

کنترل پاشندگی سرعت گروه در سیستم‌های لیزری تپ کوتاه توسط بلورهای فوتونی یک‌بعدی

شیری، رامین^{۱،۲}؛ صفری، ابراهیم^۱؛ باناج، علیرضا^۲

^۱گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

^۲ پژوهشگاه لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

چکیده

در این تحقیق، قابلیت بلورهای فوتونی یک‌بعدی جهت جبران پاشندگی سرعت گروه و در نتیجه فشرده‌سازی تپ‌های نوری فوق‌کوتاه در سیستم‌های لیزری تپ‌کوتاه به صورت نظری مورد مطالعه قرار گرفته است. دو نوع ساختار چندلایه‌ای ساده و مدرج متشکل از مواد دی‌الکتریک تیتانیا و سیلیکا با ضخامت و دوره تناوب یکسان مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفتند. برای ساختار مدرج با ضریب شکست تدریجی، پروفایل ضریب شکست نمائی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ساختار دارای لایه مدرج، رفتار فشرده‌سازی بطور موثری بهبود می‌یابد. فاکتور فشرده‌سازی تا ۲۲٪ برای ساختار مدرج با پروفایل نمائی در این نوع ساختارها به دست آمد.

Group velocity dispersion control in ultrashort-pulse laser systems by 1D photonic crystals

Shiri, Ramin^{1,2}; Safari, Ebrahim¹; Bananej, Alireza²

¹ Department of Physics, University of Tabriz, Tabriz,

² Laser and Optics Research School, NSTRI, Tehran

Abstract

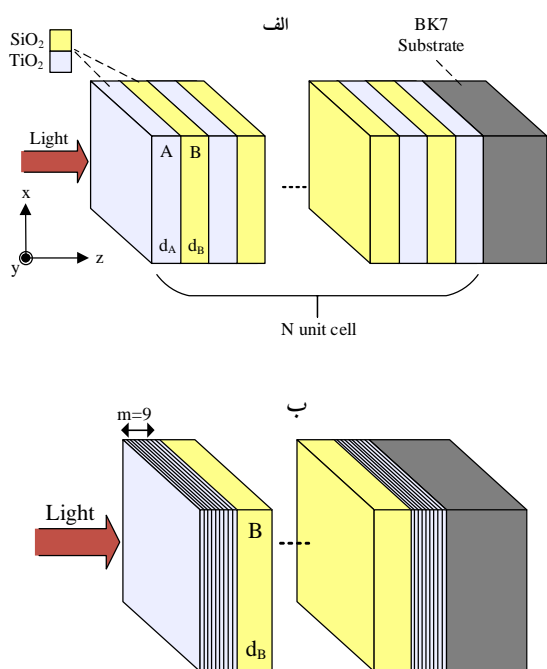
In this study, the capability of one-dimensional photonic crystals for dispersion compensation in ultrashort-pulse laser systems have been theoretically investigated. Two types of simple and graded index multi-layer structures consisting alternating layers of TiO₂ and SiO₂ with the same total thicknesses and periodicity have been investigated and compared. For the graded structure, refractive index distribution with exponential profile have been considered. The results revealed that in the graded structure, compression behavior of the system efficiently improves. The compress factor of as much as 22% obtained with exponential profile of such the structures.

PACS No. 78.20

مقدمه

محدود می‌سازد پاشندگی ماده است که باعث می‌شود مولفه‌های فرکانسی مختلف تپ با سرعت‌های مختلفی در محیط منتشر شوند. این امر منجر به پاشندگی سرعت گروه می‌شود که پهن-شدگی زمانی تپ (چرپ) را به همراه دارد. روش‌های مرسوم جبران پاشندگی شامل استفاده از جفت منشور و جفت توری هستند [۳-۴] که دارای معایب عمده‌ای از جمله عدم جبران اثرات پاشندگی‌های مراتب بالا [۵] و نیز نیاز به فواصل بزرگ جهت ایجاد پاشندگی مورد نیاز می‌باشند. بلورهای فوتونی کاندیدای

