

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

حجت اله حاجيان و يوسف هاتفي

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 یک بعدی کلکوجنایدی متشـکل از لایـههـای متنـاوب شیشـهٔ کلکوجنایـد As₃₃Se₆₇ و پلیمـر PMMA بهگونهای طراحی شده است که قابلیت فیلتر کنندگی نور با طول موج nm 1064 را به ازای هـر دو نـوع قطـبش و همچنـین تمامی زوایای تابشی نور فرودی دارا می باشد. همچنین، با ایجاد لایهٔ نقصی از جنس شیشهٔ کلکوجناید As₂S₃ با ضخامت مناسب، عـلاوه بر قابلیت فیلتر کنندگی، می توان از خواص موجبری این ساختار در گسترهٔ nm 900 تا 1250 در ناحیهٔ مادون قرمز نزدیک، به ازای تمام زوایای نور فرودی و هر دو نوع قطبش نیز استفاده کرد.

كليد واژه- شيشه كلكوجنايد، بلور فوتونى، فيلتر nm 1064، موجبر مادون قرمز

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

Hodjat Hajian¹, Yousef Hatefi²

- 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.

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 می باشند [٤-٣]. در کارهای قبلی [٦-٥] 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 یک بعدی با ایجاد یک لایهٔ نقص در آنها انجام شده است [۷ ۲]. در این گزارش که تکمیل کنندهٔ گزارش قبلی [۲] نیز میباشد، با در نظر گرفتن توانائی ساخت آنها، به طراحى بلور فوتونى يكبعدى كلكوجنايدى پرداخته شده که اولا قابلیت فیلتر کنندگی نور با طول موج nm 1064 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 خاصيت Omni-Directional Reflection يا ODR ناميده می شود). ثانیا، با حفظ این خاصیت فیلتر کنندگی، دارای خاصیت موجبری در گسترهٔ nm 900 تا 1250 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 As₃₃Se₆₇ 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 یک بعدی. b، 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_2 و ضخامتش D میباشد.

$$\cos(K_{B}d) = \cosh(k_{1}d_{1})\cosh(k_{2}d_{2}) + \frac{1}{2}(\frac{F_{1}}{F_{2}} + \frac{F_{2}}{F_{1}}) + \sinh(k_{2}d_{2}), \qquad (1)$$

به طوریکه K_B بردار موج بلوخ، (i = 1, 2) برای قطبش TE و TM به ترتیب μ_i μ_i و k_i / k_i و $-\varepsilon_i / k_i$ و قطبش TM بوده، $\overline{\mu_i}$ و K_i / μ_i و $M_i = \omega/c \sqrt{\sin^2 \theta - \varepsilon_i \mu_i}$ 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 لایه ها، به ترتیب به صورت زیر به دست می آید (لازم به ذکر است که مدهای نقص، در گاف ساختار

تشکیل شده و بنابراین در بلور جایگزیده هستند)[۹]

$$\operatorname{coth}(k_{D}D/2) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma_{1}^{TETM}} \left(E_{y}^{TETM} \operatorname{or} H_{y}^{TM} \operatorname{odd}\right) & (\Upsilon)\\ \Gamma_{1}^{TETM} \left(E_{y}^{TE} \operatorname{or} H_{y}^{TM} \operatorname{even}\right) \end{cases}$$

$$\tanh(k_D D) = \frac{\prod_{j=1}^{T} \prod_{j=1}^{T} \prod_{$$

به طوریکه
$$\Gamma_i^{TM} = \frac{-k_D F_i \gamma_i^{TM}}{\varepsilon_D}$$
, $\Gamma_i^{TE} = \frac{k_D \gamma_i^{TE}}{\mu_D F_i}$ و

$$\gamma_{1}^{TE\,TM} = \frac{\alpha_{1}^{TE\,TM} e^{iK_{B}d} \sinh(k_{2}d_{2}) + \sinh(k_{1}d_{1})}{e^{iK_{B}d} \cosh(k_{2}d_{2}) - \cosh(k_{1}d_{1})}.$$
 (f)

 $\alpha_1^{TM} = \frac{F_2}{F_1}$, $\alpha_1^{TE} = \frac{F_1}{F_2}$ همچنین $\alpha_1^{TE} = \frac{F_1}{F_2}$ همچنین $k_D = \omega/c\sqrt{\sin^2\theta - \varepsilon_D\mu_D}$ 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 |s|, 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) می پردازیم. هدف از انجام این محاسبات، طراحى بلور فوتونى يكبعدى كلكوجنايدى است که علاوه بر داشتن قابلیت فیلترکنندگی نور با طول موج nm 1064، دارای خاصیت موجبری در گسترهٔ 900 nm تا 1250 nm نيز باشد. از اينرو ضريب شكست شيشهٔ کلکوجناید As₃₃Se₆₇ و مادهٔ پلیمری PMMA در گستره طول موجى مدنظر، به ترتيب 2.71 و 1.49 و ضخامت آنها به ترتيب nm 100 و 200 انتخاب شده است. شكل 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 (شكل ۲-الف) و نامتقارن (شكل ۲-ب) لايهها نيز در این شکلها نشان داده شده اند. مشاهده می شود که طول موج nm 1064 (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 به گونهای در ساختار تشکیل می شوند 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 خطچين نمايندهٔ طول موج 1064 nm ميباشد.



شكل ۲. در هردو شكلهاى الف و ب، نواحى هاشور خورده و سفيد رنگ، بهترتيب، نشان دهندۀ نواحى مجاز و ممنوعۀ طول موجى بهازاى دو قطبش TE و TM بوده و محور افقى نشاندهندۀ زاويۀ تابشى نور فرودى و خطچين نشاندهندۀ طول موج nm مىباشد. همچنين، منحنىهائى كه در ناحيههاى سفيد رنگ شكل الف (ب) نشان داده شدهاند، مدهاى نقص قابل تشكيل در بلور فوتونى با ساختار متقارن (نامتقارن) هستند. در ساختار متقارن (نامتقارن)، لايۀ نقص از جنس As_2S_3 بوده و ضخامت آن mo 600 nm (500 ا



شکل ۳. الف و ب (ج و د) عبور در بلور فوتونی یکبعدی شامل یک لایهٔ نقص As_2S_3 ، با ضخامت 600 nm 600 (con mb) 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

انتخاب شده و بنابراین ضخامت بلور طراحی شده در حالت نامتقارن (متقارن)، μ m (6.6 (μ m) امی میاشد. ملاحظه می شود 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 mr، دارای خاصیت موجبری در گسترهٔ mn 000 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 ضخامتها امکان تشکیل مدهای مذکور در طول 1064 نواهد 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 ملاحظ و گردید که بلور فوتونی یک بعدی متشکل از لایههای متناوب شیشهٔ کلکوجناید As₃₃Se₆₇ (باضخامت nm 100) و ماده پلیمری PMMA (باضخامت nm 200) توانائی فیلتر کنندگی کامل نور با طول موج nm 1064 را دارا می باشد. همچنین با ایجاد لایهٔ نقصی از جنس شیشهٔ کلکوجناید 400 می میشهٔ کلکوجناید موجنین با ایجاد لایهٔ نقصی از جنس شیشهٔ کلکوجناید موجنین با ایجاد لایهٔ نقصی از جنس شیشهٔ کلکوجناید 500 nm (در ساختار متقارن)، علاوه بر حفظ خاصیت فیلتر کنندگی در طول موج nm 1064، می توان از خاصیت موجبری ساختار در گسترهٔ nm 1060 تا nm 1250 نیز موجبری ساختار در گسترهٔ nm 1060 تا nm 1250 نیز ماستفاده کرد. نتایج حاصل شده در این گزارش علاوه بر ماخت عینکهای محافظ چشم در برابر تابش لیزر 1064 مادون قرمز نزدیک، نیز مفید می باشند.

مراجع

- [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.

[۶] حاجیان، حجت اله، هاتفی، یوسف، "طرحی فیلترهای نوری 1064 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 onedimensional 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.

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