بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

طراحی یک خط تأخیری نوری در ناحیه مادون قرمز نزدیک مبتنی بر بلورهای فوتونی موجدار

رامین شیری[۱]، تایماز فتح الهی خلخالی[۱]، حسین شاهرخ آبادی[۱]، علیرضا بنانج، بهروز رضایی[۲]

[۱]پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

[۲] پژوهشکده فیزیک کابردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده - در این تحقیق، یک خط تأخیر نوری مدرن بر پایه بلورهای فوتونی موجدار در ناحیه طیفی مادون‌قرمز نزدیک معرفی و مشخصه‌یابی شده است. دو نوع بلور فوتونی با سلولهای واحد مثلثی و سینوسی تحت بررسی و مقایسه قرار گرفته است. بر اساس نتایج پژوهش انجام گرفته یک بلور فوتونی موجدار با سلولهای سینوسی-شکل قادر است بطور موثری تپهای نوری در محدوده مادون‌قرمز نزدیک با طول‌موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر را کُند نماید. همچنین عبوردهی متوسط ساختار سینوسی در ناحیه طیفی مورد نظر بیشتر از ساختار مثلثی بدست آمد. برای انجام محاسبات عددی از روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) استفاده شد.

کلید واژه- بلور فوتونی موجدار، خط تأخیری نوری، مادون‌قرمز نزدیک، تپ نوری

Designing a near-infrared optical delay line based on the corrugated photonic crystals

Ramin Shirir[1], T. Fathollahi Khalkhali [1], Hossein Shahrokhabadi[1], Alireza Bananej, Behrooz Rezaei [2]
[1]Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran
[2]Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this study, a modern optical delay line based on the corrugated photonic crystals was introduced and characterized at Near-infrared region. Two types of photonic crystals with triangular and sinusoidal unit cells were investigated and compared. It is shown that a corrugated photonic crystal with sinusoidal cells can effectively slow down the optical pulses with central wavelength of 800 nm at the near-infrared region. Also, it is found that the average transmission of the sinusoidal structure at desired spectral region is larger than the triangular one. The finite-difference time-domain method was used to perform the numerical calculations.

Keywords: Corrugated photonic crystal, optical delay line, near infrared, optical pulse

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

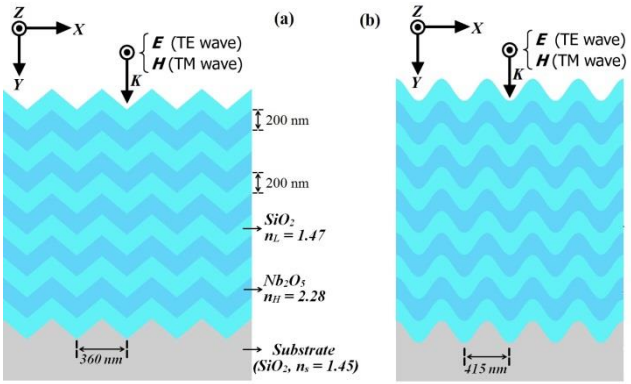
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه

در دهه‌های أخیر، بلورهای فوتونی یک-بعدی کاربردهای گسترده خود را در انواع ادوات الکترونیک نوری از جمله لیزرها، دیودهای نورگسیل، فیبرها و موجبرها نشان داده-اند [۱-۳]. بلورهای فوتونی می‌توانند برای جبران آثار پاشندگی و ایجاد تأخیر گروهی در تپهای نوری مورد استفاده قرار گیرند [۴-۵] و لذا این بلورها نامزدهای مناسبی برای کنترل پاشندگی و رفتار فازی تپهای نوری در لیزرهای فوق‌سریع می‌باشند. بلورهای فوتونی موجدار نوعی از این بلورهای فوتونی یک-بعدی هستند که با اعمال تغییراتی تبدیل به بلورهای فوتونی دو-بعدی شده-اند بطوری که در آن لایه‌های تشکیل دهنده بلور دارای الگوی موجی-شکل هستند. برای ساخت این نوع بلورها از روش *اتوکلونینگ*[1] استفاده می‌شود [۶-۷]. ساختار اصلی یک بلور فوتونی موجدار مبتنی بر لایه‌های موجی‌شکل یا شیاردار می‌باشد که این لایه‌ها با روش *کندوپاش*[2] بر روی یک زیرلایه با سطح شیاردار ایجاد می‌شوند. شکل شیاری (یا موجی بودن) لایه‌ها منشأ خواص نوری منحصربفردی است که با لایه‌های متداول (مشابه آنچه در بلورهای فوتونی یک-بعدی وجود دارد) قابل دستیابی نمی‌باشند. با توجه به اینکه در این نوع ساختارها تناوب لایه‌ها در دو بعد اتفاق می‌افتد لذا در دسته بلورهای فوتونی دو-بعدی قرار می‌گیرند. در سالهای أخیر، محققین زیادی رفتار و ویژگیهای بلورهای فوتونی موجدار با لایه‌های دارای شکل سلول مثلثی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۸-۱۰]. در این تحقیق، قابلیت بلورهای فوتونی موجدار با دو نوع سلول واحد مثلثی و سینوسی در ایجاد تأخیر گروهی بر روی تپهای لیزری فوق‌کوتاه در ناحیه طول‌موجی مادون قرمز نزدیک به منظور ایجاد خطوط تأخیری نوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. مطابق نتایج تحقیق، متوسط عبوردهی و همچنین تأخیر گروهی ایجاد شده توسط ساختار موجدار سینوسی بیشتر از ساختار مثلثی می‌باشد.