یکی از دستاوردهای عظیم فناوری لیزر در سال‌های اخیر، بدون تردید توسعه‌ی روش‌های تولید و شکل‌دهی تپ‌های نوری فوق-کوتاه می‌باشد. تپ‌های فوق‌کوتاه لیزری به‌خاطر کاربردهای گسترده‌شان در زمینه‌های متعدد [۱-۲] مورد توجه وسیعی می‌باشند به همین دلیل، تولید تپ‌های لیزری با کمترین پهنای ممکن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. یکی از مهمترین عواملی که کمترین پهنای قابل دسترس در سیستم‌های لیزری تپ‌کوتاه را



شکل ۱: ساختار بلور فوتونی یک بعدی متشکل از مواد دی الکتریک A و B به- عنوان مواد با ضرایب شکست بالا و پایین (الف) ساده (ب) تدریجی

مولفه X بردار موج در هر لایه بشکل زیر نوشته می شود:

$$k_{jx} = n_j \frac{\xi}{c} \cos \theta_j \quad (3)$$

فرض شده است که ضریب شکست لایه تدریجی از مقدار کمینه ی $n_{\min}=1/5$ تا مقدار بیشینه ی $n_{\max}=2/5$ تغییر می کند. بجای یک لایه ی منفرد با چنین مشخصه ای، ما از ۹ لایه ی کوچک تر با همان ضخامت کل که ضریب شکست آنها بطور نمایی در لایه وسط به ماکزیمم رسیده و سپس با همان شیب در لایه ی آخر به مینیمم می رسد استفاده نمودیم. چنین لایه های تدریجی را می توان با ترکیب تیتانیا (TiO_2) و سیلیکا (SiO_2) و سپس تغییر نسبت حجمی آنها که با X در ماده ترکیبی $(\text{TiO}_2)_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ نمایش داده می شود ایجاد کرد [۱۰]. برای توصیف پروفایل نمائی مورد استفاده در لایه تدریجی با ضخامت L از تابع زیر استفاده شده است [۱۱]:

مناسبی برای کنترل پاشندگی در سیستم های لیزری فمتوثانیه ای به- شمار می روند [۶]. این بلورها، ساختارهای تناوبی هستند که دارای گاف نوری فوتونی می باشند [۷]. ثابت شده است که چنین ساختارهای فوتونی دارای رفتار پاشندگی شدیدی در نزدیکی لبه ی گاف نوری می باشند [۸]. در این کار، برای ساختار ساده از لایه- های متناوب تیتانیا و سیلیکا استفاده شده و رفتار فشرده سازی آن در برابر تپ های فمتوثانیه ای لیزری دارای چرپ اولیه مثبت در ناحیه طیفی مادون قرمز نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان ساختار دوم، یکی از لایه های سلول واحد در ساختار ساده با لایه ای دارای ضریب شکست تدریجی با پروفایل نمایی جایگزین شده است. نشان داده شد که توانایی یک بلور فوتونی یک بعدی دارای لایه ی با ضریب شکست تدریجی به عنوان یک جبران گر پاشندگی به طور موثری افزایش می یابد.

تئوری

طرح شماتیک یک بلور فوتونی یک بعدی ساده و تدریجی در شکل ۱ نشان داده شده است. ما در اینجا از تیتانیا (A) و سیلیکا (B) به ترتیب به عنوان مواد با ضرایب شکست بالا ($n_A=2/5$) و پایین ($n_B=1/5$) با ضخامت های d_A و d_B استفاده نموده ایم. فرض ما بر این است که نور در راستای محور Z منتشر می شود و برای محاسبه ضرایب عبور و بازتاب کل ساختار، از روش ماتریس انتقال [۹] استفاده می کنیم. ماتریس انتقال ساختار که دامنه های امواج در سمت چپ و راست بلور را به هم مرتبط می سازد بشکل زیر نوشته می شود:

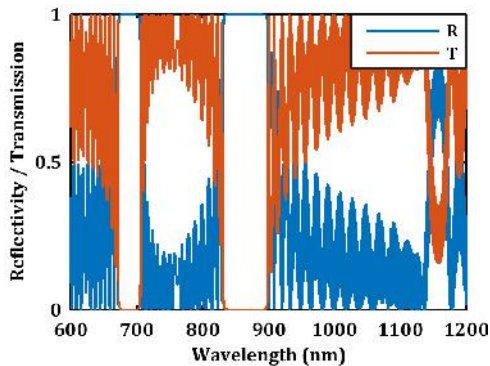
$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = D_s^{-1} \left[\prod_{j=1}^N D_j P_j D_j^{-1} \right] D_s \quad (1)$$

