان‌تهی

Pulse compression up to fs scale using high-order soliton consideration in photonic crystal fiber

Reza Saeedizadeh, Alireza Khorsandi, Saeed Ghavami Sabouri, Masoud Saeed

Department of physics, University of Isfahan, Isfahan

Abstract- In this paper, pulse compression from picosecond range to femtosecond is numerically investigated. The method used for pulse compression is high-order soliton technique which can be obtained compressed pulse by selecting appropriate length of the fiber without any optical components. The optical fiber used in this paper is a hollow-core photonic crystal fiber filled with xenon, which loss is considered negligible. In this condition, we can obtain a pulse width of 10 fs from a pulse width of 1 ps.

Keywords: compression pulse, high-order soliton, Hollow-core photonic crystal fiber

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-18]

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

۱) مقدمه

امروزه پالس‌های فوق کوتاه به عنوان یک ابزار پراهمیت در کاربردهای متنوعی از قبیل علم مواد، زیست شناسی و فیزیک مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱]. به منظور تولید پالس‌های فوق کوتاه در محدوده فمتوثانیه، از روش‌های مختلفی، همچون تکنیک قفل‌شدگی در لیزر، می‌توان بهره برد. این تکنیک که اولین روش تولید پالس فمتوثانیه به حساب می‌آید پیچیده، پرهزینه و نیازمند یک منبع انرژی بالایی است[۲]. به همین دلایل، استفاده از خاصیت غیرخطی تارهای نوری، با توجه به سطح مقطع کوچک آن‌ها، جهت فشرده‌سازی پالس مورد توجه قرار گرفت. تکنیک‌های فشرده‌سازی پالس بر پایه اثرات غیر خطی محیط تار، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:۱) استفاده از تار نوری به همراه قطعه‌های اپتیکی همچون منشور و آینه‌های چیرپینگ به منظور ایجاد تأخیر در مؤلفه‌های فرکانسی پالس.۲) استفاده از خاصیت پاشندگی منفی در محیط تار، بدون به کارگیری هر گونه قطعه اپتیکی. این تکنیک اصطلاحاً « مرتبه‌های بالای سالیتون » نامگذاری شده است[۳].

تارهای نوری با هسته سیلیکا به عنوان اولین نوع تار استفاده شده برای تولید پالس فمتوثانیه در نظر گرفته شد. به منظور تولید پالس‌هایی با انرژی بالا، سیلیکا دارای محدودیت‌های ساختاری است. به همین دلیل تارهای نوری فوتونیک کریستال با هسته میان‌تهی که مملوء از گازهای بی‌اثر است جایگزین مناسبی برای تارهای سیلیکایی محسوب می‌شدند. با استفاده از تارهای نوری از جنس سیلیکا می‌توان پالس‌هایی با انرژی چند نانو ژول تولید کرد. این در حالی است که انرژی پالس‌های تولید شده در تارهای فوتونیک کریستال، به همراه قطعات اپتیکی همچون آینه چیرپینگ، در محدوده میکروژول می‌باشد. حد فاصل بین این دو تکنیک، روش مرتبه‌های بالای سالیتون است که می‌توان پالس‌هایی با انرژی ۱۰ تا ۵۰۰ نانو ژول تولید کرد. در این مقاله به بررسی این تکنیک در تارهای فوتونیک کریستال با هسته مملوء از گاز زنون پرداخته می‌شود.

۲) مبانی نظری

در محیط تارهای نوری، خاصیت اپتیکی به دو دسته‌ی اثرات خطی همچون مرتبه‌های مختلف پاشندگی و اثرات غیر خطی مانند SPM و پراکندگی رامان تقسیم‌بندی می‌شود. با استفاده از معادله غیر خطی شرودینگر می‌توان رفتار پالس در محیط تار نوری را مورد بررسی قرار داد. در این مقاله با ناچیز در نظر گرفتن اتلاف در محیط یک تار فوتونیک کریستال، مرتبه‌های دوم(GVD) و سوم(TOD) پاشندگی و اثر SPM به ترتیب به عنوان اثرات خطی و غیر خطی غالب بر سایر اثرات در نظر گرفته شده است. با لحاظ قرار دادن متغیرهای بدون بعد $\xi = \frac{z}{L_D}$ و $\tau = \frac{T}{T_0}$ معادله شرودینگر از رابطه[۳]:

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \overbrace{iN^2 |U|^2 U}^{SPM} \underbrace{- i\,\mathrm{sgn}(\beta_2)\frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0}\frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3}}_{Linear\ effect} \quad (۱)$$

بدست می‌آید؛که T_0 پهنای پالس ورودی و N مرتبه سالیتون است که از رابطه $N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0}{|\beta_2|}$، با γ ضریب غیر خطی و P_0 بیشینه توان پالس، بدست می‌آید. در این رابطه U میدان بهنجارشده ورودی است که رابطه آن به صورت:

$$U = N\,\mathrm{sech}(\frac{T}{T_0}) \quad (۲)$$

است. در تارهای فوتونیک کریستال پاشندگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۱]:

$$\beta(\omega) = \frac{n(\omega)\omega}{c}\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{u_m}{r_{core} n(\omega)\omega}\right)^2\right)$$

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

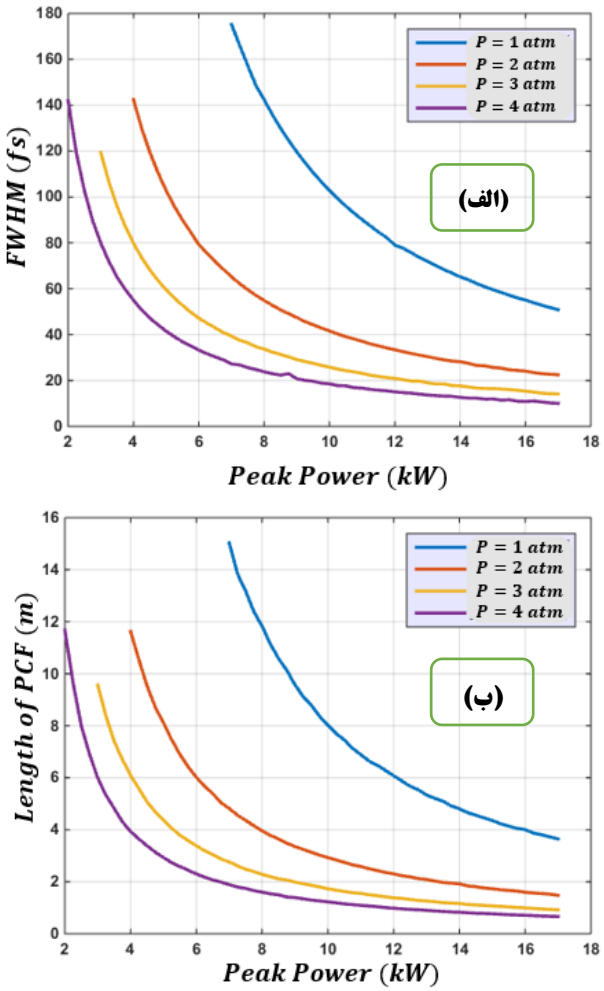
[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-18]

$$\Rightarrow \beta(\lambda) = n(\lambda)\frac{2\pi}{\lambda}\left(1-\frac{1}{2}\left(\frac{2.405\lambda}{2\pi r_{core} n(\lambda)}\right)^2\right) \quad (۳)$$

در این رابطه، λ طول‌موج پالس ورودی، r_{core} شعاع هسته تار و $n(\lambda)$ معادله سلمایر [۴] گاز درون تار فوتونیک کریستال است. با استفاده از رابطه $\beta_m = \frac{d^m \beta}{d\lambda^m}$ ، مرتبه دوم و سوم پاشندگی بدست می‌آید. مهم‌ترین پارامتری که در روش مرتبه‌های بالای سالیتون مورد استفاده قرار می‌گیرد مرتبه آن یعنی N است که با توجه به معادله بیان شده برای این پارامتر، با افزایش بیشینه توانی، P_0 ، می‌توان مقدار آن را تغییر داد که در قسمت بعد به طور مفصل در مورد آن صحبت خواهد شد.

۳) شبیه‌سازی و نتایج

شبیه‌سازی‌ها برای یک تار فوتونیک کریستال میان‌تهی با قطر ۱۰ میکرون و مملوء از گاز زنون با استفاده از روش عددی SSFT بدست آمده است، بطوریکه پالس ورودی آن دارای پهنای ۱ پیکوثانیه و طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر می‌باشد. شکل (۱.الف) نشان می‌دهد که با افزایش بیشینه توانی، در فشارهای مختلف، می‌توان ضریب فشرده‌سازی را افزایش داد و پالسی با پهنای کوچکتر بدست آورد. از طرفی همانطور که در شکل (۱.ب) نشان داده شده است با افزایش بیشینه توانی می‌توان در طول‌های کوتاهتر و مناسب‌تری به فشرده‌سازی بهینه دست پیدا کرد. در واقع، با توجه به اینکه روش مورد استفاده برای فشرده‌سازی پالس، روش مرتبه‌های بالای سالیتون است، با افزایش بیشینه توانی، مرتبه سالیتون افزایش می‌یابد، بطوریکه در مرتبه‌های بالا، می‌توان ضریب فشرده سازی را افزایش و طول تار را کاهش داد. این امر در حالی اتفاق می‌افتد که با افزایش فشار، شرایط تولید پالس‌های فمتوثانیه بهینه‌تر می‌شود؛ به عبارت دیگر، افزایش فشار باعث تولید پالس-هایی با پهنای کوچکتر در طول‌های کوتاهتر می‌گردد. بنابراین با توجه به اینکه فشار، یک پارامتر فعال به حساب می‌آید، با افزایش یا کاهش آن می‌توان پهنای پالس خروجی را تغییر داد که این اتفاق به معنای تنظیم‌پذیری چیدمان آزمایشگاهی با استفاده تارهای فوتونیک کریستال میان‌تهی است.



شکل ۱: تغییرات الف)پهنای پالس و ب) طول تار فوتونیک کریستال با قطر ۱۰ میکرون نسبت به بیشینه توانی در فشارهای مختلف برای یک پالس ورودی با پهنای یک پیکوثانیه و طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر

در طرف مقابل باید توجه داشت که افزایش بیشینه توانی دارای محدودیت است، بطوریکه این محدودیت به پهنای پالس ورودی و فشار گاز درون تار بستگی دارد. جدول (۱) میزان فشرده‌سازی برای پالس‌ورودی با پهناهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش بیشینه توانی، که با افزایش مرتبه سالیتون همراه است، شکل پالس از بین می‌رود و به چند قله تقسیم می‌شود

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

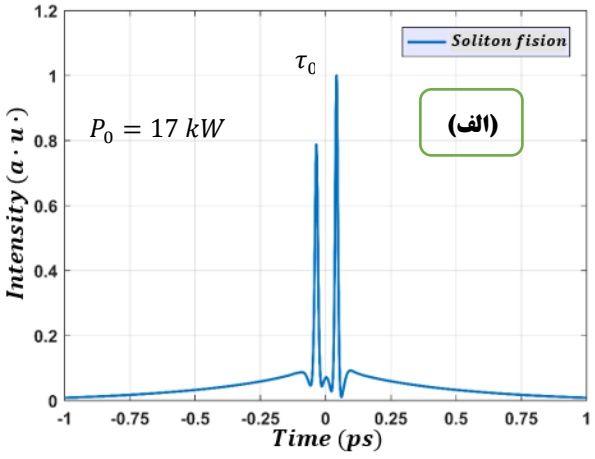
[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-18]

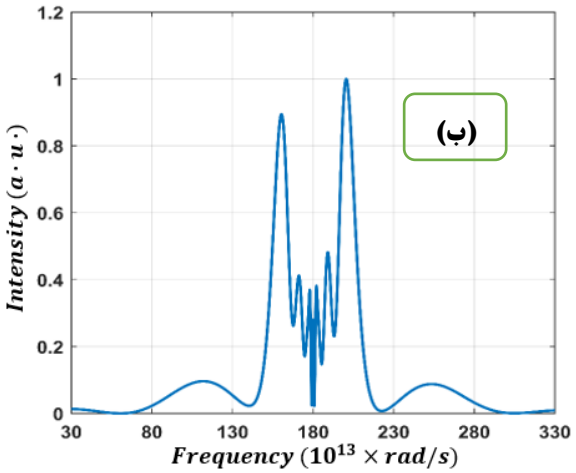
که اصطلاحاً به آن « soliton fission » گفته می‌شود. علاوه بر این، برای پالس‌هایی با پهنای ورودی بزرگتر، میزان فشرده‌سازی، کمتر و طول تار برای رسیده به این فشرده‌سازی، بزرگتر خواهد بود.

جدول۱: نتایج محاسبه شده برای فشرده‌سازی پالس در فشار۴ اتمسفر و طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر نسبت به پهناهای مختلف

$\tau_{1f}^{*}(ps)$	$L = 26.1\ m$	$L = 6.53\ m$	$L = 0.7\ m$
10	$N \approx 7$ $P_0 = 400W$ $\tau_{2f} = 43.2\ fs$	*Soliton fission region*	*Soliton fission region*
5	$N \approx 4$ $P_0 = 450W$ $\tau_{2f} = 81.3\ fs$	$N \approx 7$ $P_0 = 1.6kW$ $\tau_{2f} = 21.83\ fs$	*Soliton fission region*
1	$N \approx 1.5$ $P_0 = 1.7kW$ $\tau_{2f} = 970\ fs$	$N \approx 2$ $P_0 = 3\ kW$ $\tau_{2f} = 83.33\ fs$	$N \approx 5$ $P_0 = 17\ kW$ $\tau_{2f} = 10.06\ fs$

شکل (۲) نمونه‌ای از تقسیم شدن پالس در ناحیه soliton fission را نشان می‌دهد.





شکل۲: الف) پروفایل شدت نسبت به زمان مربوط بـه ناحیـه soliton fission برای یک تار فوتونیک کریستال به قطـر ۱۰ میکـرون و طـول ۰,۷۳ متر مملوء از گاز زنون با فشار ۴ اتمسفر ب) پروفایل شدت نسبت به فرکانس، متناظر با شکل الف.

٤) نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های فشرده‌سازی پالس، استفاده از مرتبه‌های بالای سالیتون است. در این روش بدون استفاده از هر گونه قطعه اپتیکی، تنها با استفاده از یک تار نوری فوتونیک کریستال و بر پایه‌ی اثرات غیر خطی محیط تار، می‌توان پالس‌هایی در محدوده زیر ۳۰ فمتوثانیه بدست آورد. در این روش انرژی پالس‌های فشرده شده نسبت به پالس‌های تولید شده در تارهایی با هسته سیلیکا بیشتر می‌باشد که یک مزیت مهم نسبت به روش‌های اولیه محسوب می‌شود.

٥) مرجع‌ها

[1] B.A. Lopez-Zubieta, "*Theoretical analysis of single-cycle self-compression of near infrared pulses using high-spatial modes in capillary fibers*", Opt. Express, Vol. 26, No. 5, pp. 6345, 2018.

[2] Claude Rullier, *Femtosecond Laser Pulses*, Springer Press, 2005.

[3] Govind P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Springer Press, 2013.

[4] M. Nisoli, S. De Silvestri and O. Svelto, "Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique", Appl. Phys. Lett. Vol 68, 1996.

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-18]

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