ساختار و محاسبات

ساختار یک بلور فوتونی موجدار متداول با سلولهای مثلثی و همچنین ساختار بلور فوتونی پیشنهادی با سلول سینوسی ساده بصورت طرحواره در شکل (۱) نشان داده شده است. در هر دو ساختار، تناوب بلور در راستاهای افقی و عمودی اعمال شده است. پنتوکسید نیوبیوم (Nb_2O_5) و سیلیکا (SiO_2) با ضرایب شکست بترتیب n_H=2.28 و n_L=1.47 بعنوان مواد با ضرایب شکست بالا و پایین در نظر گرفته شده‌اند. پاشندگی و اتلاف نوری این مواد در ناحیه طیفی مورد نظر (۷۰۰-۱۱۰۰ *nm*) قابل چشمپوشی می‌باشند [۱۱].



شکل ۱: نمای طرحواره بلورهای فوتونی موجدار (الف) ساختار مثلثی (ب) ساختار سینوسی

ثابت شبکه افقی در ساختارهای مثلثی و سینوسی بترتیب برابر با ۳۶۰ و ۴۱۵ نانومتر انتخاب شده است. همچنین، شیب سلولهای ساختار مثلثی بصورت $\tan^{-1}(0.9)$ می‌باشد. ثابت شبکه افقی ساختار سینوسی بزرگتر از مثلثی در نظر گرفته شده است تا طول‌موج آغازین[3] هر دو ساختار در یک نقطه یکسان قرار بگیرند. ضخامت فیزیکی لایه‌های با ضریب شکست بالا و پایین در هر دو ساختار ۲۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است که معادل نصف ثابت شبکه

[1] Auto-cloning
[2] Sputtering
[3] Cut-on wavelength

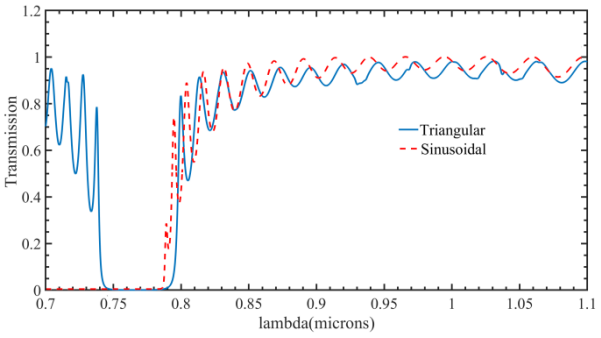
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

عمودی ساختارها می‌باشد. تعداد کل سلولهای هر دو ساختار در راستای انتشار برابر با ۲۰ واحد می باشد بنابراین طول خط تأخیری طراحی شده برابر با ۸ میکرون است. پارامترهای ساختار با استفاده از روش *بهینه‌سازی ازدحام ذرات*[1] بگونه‌ای انتخاب شده است که دو هدف بیشترین مقدار تأخیر گروهی و بیشترین ضریب عبور برای موج نوری مورد نظر بدست آید. در تمام محاسبات این تحقیق، موج نوری فرودی در حالت قطبش TE فرض شده است. برای انجام محاسبات عددی از روش *تفاضل محدود حوزه زمان*[2] (FDTD) و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Lumerical استفاده شده است. برای حذف بازتابهای ایجاد شده در مرزهای ناحیه محاسبه در راستای انتشار باریکه فرودی (محور y)، از *لایه‌های کاملاً سازگار*[3] بعنوان شرایط مرزی استفاده شده است [۱۲].

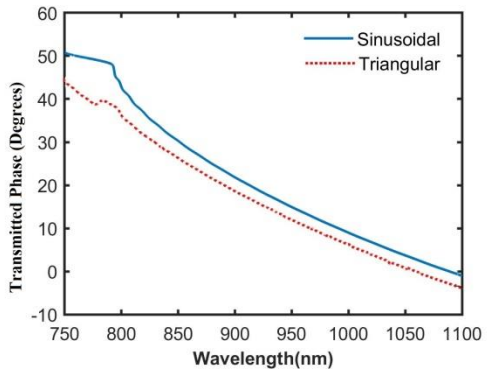
نتایج و بحث

طیف عبور هر دو ساختار مثلثی و سینوسی در محدوده طول‌موجی ۱۱۰۰ -۷۰۰ nm در شکل ۲ نشان داده شده است. طول‌موج مرکزی تپهای نوری که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند ۸۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است که متناظر با طول‌موج مرکزی خروجی لیزر تپ-کوتاه تیتانیوم سافایر می‌باشد. همانطور که شکل ۲ نشان می-دهد یک مزیت بارز ساختار سینوسی نسبت به ساختار مثلثی متوسط بالاتر عبوردهی آن در باند عبور ساختار می‌باشد به طوری که مقدار آن برای ساختار سینوسی ٪۸۰ و برای ساختار مثلثی ٪۵۳ می‌باشد. لذا با توجه به میزان عبور دهی قابل ملاحظه ساختار سینوسی می‌توان از آن به عنوان خط تاخیری در باند عبور استفاده کرد. این موضوع بخصوص در کاربرد ساختارهای فوق در زمینه فیلترهای نوری مادون‌قرمز نزدیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.



شکل ۲: طیف عبور ساختار موجدار با سلولهای مثلثی و سینوسی بر حسب طول‌موج نور فرودی

برای مقایسه رفتار فازی دو ساختار، لازم است ابتدا تغییرات فاز موج عبوری از دو محیط را بر حسب طول‌موج رسم نماییم و در ادامه تأخیر گروهی ایجاد شده بر روی تپ نوری را محاسبه و رسم نماییم. منحنی تغییرات فاز تپ نوری عبوری از ساختارها در شکل ۳ رسم شده است.



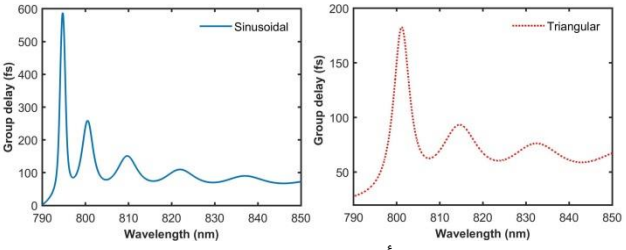
شکل ۳: تغییرات فاز تپ نوری عبوری از ساختار موجدار با سلولهای مثلثی و سینوسی بر حسب طول‌موج

مطابق شکل ۳، نحوه تغییرات فاز موج در خارج از باند ممنوعه برای هر دو ساختار دارای الگوی یکسانی بوده و بطور پیوسته با افزایش طول‌موج رفتار کاهشی نشان می-دهد. مشتق تغییرات فاز نسبت به فرکانس بیانگر تأخیر گروهی می‌باشد. لازم بذکر است مقدار عددی تأخیر گروهی برای یک تپ نوری در طول‌موج مرکزی آن تپ محاسبه می‌گردد. هرچه تأخیر گروهی ایجاد شده از طرف محیط بیشتر باشد موج نوری کندتر شده و نسبت به انتشار در خلا تأخیر بیشتری را تجربه خواهد کرد. تأخیر

[1] Particle swarm optimization
[2] Finite Difference Time Domain (FDTD)
[3] Perfectly matched layers (PML)

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

گروهی ساختارهای مورد بحث در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: منحنی تغییرات تأخیر گروهی ساختارهای موجدار با سلولهای سینوسی (منحنی آبی) و مثلثی (منحنی قرمز)

همان‌طور که از شکل ۴ پیداست میزان تأخیر گروهی ساختار سینوسی در طول‌موج مرکزی تپ مورد نظر (۸۰۰ نانومتر) بیشتر از ساختار مثلثی می‌باشد. همچنین در منحنی ساختار سینوسی یک قله دیگر متناظر با طول‌موج نزدیک به ۷۹۵ نانومتر ظاهر شده است که دارای بیشترین مقدار تأخیر گروهی می‌باشد. لذا ساختار سینوسی در مقایسه با ساختار مثلثی، علاوه بر دارا بودن متوسط عبوردهی بیشتر در کل طیف تپ نوری و همچنین تأخیر گروهی بزرگتر در طول‌موج مرکزی تپ، قادر است برای یک تپ نوری دیگر نیز با طول‌موج مرکزی متفاوت تأخیر گروهی چشمگیری را ایجاد نماید.

نتیجه‌گیری

بطور خلاصه، در این مقاله یک خط تأخیری نوری مدرن مبتنی بر بلورهای فوتونی موجدار معرفی و مشخصه‌یابی شده است. ساختار پیشنهادی با سلول واحد در دو نوع مثلثی و سینوسی ارائه گردید و رفتار تأخیر گروهی آن برای تپهای نوری فرودی در محدوده مادون‌قرمز نزدیک (۷۵۰-۱۱۰۰ *nm*) با طول‌موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج این تحقیق، ساختار با سلولهای سینوسی نه تنها دارای متوسط عبوردهی بالاتری در کل ناحیه طیفی مورد نظر می‌باشد بلکه تأخیر گروهی بزرگتری را برای تپ نوری فرودی ایجاد می‌نماید. این ساختارها می‌توانند بعنوان فیلترهای مادون‌قرمز و کند-کننده‌های نوری جهت استفاده در ادوات نوری و الکترونیک نوری بکار گرفته شوند.

مرجع‌ها

[1] J.K. Zhang, Z.S. Chen, Y. Liu, H. Wang, Z.Q. Lin, and J.M. Shi, “One dimensional photonic crystal based multilayer film with low IR and visible signatures”, Optical Materials, Vol. 1, No. 91, pp. 261-267, 2019.
[2] R. Shiri, A. Bananej, and E. Safari, “Compression of ultra-short light pulses using the graded refractive index one-dimensional photonic crystals”, Optics Communications, Vol. 375, pp. 23-28, 2016.
[3] O. Habli, Y. Bouazzi, and M. Kanzari, “Gas Sensing Using One-Dimensional Photonic Crystal Nanoresonators”, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 92, pp. 251-263, 2019.
[4] A. Belardini, A. Bosco, G. Leahu, M. Centini, E. Fazio, C. Sibilia, M. Bertolotti, S. Zhukovsky, and S.V. Gaponenko, “Femtosecond pulses chirping compensation by using one-dimensional compact multiple-defect photonic crystals”, Appl. Phys. Lett., Vol. 89, No. 3, pp. 031111, 2006.
[5] A.V. Andreev, A.V. Balakin, D. Boucher, P. Masselin, I.A. Ozheredov, and A.P. Shkurinov, “Femtosecond Optical Pulse Compression in a One-Dimensional Thin Photonic Crystal. JETP Letters”, JETP Lett., Vol. 71, No. 9, pp. 539, 2000.
[6] F. Li, L. Xiao, J. Zhao, Y. Sun, T. Ma, L. Cao, J. Wang, H. Yi, X Shang, and M. Huang, “ Investigation on W-Band 100W Three-section Ridge-Loaded Folded Waveguide TWT”, In IEEE 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), pp. 1-2, 2019.
[7] T. Sato, T. Araki, Y. Sasaki, T. Tsuru, T. Tadokoro, and S. Kawakami, “Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements” Applied optics, Vol. 46, pp. 4963-4967, 2007.
[8] S. Nagasawa, T. Onuki, Y. Ohtera, and H. Kuwano, 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, IEEE, pp. 858-861, 2006.
[9] H. Ohkubo, Y. Ohtera, S. Kawakami, and T. Chiba, “avelength shift of+ 36 nm observed with Ta2O5-SiO2 multichannel wavelength filters consisting of three-dimensional photonic crystals” , IEEE Photonic Tech. Lett., Vol. 16, No. 5, pp. 1322-1324, 2004.
[10] N. Hashimoto, Y. Homma, T. Sato, T. Aoyama, T. Chiba, H. Uetsuka, and S. Kawakami, “A compact and highly accurate DOP monitor using photonic crystal polarizer array”, 31st European Conference on Optical Communication ECOC IET, Vol. 2, pp. 177-178, 2005.
[11] C.Z. Tan, “Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 223, No. 1-2, pp. 158-163, 1998.
[12] E. Salete, J.J. Benito, F. Ureña, L. Gavete, M. Ureña, and A. García, “Stability of perfectly matched layer regions in generalized finite difference method for wave problems” Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 312, pp. 231-239, 2017.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

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