که در آن P ماتریس انتشار و D ماتریس دینامیکی برای موج TE بصورت زیر تعریف می شوند:

$$P_j = \begin{pmatrix} e^{i\ell_j} & 0 \\ 0 & e^{-i\ell_j} \end{pmatrix}, D_j = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ n_j \cos \theta_j & -n_j \cos \theta_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

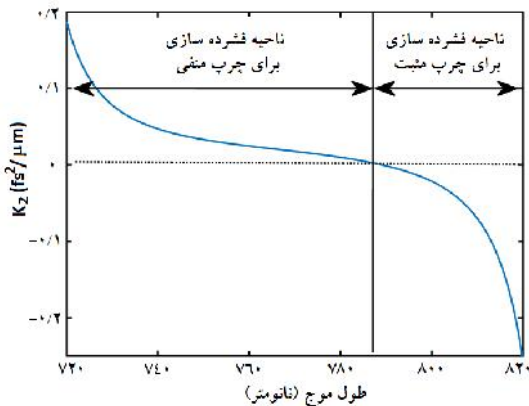
که $\ell_j = k_{jx} d_j$ تغییر فاز القا شده بر موج در حین انتشار در لایه j ام و θ_j زاویه پرتو در هر لایه می باشد.

متشکل از چندین لایه‌ی همگن با ضخامت یکسان می‌باشد که ما در اینجا ۹ لایه با ضخامت ۵۰ نانومتر در نظر گرفتیم. طیف بازتاب و منحنی پاشندگی سرعت گروه برای ساختار ساده مورد مطالعه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. منحنی پاشندگی شکل ۳ بر اساس محاسبه‌ی فاز تپ خروجی و مشتق دوم آن نسبت به فرکانس رسم شده است. مطابق شکل ۲، طول موج مرکزی تپ مورد مطالعه (۸۰۰ نانومتر) در نزدیکی لبه‌ی گاف‌نواری قرار گرفته است جایی که در آن پاشندگی ساختار قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل ۲: طیف عبور و بازتاب بلور فوتونی یک-بعدی ساده بر حسب طول موج

تحت تابش عمودی و تعداد جفت لایه‌ی $N=15$.



شکل ۳: منحنی پاشندگی سرعت گروه بر حسب طول موج. نواحی فشرده‌سازی برای چرپ‌های مثبت و منفی نشان داده شده است.

لذا همان‌طور که از شکل ۳ نیز پیداست، انتظار داریم چنین تپ نوری در اثر عبور از ساختار مورد نظر پاشندگی سرعت گروه منفی را تجربه کرده و در نتیجه فشرده گردد. در این مقاله، تپ نوری با آهنگ چرپ اولیه‌ی $\dot{\tau} = -3/\dot{\tau}$ با پهنای زمانی ۱۰۰ فمتوثانیه مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود میزان فشرده‌شدگی این تپ در عبور از ساختارهای ذکر شده

$$n = \begin{cases} \frac{en_{\min} - n_{\max} - \frac{n_{\min} - n_{\max}}{-1+e} e^{\tau x/L}, & 0 < z < \frac{L}{2} \\ \frac{en_{\min} - n_{\max} - \frac{e^{\tau}(n_{\min} - n_{\max})}{-1+e} e^{-\tau x/L}, & \frac{L}{2} < z < L \end{cases} \quad (۴)$$

که n_{\min} و n_{\max} بترتیب ضرایب لایه‌های اول و وسط لایه‌ی تدریجی می‌باشند. ضریب مختلط عبور کل ساختار، با استفاده از عناصر ماتریس انتقال به صورت زیر معرفی می‌شود [۱۲]:

$$t(\vec{S}) = 1/M_{11} \quad (۵)$$

با استفاده از رابطه فوق، می‌توان فاز موج عبوری، ϕ_t را به راحتی به دست آورد. فرض می‌کنیم که تپ لیزری فرودی (با طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر) دارای پروفایل شدت گوسی بوده و به خاطر پاشندگی مثبت ماده، دارای چرپ اولیه مثبت می‌باشد. در انتشار موج در محیط تناوبی خطی همواره می‌توان تپ لیزری را بصورت جمع مولفه‌های فوریه‌ای آن بشکل زیر نوشت:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \int d\vec{k} \int d\vec{S} \vec{E}(k, \vec{S}, z) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \vec{S}t)} \quad (۶)$$

