بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی بلور فوتونی یک‌بعدی کلکوجنایدی با کاربردهای فیلترکنندگی و موجبری در گستره مادون قرمز نزدیک

حجت اله حاجیان[۱] و یوسف هاتفی[۲]

۱- گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز
۲- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

چکیده - در این کار، بلور فوتونی یک‌بعدی کلکوجنایدی متشکل از لایه‌های متناوب شیشهٔ کلکوجنایدِ $As_{33}Se_{67}$ و پلیمر PMMA به‌گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت فیلتر کنندگی نور با طول موج 1064 nm را به ازای هر دو نوع قطبش و همچنین تمامی زوایای تابشی نور فرودی دارا می‌باشد. همچنین، با ایجاد لایهٔ نقصی از جنس شیشهٔ کلکوجنایدِ As_2S_3 با ضخامت مناسب، علاوه بر قابلیت فیلتر کنندگی، می‌توان از خواص موجبری این ساختار در گسترهٔ 900 nm تا 1250 nm در ناحیهٔ مادون قرمز نزدیک، به ازای تمام زوایای نور فرودی و هر دو نوع قطبش نیز استفاده کرد.

کلید واژه- شیشه کلکوجناید، بلور فوتونی، فیلتر 1064 nm، موجبر مادون قرمز

Designing a One-dimensional Chalcogenide Photonic Crystal for Near-Infrared Filtering and Waveguide Applications

Hodjat Hajian[1], Yousef Hatefi[2]

1- Department of Solid State Physics, Faculty of Physics, University of Tabriz
2- Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Hossein University

Abstract- In this work, a one-dimensional chalcogenide photonic crystal (1D CPC) composed of stack of alternating layers of chalcogenide $As_{33}Se_{67}$ glass and PMMA polymer is designed. It is shown that, this structure is capable of filtering 1064 nm wavelength for both TE and TM polarizations and also all angles of incidence. Moreover, by creating an chalcogenide As_2S_3 defect layer with appropriate width, besides having the 1064 nm filtering characteristic, the 1D CPC could also be capable of supporting guiding modes in 900-1250 nm of the near-infrared region for all angles of incidence and polarizations.

Keywords: Chalcogenide glass, Photonic crystal, 1064 nm filter, Near-Infrared waveguide.

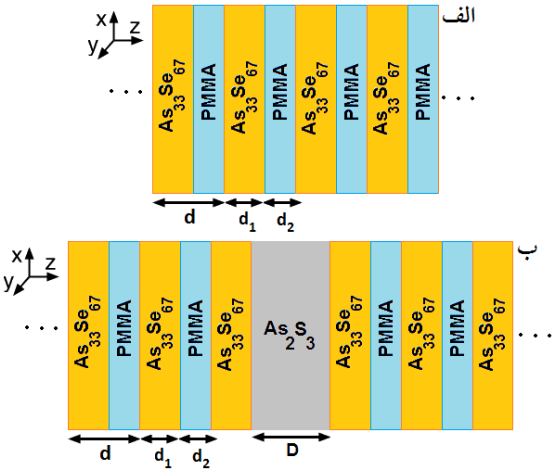
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]

۱- مقدمه

شیشه‌های کلکوجناید که ساخته شده از عناصر کلکوجن هستند، کاربردهای فراوانی را در طراحی ادوات اپتوالکترونیکی در گستره مادون قرمز به خود اختصاص داده‌اند [۱]. بلورهای فوتونی کلکوجنایدی که دسته‌ای از بلورهای فوتونی [۲] یعنی ساختارهائی مصنوعی با تغییرات متناوب در ضریب شکستشان هستند، یکی از این ادوات پرکاربرد ساخته شده از شیشه های کلکوجناید می‌باشند [۳-٤]. در کارهای قبلی [٥-٦] روش ساخت این نوع بلورهای فوتونی و قابلیت فیلتر کنندگی آنها گزارش شده است. علاوه بر این، تا به حال مطالعات گسترده‌ای نیز در مورد خواص موجبری بلورهای فوتونی یک‌بعدی با ایجاد یک لایهٔ نقص در آنها انجام شده است [۷و۲]. در این گزارش که تکمیل کنندهٔ گزارش قبلی [٦] نیز می‌باشد، با در نظر گرفتن توانائی ساخت آنها، به طراحی بلور فوتونی یک‌بعدی کلکوجنایدی پرداخته شده که اولا قابلیت فیلتر کنندگی نور با طول موج 1064 nm را به ازای تمامی زوایای تابشی نور فرودی و به ازای هر دو قطبش TE و TM دارا است (لازم به ذکر است که این قابلیت انعکاس کامل نور توسط بلور فوتونی یک بعدی خاصیت Omni-Directional Reflection یا ODR نامیده می شود). ثانیا، با حفظ این خاصیت فیلتر کنندگی، دارای خاصیت موجبری در گسترهٔ 900 nm تا 1250 nm در ناحیهٔ مادون قرمز نزدیک نیز می‌باشد.

۲- روش‌های محاسباتی

طبق شکل ۱، بلور فوتونی یک‌بعدی کلکوجنایدی مورد بررسی در این گزارش، با در نظر گرفتن توانائی ساخت آن، متشکل از لایه های متناوب شیشهٔ کلکوجناید $As_{33}Se_{67}$ و ماده پلیمری PMMA می‌باشد. برای بدست آوردن نواحی مجاز و ممنوعهٔ فرکانسی (طول موجی) در بلور فوتونی مد نظر با اعمال شرایط مرزی بین لایه‌های تناوب اول بلور فوتونی و همچنین اعمال قضیه بلوخ به رابطهٔ پاشندگی معروف بلور فوتونی یک‌بعدی به ازای دو قطبش TE و TM می‌رسیم [۸]:



شکل ۱. الف: طرح شماتیک بلور فوتونی کلکوجناید یک‌بعدی. d، d_1 و d_2 نیز به ترتیب دورهٔ تناوب بلور فوتونی و ضخامت لایهٔ اول و دوم آن می‌باشند. ب: بلور فوتونی با یک لایهٔ نقص متقارن که جنس آن از As_2S_3 و ضخامتش D می‌باشد.

$$\cos(K_B d)=\cosh(k_1 d_1)\cosh(k_2 d_2)+\frac{1}{2}\left(\frac{F_1}{F_2}+\frac{F_2}{F_1}\right)\times\sinh(k_1 d_1)\sinh(k_2 d_2), \quad (۱)$$

به‌طوریکه K_B بردار موج بلوخ، $F_i\ (i=1,2)$ برای قطبش TE و TM به ترتیب k_i/μ_i و $-\varepsilon_i/k_i$ بوده، $k_i=\omega/c\sqrt{\sin^2\theta-\varepsilon_i\mu_i}$ و θ زاویهٔ تابشی نور فرودی می‌باشد. همچنین در حالتیکه بلور فوتونی یک‌بعدی شامل یک لایهٔ نقص به ضخامت D می‌باشد، روابط پاشندگی مدهای نقص آن، به ازای دو نوع چینش متقارن و نامتقارن لایه‌ها، به ترتیب به صورت زیر به دست می‌آید (لازم به ذکر است که مدهای نقص، در گاف ساختار تشکیل شده و بنابراین در بلور جایگزیده هستند)[۹]

$$\coth(k_D D/2)=\begin{cases}\dfrac{1}{\Gamma_1^{TE,TM}} & (E_y^{TE}\ or\ H_y^{TM}\ odd) \\ \Gamma_1^{TE,TM} & (E_y^{TE}\ or\ H_y^{TM}\ even)\end{cases} \quad (۲)$$

و

$$\tanh(k_D D)=\frac{\Gamma_1^{TE,TM}+\Gamma_2^{TE,TM}}{1+\Gamma_1^{TE,TM}\Gamma_2^{TE,TM}} \quad (۳)$$

به‌طوریکه $\Gamma_i^{TE}=\dfrac{k_D\gamma_i^{TE}}{\mu_D F_i}$، $\Gamma_i^{TM}=\dfrac{-k_D F_i\gamma_i^{TM}}{\varepsilon_D}$ و

$$\gamma_1^{TE,TM}=\frac{\alpha_1^{TE,TM}e^{iK_B d}\sinh(k_2 d_2)+\sinh(k_1 d_1)}{e^{iK_B d}\cosh(k_2 d_2)-\cosh(k_1 d_1)}. \quad (۴)$$

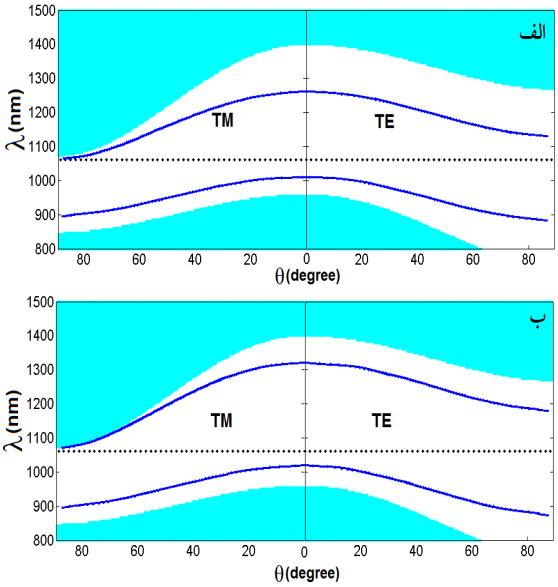
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]

همچنین $\alpha_1^{TE} = \frac{F_1}{F_2}$، $\alpha_1^{TM} = \frac{F_2}{F_1}$،

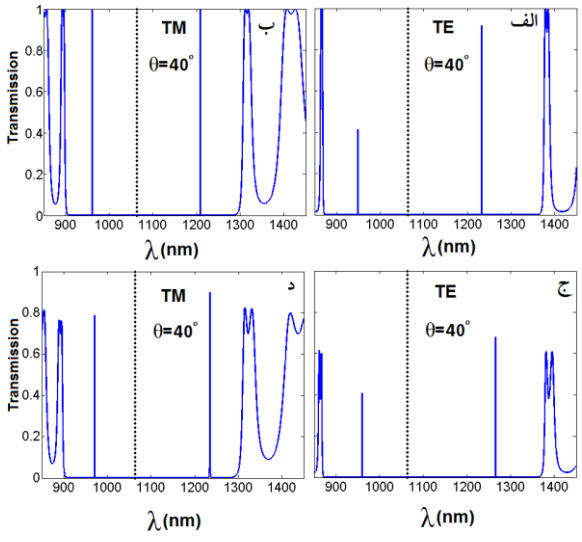
$k_D = \omega/c\sqrt{\sin^2\theta - \varepsilon_D\mu_D}$ می‌باشد و e^{iK_Bd} را می‌توان به کمک رابطهٔ (۲) محاسبه کرد. $\gamma_2^{TE,TM}$ نیز با تعویض اندیس‌های ۱ با ۲ در رابطهٔ (۴) به دست می‌آید. همچنین با اعمال شرط $\left|e^{iK_Bd}\right| < 1$، جواب‌های غیر واقعی را نیز باید در محاسبات حذف کرد [۱۰].

۳- نتایج و بحث

در این قسمت به ارائهٔ نتایج حاصل شده از حل عددی معادلات (۱) تا (۴) می‌پردازیم. هدف از انجام این محاسبات، طراحی بلور فوتونی یک‌بعدی کلکوجنایدی است که علاوه بر داشتن قابلیت فیلترکنندگی نور با طول موج 1064 nm، دارای خاصیت موجبری در گسترهٔ 900 nm تا 1250 nm نیز باشد. از اینرو ضریب شکست شیشهٔ کلکوجناید $As_{33}Se_{67}$ و مادهٔ پلیمری PMMA در گستره طول موجی مدنظر، به ترتیب 2.71 و 1.49 و ضخامت آنها به ترتیب 100 nm و 200 nm انتخاب شده است. شکل ۲ (الف و ب) نشان دهندهٔ ساختار نواری مصور بلور فوتونی یک‌بعدی مد نظر در این گزارش می‌باشد. همچنین، مدهای نقص قابل تشکیل در این بلور به ازای دو چینش متقارن (شکل ۲-الف) و نامتقارن (شکل ۲-ب) لایه‌ها نیز در این شکل‌ها نشان داده شده اند. مشاهده می‌شود که طول موج 1064 nm (خط‌چین در شکل ۲ الف و ب) به‌ازای تمامی زوایای تابشی نور فرودی و به ازای هر دو نوع قطبش TE و TM در گاف طول موجی ساختار قرار گرفته است. علاوه‌براین، به ازای هر دو نوع قطبش و تمام زوایای تابشی نور فرودی نیز مدهای نقص به‌گونه‌ای در ساختار تشکیل می‌شوند که طول موج هیچیک از آنها برابر با 1064 nm نیست. همچنین، در تائید نتایج شکل ۲، عبور بلور فوتونی در حضور لایهٔ نقص متقارن (شکل‌های ۳ الف و ب) یا نامتقارن (شکل‌های ۳ ج و د) به ازای یک زاویهٔ تابشی دلخواه ($\theta = 40^\circ$) نیز نشان داده شده است. توجه شود که مدهای نقص در شکل ۳، تک طول موج‌های با عبور غیر صفر هستند. این مدها در گاف‌های ساختار، یعنی نواحی طول موجی با عبور صفر، تشکیل شده و در ساختار جایگزیده بوده و از اینرو خاصیت موجبری دارند. مثل شکل ۲، در شکل ۳ نیز خط‌چین نمایندهٔ طول موج 1064 nm می‌باشد.



شکل ۲. در هردو شکل‌های الف و ب، نواحی هاشور خورده و سفید رنگ، به‌ترتیب، نشان دهندهٔ نواحی مجاز و ممنوعهٔ طول موجی به‌ازای دو قطبش TE و TM بوده و محور افقی نشان‌دهندهٔ زاویهٔ تابشی نور فرودی و خط‌چین نشان‌دهندهٔ طول موج 1064 nm می‌باشد. همچنین، منحنی‌هائی که در ناحیه‌های سفید رنگ شکل الف (ب) نشان داده شده‌اند، مدهای نقص قابل تشکیل در بلور فوتونی با ساختار متقارن (نامتقارن) هستند. در ساختار متقارن (نامتقارن)، لایهٔ نقص از جنس As_2S_3 بوده و ضخامت آن 600 nm (500 nm) انتخاب شده است.



شکل ۳. الف و ب (ج و د) عبور در بلور فوتونی یک‌بعدی شامل یک لایهٔ نقص As_2S_3، با ضخامت 600 nm (500 nm) در حالتیکه ساختار بلور متقارن (نامتقارن) است را به ازای $\theta = 40^\circ$ نشان می‌دهند.

تعداد تناوب بلور در محاسبات مربوط به شکل ۳، 20

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]

انتخاب شده و بنابراین ضخامت بلور طراحی شده در حالت نامتقارن (متقارن)، 6.5 µm (6.6 µm) می‌باشد. ملاحظه می‌شود که همخوانی کاملی بین ناحیهٔ گاف و مدهای نقص در شکل ۲ با گاف و مدهای نقص در شکل ۳ به ازای $\theta = 40^\circ$ وجود دارد.

بنابراین، از شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که بلور فوتونی کلکوجنایدی طراحی شده در این گزارش، علاوه بر داشتن خاصیت فیلتر کنندگی نور 1064 nm، دارای خاصیت موجبری در گسترهٔ 900 nm تا 1250 nm نیز می‌باشد. در حالتیکه ضخامت لایهٔ نقص کمتر از مقادیر ذکر شده انتخاب شود، باز هم امکان تشکیل مدهای موجبری در ساختار وجود دارد. اما اولا در این ضخامت‌ها امکان تشکیل مدهای مذکور در طول 1064 nm نیز وجود خواهد داشت که سبب کاهش بازدهی فیلتر خواهد شد. ثانیا به جای تشکیل دو دسته مد جفت شده، امکان ایجاد یک دسته منحنی پاشندگی برای مدهای نقص در گاف ساختار را خواهیم داشت.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به محاسبات انجام شده ملاحظه گردید که بلور فوتونی یک‌بعدی متشکل از لایه‌های متناوب شیشهٔ کلکوجنایید $As_{33}Se_{67}$ (با ضخامت 100 nm) و ماده پلیمری PMMA (با ضخامت 200 nm) توانائی فیلتر کنندگی کامل نور با طول موج 1064 nm را دارا می‌باشد. همچنین با ایجاد لایهٔ نقصی از جنس شیشهٔ کلکوجنایید As_2S_3 با ضخامت 500 nm (در ساختار نامتقارن) یا 600 nm (در ساختار متقارن)، علاوه بر حفظ خاصیت فیلتر کنندگی در طول موج 1064 nm، می‌توان از خاصیت موجبری ساختار در گسترهٔ 900 nm تا 1250 nm نیز استفاده کرد. نتایج حاصل شده در این گزارش علاوه بر ساخت عینک‌های محافظ چشم در برابر تابش لیزر 1064 nm، در طراحی ادوات مخابراتی تک طول موج، در گسترهٔ مادون قرمز نزدیک، نیز مفید می‌باشند.

مراجع

[1] Hilton, A. R., *Chalcogenide Glasses for Infrared Optics*, Second Edition., Mc-Grow Hill, 2010.

[2] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., and Meade, R. D., *Photonic Crystals: Molding the flow of light*, Second Edition, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.

[3] Freeman, D., Grillet, C., Lee, M. W., Smith, C. L. C., Ruan, Y., Rode, A., Krolikowska, M., Tomljenovic-Hanic, S., Sterke, C. M., Steel, M. J., Luther-Davies, B., Madden, S., Moss, D. J., Lee, Y., and Eggleton, B. J.,*Chalcogenide glass photonic crystals*, **Photonics and Nanostruc. – Fundumentals and Appls.** 6 (2008) 3-11.

[4] Kohoutek, T., Orava, J., Prikryl, J., Wanger, T., Trumar, M., *All-chalcogenide middle infrared dielectric reflector and filter*, **J. Non-crystal. Solids** 357 (2011) 157-160.

[۵] هاتفی، یوسف، "*مقابله با لیزرهای کور کننده به کمک فن‌آوری فوتونیک کریستال*"، سومین همایش سراسری پدافند جنگ‌های نوین، ۹ و ۱۰ بهمن ماه ۱۳۸۴، دانشگاه امام حسین (ع).

[۶] حاجیان، حجت اله، هاتفی، یوسف، "*طرحی فیلترهای نوری 1064 nm با استفاده از بلورهای فوتونی کالکوجنایدی*"، سومین همایش سراسری کاربردهای دفاعی علوم نانو، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۶ و ۷ آذر ۱۳۹۲.

[7] I, J. S., Park, Y., and Jeon, H., *Optimal design for one-dimensional photonic crystal waveguide*, **J. Lightwave Tech.** 22 (2004) 509.

[8] Yeh, P., *Optical waves in Layered Media*, Wily, 2005.

[9] Hajian, H., Soltani-Vala, A., Kalafi, M., *Optimizing terahertz surface plasmons of a monolayer graphene and a graphene parallel plate waveguide using one-dimensional photonic crystal*, **J. Appl. Phys.** 114 (2013), 033102.

[10] Steeslicka, M., Kucharczyk, R. ,Akjouj, A., Djafari-Rouhani, B., Dobrzynski, L., and Davison, S. G., *Localised electronic states in semiconductor superlattices*, **Surf. Sci. Rep.** 47 (2002), 93.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-21]