که $\vec{r}(x, y)$ برداری دوبعدی در صفحه ورودی ساختار می‌باشد. وقتی چنین تپی در داخل بلور فوتونی در راستای Z منتشر می‌شود پهنای زمانی آن در چارچوب پاشندگی مرتبه‌ی ۲ مطابق رابطه زیر تغییر خواهد کرد [۱۳]:

$$\ddagger_p(z) = \ddagger \cdot \sqrt{(1 - \tau \cdot k_y z)^2 + (k_y z / \ddagger)^2} \quad (۷)$$

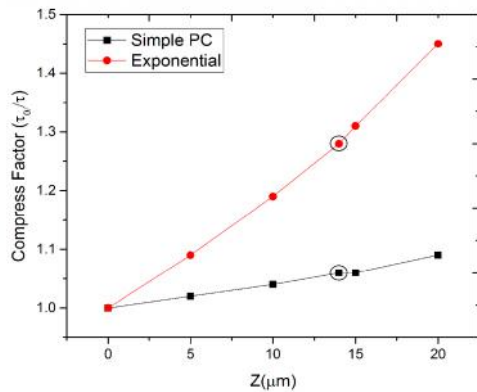
که در آن، $k_y = \frac{\partial^2 k}{\partial S_y^2}$ پاشندگی سرعت گروه، τ آهنگ چرپ اولیه تپ و \ddagger پهنای زمانی آن می‌باشد.

نتایج و بحث

در این تحقیق، رفتار فشرده‌سازی دو نوع ساختار تناوبی یک-بعدی در ناحیه طیفی مادون قرمز نزدیک با استفاده از نرم افزار متلب بطور عددی مورد ارزیابی و شبیه‌سازی قرار گرفت. هر دو ساختار شامل N جفت لایه‌ی متناوب از مواد دی‌الکتریک تیتانیا و سیلیکا به ترتیب به عنوان مواد با ضرایب شکست بالا (A) و پایین (B) بوده و دارای شکل کلی $(AB)^N$ و $(A^*B)^N$ می‌باشند که A^* نمایانگر لایه‌ی با ضریب تدریجی و N تعداد سلول‌های واحد است. پارامترهای ساختار به شکل زیر در نظر گرفته شد: $d_A = d_{A^*} = 450 \text{ nm}$, $d_B = 400 \text{ nm}$, $N = 15$

$$F = \frac{\ddagger}{\ddagger}, \quad (۸)$$

که \ddagger و به ترتیب نشان دهنده‌ی پهنای اولیه و پهنای تپ در داخل محیط می‌باشند. در شکل ۵، نمودار فاکتور فشردگی بر حسب فاصله برای هر دو ساختار نشان داده شده است.



شکل ۵: فاکتور فشردگی برای بلور فوتونی ساده و تدریجی با پروفایل نمایی. داده‌های داخل دایره مربوط به پهنای تپ در خروجی ساختارها می‌باشند.

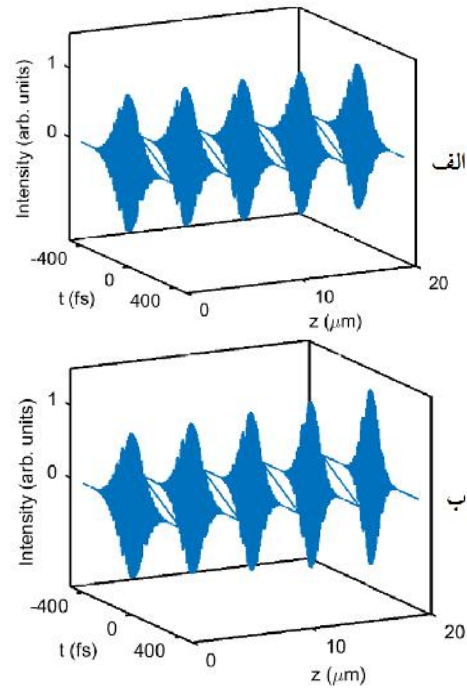
نتیجه‌گیری

رفتار فشرده‌سازی بلورهای فوتونی یک‌بعدی با و بدون لایه‌ی تدریجی برای تپ‌های ۱۰۰ فمتوثانیه‌ای با طول‌موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر در ناحیه طیفی مادون قرمز نزدیک شبیه‌سازی و مورد مقایسه قرار گرفت. برای ضریب شکست لایه‌ی تدریجی، پروفایل نمایی به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که استفاده از لایه‌ی تدریجی در ساختار بلور فوتونی، کارایی فشرده‌سازی را به‌طور موثری بهبود می‌بخشد. فاکتور فشردگی تا ۲۲٪ برای تپ‌های با چرپ اولیه $\ddagger = -۳$ با ساختار تدریجی دارای پروفایل نمایی به دست آمد.

مرجع‌ها

- [] S. H. Shim and M. T. Zanni; *Phys. Chem. Chem. Phys.* **11**, (2009) 748.
- [] Y. Silberberg; *Annu. Rev. Phys. Chem.* **60**, (2009) 277.
- [] R. L. Fork, O. E. Martinez and J. P. Gordon; *Opt. Lett.* **9**, (1984) 150.
- [] D. Strickland and G. Mourou; *Opt. Comm.*, **56**, (1985) 219.
- [] F. Krausz, et al.; *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, (1992) 2097.
- [] A. Belardini, et al.; *Appl. Phys. Lett.* **89**, (2006a) 031111.
- [] Yablonoitch E.; *J. Opt. Soc. Am. B* **10**, (1993) 283.
- [] A. Yariv, P. Yeh; *J. Opt. Soc. Am.* **67**, (1977) 438.
- [] J.B. Pendry; *Adv. Phys.* **43**, (1994) 461.
- [] Noemaun, et al.; *J. Vac. Sci. Tech. A*, **29**, (2011) 051302.
- [] N. B. Pleshchinskii and D. N. Tumakov; Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS'12) (2012).
- [] C.C. Katsidis, D.I. Siapas; *App. Opt.*, **41**, (2002) 3978.
- [] A. Akhmanov, V.A. Vysloukh; *Am. Inst. Phys.*, New York (1992).

متفاوت می‌باشند. بر طبق شکل ۴ الف ملاحظه می‌کنیم که بلور فوتونی ساده تأثیر چندانی بر پهنای زمانی تپ نمی‌گذارد در حالی- که در ساختار تدریجی (شکل ۴ ب) تپ در حین انتشار فشرده می‌شود.



شکل ۴: فشرده‌شدگی تپ نوری با $\ddagger = -۳$ و $\ddagger = ۱۰۰$ fs در عبور از یک بلور فوتونی (الف) ساده و (ب) تدریجی نمایی تحت تابش عمودی. مطابق شکل ۴، در حالت بلور فوتونی ساده، تپ اولیه با پهنای ۱۰۰ فمتوثانیه تا مقدار ۹۳ فمتوثانیه در فاصله ۱۵ میکرون داخل محیط فشرده می‌شود. برای پروفایل نمایی (شکل ۴ ب)، تپ اولیه در فاصله ۱۵ میکرون تا پهنای ۸۴ فمتوثانیه فشرده شده است. از آنجایی‌که ضخامت کل ساختارها ۱۴ میکرون در نظر گرفته شده است لذا باید پارامترهای تپ و ساختار به گونه‌ای انتخاب گردند که کمترین پهنای تپ در این فاصله (خروجی ساختار) حاصل شود. نتایج نشان داد که برای آهنگ چرپ $\ddagger = -۳$ ، پهنای خروجی تپ برای ساختارهای ساده و نمایی به ترتیب عبارت است از ۹۴ و ۷۸ فمتوثانیه. جهت مقایسه کارایی فشرده‌سازی دو ساختار، پهنای تپ در فواصل مختلف داخل محیط و نیز در نقطه خروجی ساختار را در نظر گرفته و فاکتور فشردگی را برای هر کدام مطابق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم: