



طراحی صافی نوری نوار عبوری در یک بلور فوتونی یک بعدی مبتنی بر نانوتقص بازآرایی پذیر Sb_2S_3

زهرا احسانیان و آرزو رشیدی*

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

*پست الکترونیکی: arezou.rashidi@umz.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷)

چکیده

در این مقاله، پاسخ نوری یک بلور فوتونی یک بعدی متقارن حاوی لایه نقص مرکزی از نانوماده Sb_2S_3 در ناحیه فروسرخ نزدیک، به روش ماتریس انتقال شبیه سازی و تحلیل شده است. اثر گذار فازی لایه نقص از حالت آمورف به بلوری و تغییر زاویه تابش نور فرودی بر ویژگی های تراگسیلندگی ساختار در دو قطبش TE و TM بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که گذار فازی آمورف به بلوری Sb_2S_3 موجب انتقال قرمز قابل توجه در طول موج مد نقص می شود؛ در حالی که افزایش زاویه تابش باعث انتقال آبی گاف نوری فوتونی و مد نقص در هر دو نوع قطبش می گردد. پهنای مد نقص در قطبش TE با افزایش زاویه کاهش یافته و عامل کیفیت بالاتری حاصل می شود؛ ولی در قطبش TM در زوایای نزدیک به زاویه بروستر، مد نقص با لبه گاف نوری ادغام شده و کارایی صافی کاهش می یابد. تحلیل اختلاف تراگسیلندگی بین دو فاز نیز حاکی از حساسیت زاویه ای و قطبشی بالای ساختار است. یافته های این تحقیق، پتانسیل استفاده از Sb_2S_3 در طراحی صافی های زاویه حساس و وسایل فوتونیک بازآرایی پذیر با قابلیت سوئیچ و مدولاسیون طیفی تأیید می کند.

واژه های کلیدی: بلور فوتونی یک بعدی، نانوماده Sb_2S_3 ، گذار فازی آمورف-بلوری، مد نقص، صافی نوری زاویه حساس

۱. مقدمه

می شوند که در آن ها نور قادر به انتشار نیست. این ویژگی، بلورهای فوتونی را به گزینه ای آرمانی برای طراحی و توسعه وسایل نوری پیشرفته نظیر صافی های طیفی، موج برها، حسگرهای نوری و تشدیدگرهای اپتیکی تبدیل کرده است [۲]. در این میان، بلورهای فوتونی یک بعدی، به دلیل سهولت در طراحی و ساخت، هزینه پایین و قابلیت ادغام آسان با سایر

بلورهای فوتونی ساختارهایی با آرایش تناوبی در ضریب شکست هستند که با بهره گیری از تداخل سازنده و مخرب امواج الکترومغناطیسی، امکان مهار و کنترل دقیق انتشار نور را در گستره ای از بسامدها فراهم می کنند [۱]. در این ساختارها، نواحی خاصی از طیف به عنوان گاف نوار فوتونی شناخته

سامانه‌های نوری از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. اگرچه عملکرد بلورهای فوتونی عمدتاً ناشی از تکرار تناوبی و تقارن ساختاری آنها است، اما با ایجاد نقص‌های هدفمند در آرایش تناوبی، می‌توان مدهای جایگزیده‌ای را درون گاف نواری ایجاد کرد. این مدها موجب محبوس شدن نور در ناحیه نقص و تشکیل تشدیدگرهای نوری یا نواحی تراگسیل انتخابی می‌شوند [۳]. از این‌رو، مهندسی نقص در بلورهای فوتونی به عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد نوری و افزایش انعطاف‌پذیری طراحی در سامانه‌های فوتونیک پیشرفته شناخته می‌شود [۴]. در این راستا، استفاده از مواد فعال با ویژگی‌های اپتیکی قابل تنظیم، نظیر مواد مگنتوآپتیکی، گرافن و بلورهای مایع در ایجاد نقص‌های ساختاری، امکان کنترل دقیق مدهای نقص و تنظیم پاسخ طیفی ساختار را فراهم می‌کند [۵-۷].

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد تغییر فاز، به دلیل قابلیت گذار برگشت‌پذیر میان حالت‌های آمورف و بلورین که با تغییرات چشمگیر در ویژگی‌های نوری و الکتریکی همراه است، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۸]. به طوری که برخلاف گرافن و بلورهای مایع، نه تنها از طریق الکتریکی بلکه از طریق نوری نیز تنظیم می‌شوند. همچنین، در مقایسه با سایر مواد، قابلیت پیکربندی مجدد و امکان سازگاری با مواد نیمه‌رسانای معمول، آنها را به ماده‌ای شگفت‌انگیز تبدیل کرده است [۹]. در میان مواد تغییر فاز، آنتیموان تری‌سولفید (Sb_2S_3) به دلیل دارا بودن تباین بالای ضریب شکست بین دو فاز آمورف و بلورین، تلفات نوری پایین در طیف مرئی و فروسرخ نزدیک، و نیز پایداری حرارتی مناسب، گزینه‌ای آرمانی برای دست‌یابی به ابزارهایی مانند سوئیچ‌های میکروحلقوی و هدایت‌کننده‌های باریکه به شمار می‌رود [۱۰، ۱۱]. ضریب شکست این ماده به مقادیر ضریب شکست سیلیکون نزدیک‌تر است که آن را برای استفاده در ابزارهای یکپارچه مبتنی بر سیلیکون مطلوب می‌سازد. همچنین، Sb_2S_3 دارای پهن‌ترین گاف نواری در بین تمام مواد تغییر فاز است که در حال حاضر برای برنامه‌ریزی اجزای فوتونیک مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۲]. اخیراً، تولید رنگ‌های تمام طیفی بازآرایی‌پذیر از طریق تغییر قطبش نور

فرودی و گذار فازی در Sb_2S_3 میسر شده است؛ دستاوردی که راه را برای توسعه کاربردهای نوین در رمزنگاری نوری و فناوری‌های نمایشی هموار می‌سازد [۱۳]. همچنین، متاسطح‌های پلاسمونی مبتنی بر Sb_2S_3 ، امکان مدولاسیون نوری برگشت‌پذیر و غیر فرار را در ناحیه فروسرخ نزدیک فراهم کرده‌اند که چشم‌اندازهای گسترده‌ای برای توسعه صافی‌های بازآرایی‌پذیر و سامانه‌های فوتونیک تطبیقی ارائه می‌دهند [۱۴].

با الهام از این ویژگی‌ها، در این مقاله از ادغام ماده تغییر فاز Sb_2S_3 در یک بلور فوتونی یک بعدی متقارن برای دست‌یابی به قابلیت‌های طیفی قابل کنترل و رفتار زاویه‌ای و قطبشی ویژه بهره می‌گیریم. قابلیت گذار فازی Sb_2S_3 ، که با تغییر ضریب شکست همراه است، امکان کوک‌پذیری دقیق مد نقص و در نتیجه تغییر رفتار تراگسیلندگی ساختار را فراهم می‌کند. در این راستا، پاسخ طیفی ساختار در دو قطبش TE و TM تحت شرایط گذار فاز آمورف-بلورین و تغییر زاویه تابش نور، به کمک روش ماتریس انتقال تحلیل شده و تأثیر این عوامل بر موقعیت و پهنای گاف نواری فوتونی و مد نقص، حساسیت زاویه‌ای و قطبشی بررسی می‌گردد. این مطالعه، علاوه بر واکاوی سازوکارهای فیزیکی جابه‌جایی طیفی، چشم‌اندازهای نوینی برای طراحی صافی‌های نوری زاویه-حساس و وسایل نوری بازآرایی‌پذیر ارائه می‌دهد.

۲. الگو و روش محاسباتی

ساختار مورد مطالعه، یک بلور فوتونی یک بعدی متقارن نقص‌دار با آرایش لایه‌ای $(AB)^5D(BA)^5$ است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. این ساختار شامل ده جفت لایه تناوبی از مواد دی‌الکتریک TiO_2 (لایه A) و SiO_2 (لایه B) است که در مرکز آن لایه‌ای از جنس ماده تغییر فاز Sb_2S_3 (لایه D) به عنوان نقص قرار داده شده است. بنابراین، این ساختار به عنوان یک کاواک اپتیکی عمل کرده و می‌تواند با فراهم‌سازی امکان ایجاد مدهای جایگزیده، نقش اساسی در تغییر ویژگی‌های نوری سامانه ایفا کند. ضرایب شکست مواد TiO_2 و SiO_2

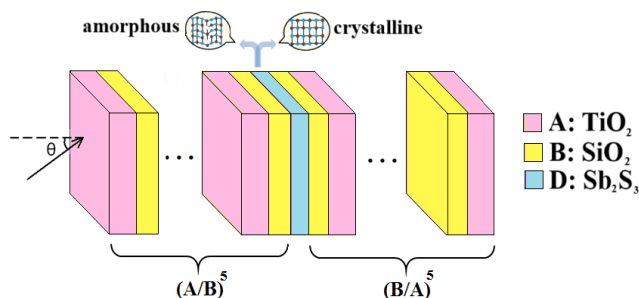
در این جا، ϵ_{inter} ، ϵ_{amor} و ϵ_{cryst} ، به ترتیب گذردهی‌های الکتریکی نسبی حالت‌های میانی، آمورف و بلوری را بیان می‌کند. همچنین، در این معادله به منظور الگوسازی دقیق‌تر تغییرات تدریجی در حالت ماده Sb_2S_3 ، از پارامتری با عنوان کسر پرشدگی که با نماد m نشان داده شده است، استفاده می‌شود. این پارامتر بیانگر درصدی از لایه تغییر فاز است که در وضعیت بلورین قرار دارد. به عبارتی، برای حالت‌های کاملاً آمورف و کاملاً بلورین به ترتیب برابر با صفر و یک و در فازهای میانی (ترکیبی از آمورف و بلوری) $0 < m < 1$ است.

اکنون، با فرض این‌که ساختار پیشنهادی مان در هوا قرار گرفته و نور با زاویه θ بر ساختار فرود می‌آید، به محاسبه تراگسیلندگی نوری ساختار می‌پردازیم. برای این کار از روش ماتریس انتقال استفاده می‌شود که یکی از روش‌های تحلیلی قدرتمند در بررسی ساختارهای چندلایه‌ای محسوب می‌شود [۱۹]. در این روش، با حل معادلات ماکسول در هر لایه و اعمال شرایط پیوستگی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در مرزها، می‌توان طیف عبور و بازتاب ساختار را محاسبه نمود. بدین ترتیب که برای ارتباط دادن مولفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در دو طرف هر لایه ($j=A,B,D$)، ماتریس انتقال تعریف می‌شود:

$$M(d_j) = \begin{pmatrix} \cos(k_{zj} d_j) & \frac{i}{p_j} \sin(k_{zj} d_j) \\ i p_j \sin(k_{zj} d_j) & \cos(k_{zj} d_j) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

که در آن $k_{zj} = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_j - \sin^2 \theta}$ مولفه z عمود بر لایه‌ها در راستای چینش) بردار موج، ω بسامد زاویه‌ای نور و c تندی نور در خلأ هستند. برای موج با قطبش TE، $p_j = k_{zj} / (\omega \mu_0 \mu_j)$ و برای موج با قطبش TM، $p_j = -k_{zj} / (\omega \epsilon_0 \epsilon_j)$ توصیف می‌شوند. ماتریس انتقال کل ساختار (M_{tot}) از حاصل ضرب ماتریس‌های انتقال تک تک لایه‌ها به دست می‌آید:

$$M_{tot} = (M_A M_B)^2 M_D (M_B M_A)^2 \quad (3)$$



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از بلور فوتونی یک بعدی متقارن متشکل از مواد TiO_2 و SiO_2 با لایه نقص مرکزی از ماده تغییر فاز Sb_2S_3 .

در ناحیه طیفی مورد بررسی مان (فروسرخ نزدیک) به ترتیب برابر با $2/28$ و $1/46$ در نظر گرفته شده‌اند [۱۶، ۱۵]. اختلاف قابل توجه بین این ضرایب، عامل اصلی تشکیل گاف نواری فوتونی در ساختار است. ضخامت این لایه‌ها به ترتیب برابر با 170 و 264 نانومتر در نظر گرفته شده‌اند که به ضخامت اپتیکی ربع طول موج با طول موج مرکزی 1550 نانومتر مربوط‌اند. ضخامت لایه نقص برابر با 35 نانومتر فرض شده است که بر اساس بهینه‌سازی‌های انجام شده در محاسبات عددی با هدف دستیابی به تقویت تداخلات نوری در کاواک با بررسی تأثیر تغییر ضخامت Sb_2S_3 در انتقال فاز آمورف به بلورین بر پاسخ طیفی ساختار انتخاب شده است. در مورد لایه نقص Sb_2S_3 ، با توجه به ویژگی منحصربه‌فرد قابلیت تغییر ساختار شبکه‌ای در دمای مناسب در گذار از فاز آمورف به بلوری و بالعکس، ضریب شکست تغییر می‌یابد؛ به طوری که ضریب شکست این ماده در حالت آمورف برابر با $2/7$ و در حالت بلوری برابر با $3/3$ است [۱۷]؛ این مقادیر نشانگر تباین بالای ضریب شکست ($\Delta n = 0/6$) در طی گذار فاز از آمورف به بلوری در این ماده است. برای به دست آوردن ضریب شکست در حالت‌های میانی در طی گذار فاز از الگوی لورنتس مطابق با رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۸]:

$$\frac{\epsilon_{inter}^{-1}}{\epsilon_{inter} + 2} = m \frac{\epsilon_{cryst}^{-1}}{\epsilon_{cryst} + 2} + (1 - m) \frac{\epsilon_{amor}^{-1}}{\epsilon_{amor} + 2} \quad (1)$$

که برای موج با قطبش TE، $p_0 = \cos \theta / (c \mu_0)$ و برای موج با قطبش TM، $p_0 = -\cos \theta / (c \varepsilon_0)$ هستند. در نهایت، با حل این معادله، تراگسیلندگی که بیانگر سهم نسبی توان عبوری از کل ساختار به توان موج تابشی است، به دست می‌آید:

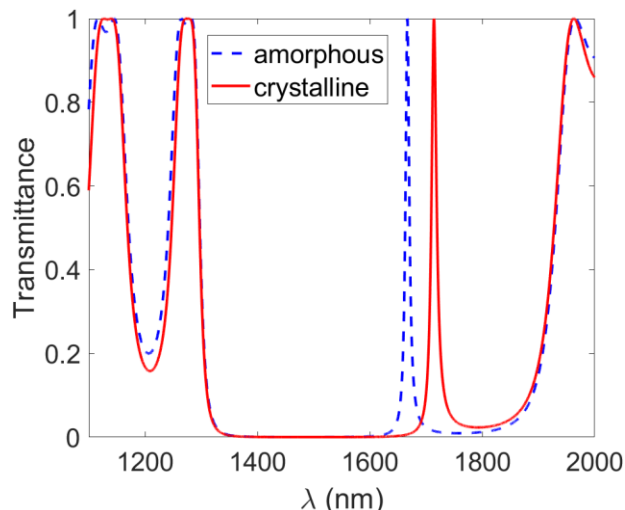
$$T = |t|^2 = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (5)$$

در این جا، t ضریب تراگسیلندگی فرنل، و M_{11} درایه سطر و ستون نخست از ماتریس انتقال کل M_{tot} است.

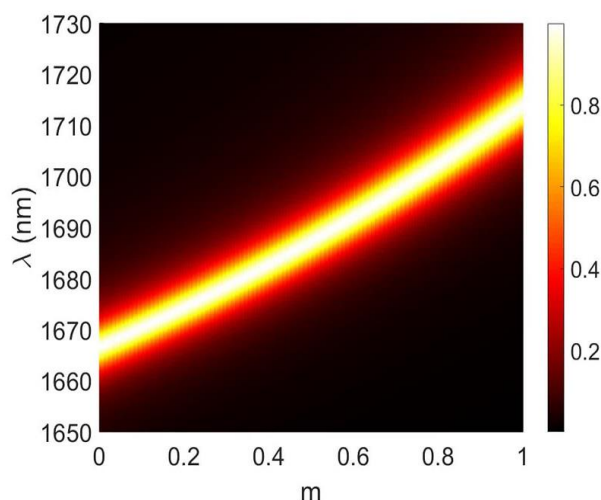
در ادامه، با استفاده از این روش، پاسخ طیفی ساختار برای مقادیر مختلف کسر پرشدگی m بررسی شده و تأثیر تغییر فاز لایه نقص بر موقعیت مدهای کاواک و ویژگی‌های اپتیکی ساختار تحلیل خواهد شد.

۲. بحث و نتایج محاسبات

شکل ۲، طیف تراگسیلندگی ساختار پیشنهادی را در ناحیه طول موج فرورسرخ نزدیک تحت تابش قائم نور، در دو حالت آمورف (خطچین آبی) و بلوری (خط پر) نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درون ناحیه گاف نواری فوتونی در بازه طول موجی ۱۳۳۱ تا ۱۸۶۰ نانومتر، مد نقصی ظاهر شده است که به حالت فازی لایه نقص حساس است؛ به طوری که با تغییر حالت از آمورف به بلوری، این مد به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابه‌جا می‌شود. طول موج قله تراگسیلندگی برای فاز آمورف و بلوری به ترتیب برابر با ۱۶۶۷ و ۱۷۱۴ نانومتر است که نشانگر انتقال قرمز ۴۷ نانومتری در اثر تغییر پیکربندی ساختاری Sb_2S_3 از حالت آمورف به بلوری است. برای بررسی دقیق‌تر نحوه تأثیر حالت ساختاری نانوفیلم Sb_2S_3 طی گذار فازی بر پاسخ نوری سامانه، طیف تراگسیلندگی مربوط به فازهای میانی نیز در شکل ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پیوسته کسر بلوری، قله تراگسیلندگی همچنان مقدار تقریباً واحد دارد، اما طول موج آن انتقال قرمز قابل توجهی را تجربه می‌کند. این پدیده، قابلیت کوک‌پذیری طول موج مد نقص با تغییر درجه بلورین ماده Sb_2S_3 را برای دست‌یابی به صافی‌های نوار عبور فرورسرخ نزدیک نشان می‌دهد.



شکل ۲. تراگسیلندگی (T) ساختار پیشنهادی به صورت تابعی از طول موج برای حالت‌های آمورف (خطچین آبی) و بلورین (خط پر قرمز) ماده تغییر فاز Sb_2S_3 . در این جا نور تحت زاویه قائم بر ساختار می‌تابد.



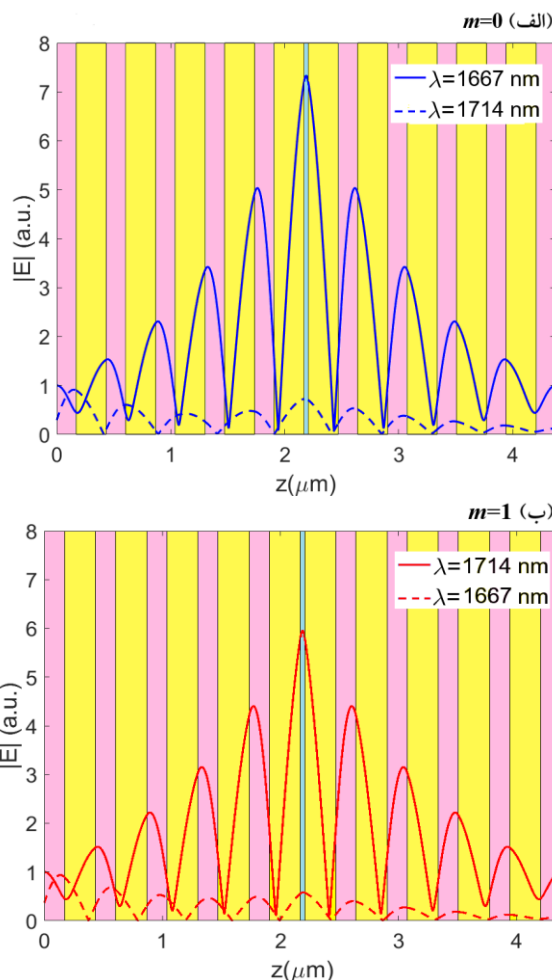
شکل ۳. تراگسیلندگی ساختار در صفحه طول موج و کسر پرشدگی (m) تحت تابش قائم نور.

این ماتریس، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در ابتدا و انتهای بلور فوتونی به هم مرتبط می‌کند. در گام بعدی میدان‌های تابشی (E_i) و بازتابی (E_r) را به میدان عبوری (E_t) از طریق معادله زیر مرتبط می‌کنیم:

$$\begin{pmatrix} E_i + E_r \\ -p_0(E_i - E_r) \end{pmatrix} = M_{tot} \begin{pmatrix} 1 \\ -p_0 \end{pmatrix} E_t, \quad (4)$$

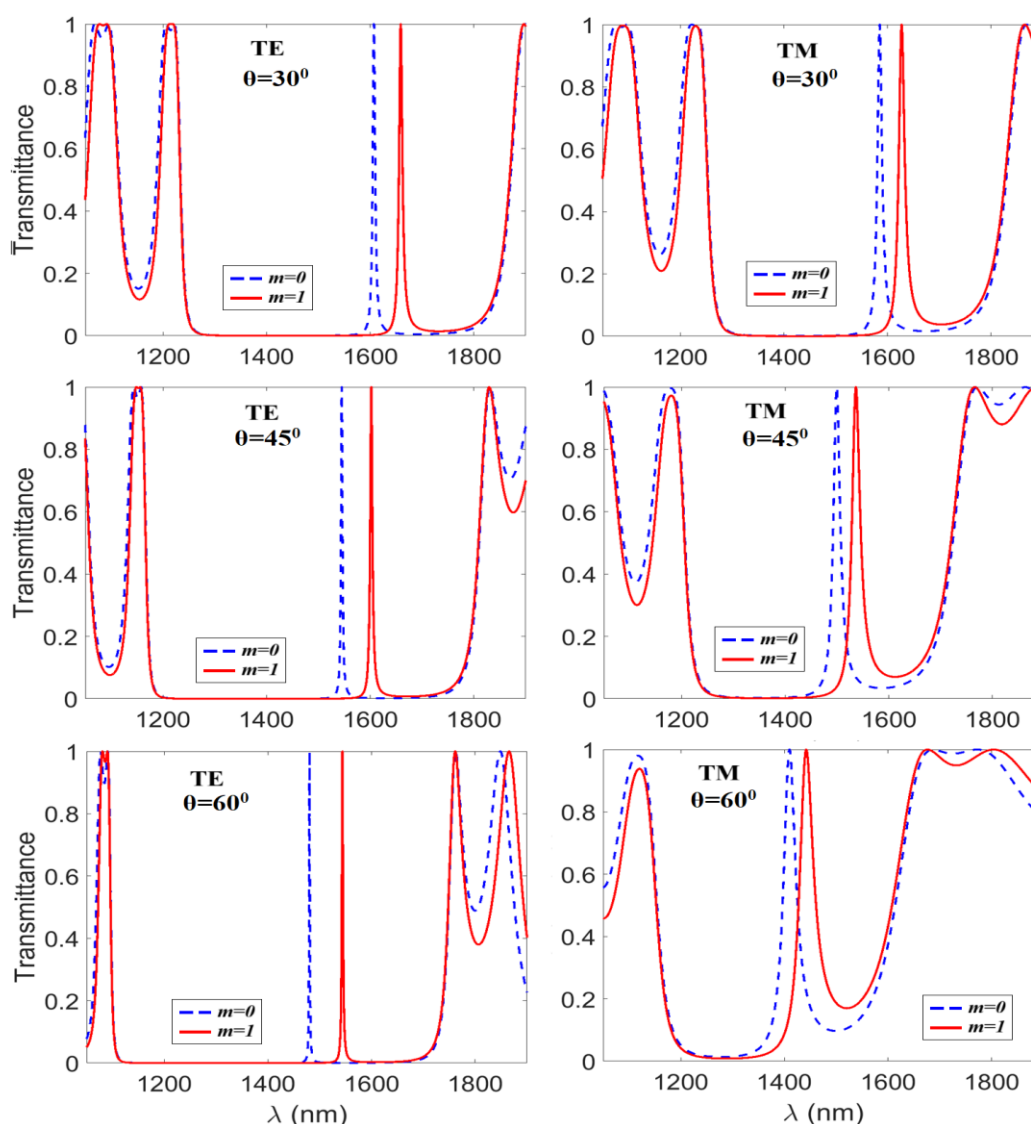
از افزایش درجه بلوری Sb_2S_3 ، مسیر نوری و در نتیجه طول موج تشدید افزایش می‌یابد. برای تحلیل عمیق‌تر تغییر موقعیت طیفی مد نقص با تغییر درجه بلوری، در شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی بهنجار شده را در داخل بلور فوتونی پیشنهادی برای حالت آمورف ($m=0$) و حالت بلوری کامل ($m=1$) نمایش داده‌ایم. توزیع میدان الکتریکی بهنجار شده در این شکل، بر اساس پاسخ معادلات ماکسول و با استفاده از روش ماتریس انتقال (که در بخش ۲ شرح داده شد) محاسبه شده است. در واقع، هر لایه را به برش‌های نازک تقسیم کرده و با اعمال متوالی ماتریس انتقال هر برش، میدان‌ها از مرز اولیه تا نقاط مختلف ساختار انتشار داده می‌شوند. میدان بهنجار شده در هر نقطه از رابطه $E_{norm}(z) = \frac{|E(z)|}{|E_i|}$ به دست می‌آید که $E(z)$ میدان الکتریکی موضعی و E_i دامنه میدان فرودی است. در تمام محاسبات، مقدار E_i برابر با واحد در نظر گرفته شده است.

این مقداردهی به دلیل خطی بودن سامانه، تأثیری در الگوی کیفی توزیع میدان نداشته و صرفاً موجب قابلیت مقایسه کمی می‌گردد. بنابراین، نمودار ارائه شده، ضریب تقویت میدان الکتریکی نسبی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت آمورف (شکل ۴. الف)، توزیع میدان در طول موج ۱۶۶۷ نانومتر در لایه نقص مرکزی به بیشینه مقدار می‌رسد و الگوی متقارنی مشابه موج ایستاده نشان می‌دهد. این توزیع میدان، نمایانگر تشکیل یک مد نقص تشدید قوی است که باعث حبس نور در لایه نقص و تقویت پاسخ نوری در این طول موج (که در شکل ۲ مشاهده شد) می‌گردد. با این حال، با گذار ماده به فاز بلورین ($m=1$)، مطابق با شکل ۴. ب، این مد دیگر شرایط تشدید را ندارد و میدان در ساختار توزیعی یکنواخت‌تر و غیرتشدید نشان می‌دهد. در عوض، مد تشدید به طول موج بلندتر یعنی ۱۷۱۴ نانومتر انتقال یافته است؛ به طوری که در این طول موج با تشکیل میدان جایگزیده در لایه نقص به عنوان مد تشدید فاز بلورین عمل می‌کند. این جابه‌جایی بیانگر انتقال قرمز مد نقص بر اثر افزایش ضریب شکست در نتیجه گذار فاز نانوفیلم Sb_2S_3 است که پیش‌تر در نمودار ۲ مشاهده شد. به علاوه، مشاهده جایگزینی مدهای تشدید نشان می‌دهد که کاواک اپتیکی طراحی شده توانایی مؤثری در



شکل ۴. توزیع میدان الکتریکی در داخل ساختار پیشنهادی در فاز آمورف ($m=0$) و بلورین ($m=1$) در دو طول موج ۱۶۶۷ و ۱۷۱۴ نانومتر. این طول موج‌ها به ترتیب مربوط طول موج‌های تشدید فاز آمورف و بلوری هستند.

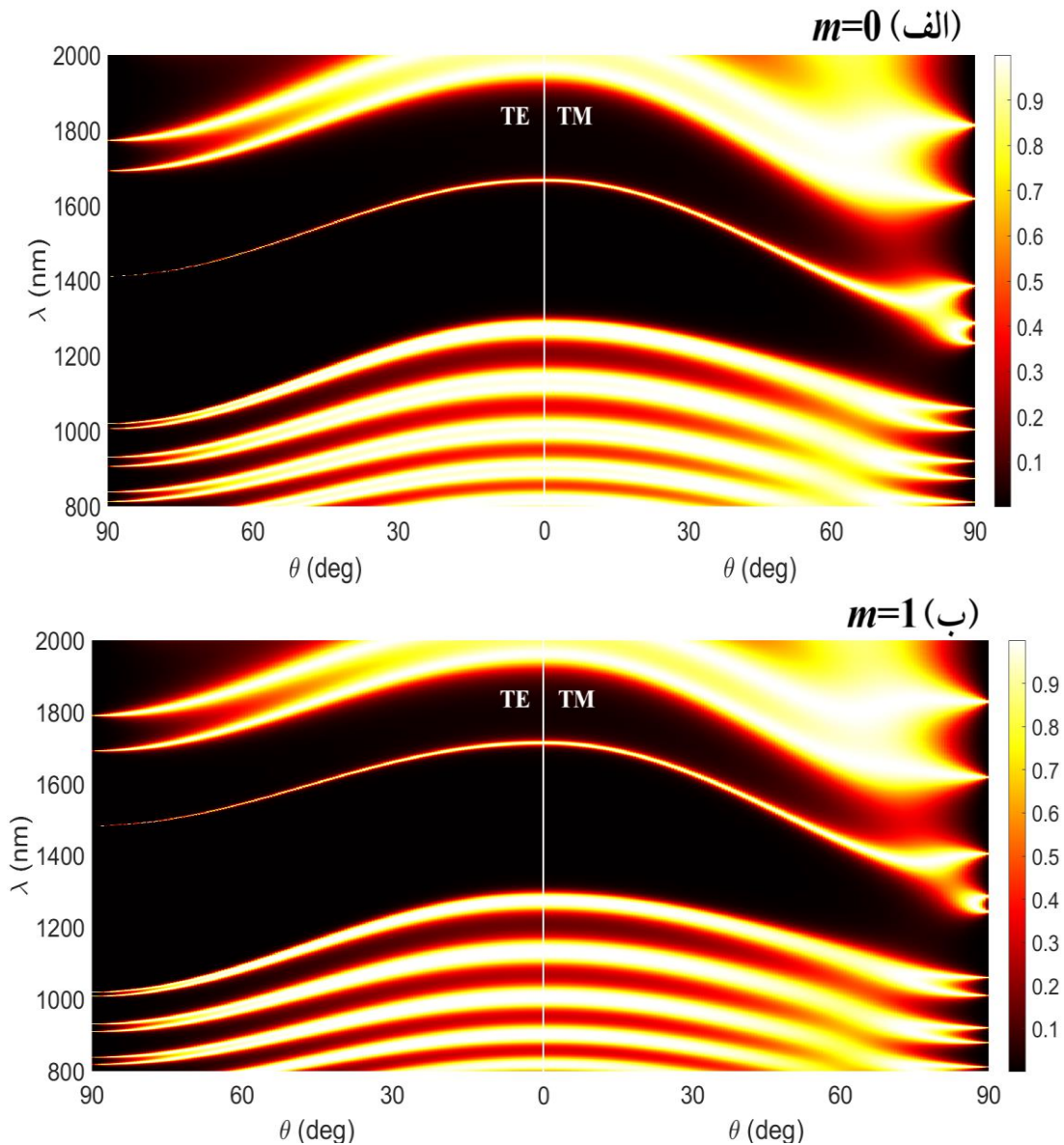
علت فیزیکی چنین تغییرات قابل توجه در انتقال قرمز طول موج مد نقص را می‌توان با استفاده از معادله (۲) که شامل فاز اپتیکی کاواک $\phi = k_z d = \frac{2\pi nd}{\lambda} \cos \theta$ است، توضیح داد. با افزایش m ، ضریب شکست نانوفیلم Sb_2S_3 افزایش می‌یابد. بنابراین برای حفظ شرط پایستگی فاز ϕ در کاواک، طول موج تشدید λ نیز بایستی افزایش یابد. به بیان دیگر، این رفتار را می‌توان از دیدگاه مسیر نوری در کاواک فابری-پرو نیز تشریح کرد: شرط تشدید کاواک را می‌توان با رابطه $\alpha \lambda_p / 2 = L_c$ بیان کرد که در آن α عدد صحیح، λ_p طول موج تشدید و L_c مسیر نوری لایه نقص هستند. با افزایش ضریب شکست ناشی



شکل ۵. وابستگی تراگیسلندگی ساختار به طول موج در دو حالت آمورف ($m=0$) و بلورین ($m=1$) تحت زوایای تابشی 30° ، 45° و 60° برای امواج TE (ستون چپ) و TM (ستون راست).

منجر به انتقال قرمز طول موج مد نقص در هر دو حالت قطبش و برای تمام زوایای تابش می شود. به علاوه، با افزایش زاویه تابش، گاف نواری فوتونی در هر دو نوع قطبش به سمت طول موج های کوتاه تر منتقل می شود. در واقع با افزایش زاویه تابش، مؤلفه عمودی بردار موج ($k_z = k \cos \theta$) کاهش می یابد و از آنجا که مرزهای گاف نواری فوتونی توسط شرط بلوری $\pi = k_z a$ (که a دوره تناوب ساختار است)، تعیین می شوند، کاهش k_z منجر به کاهش طول موج لبه های گاف نواری می شود. همچنین، پهنای گاف نواری فوتونی در مد قطبش TE

محدودسازی نور و ایجاد تشدید انتخابی با تنظیم درجه بلورین لایه نقص دارد. در ادامه، رفتار نوری سامانه در زوایای تابشی مایل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵، طیف تراگیسلندگی ساختار را در دو حالت آمورف (منحنی های خط چین) و بلوری (منحنی های توپر) برای سه زاویه تابشی مختلف (30° ، 45° و 60° درجه) نشان می دهد. ستون سمت چپ نمودار مربوط به قطبش TE و ستون سمت راست مربوط به قطبش TM هستند. همان طور که از نمودارها پیدا است، مشابه با حالت تابش عمودی، گذار فاز لایه نقص از آمورف به بلورین



شکل ۶. تراگسیلندگی در صفحه طول موج و زاویه نور فرودی در دو فاز الف. آمورف و ب. بلوری برای موج قطبیده TE (بخش چپ نمودار) و موج قطبیده TM (بخش راست نمودار).

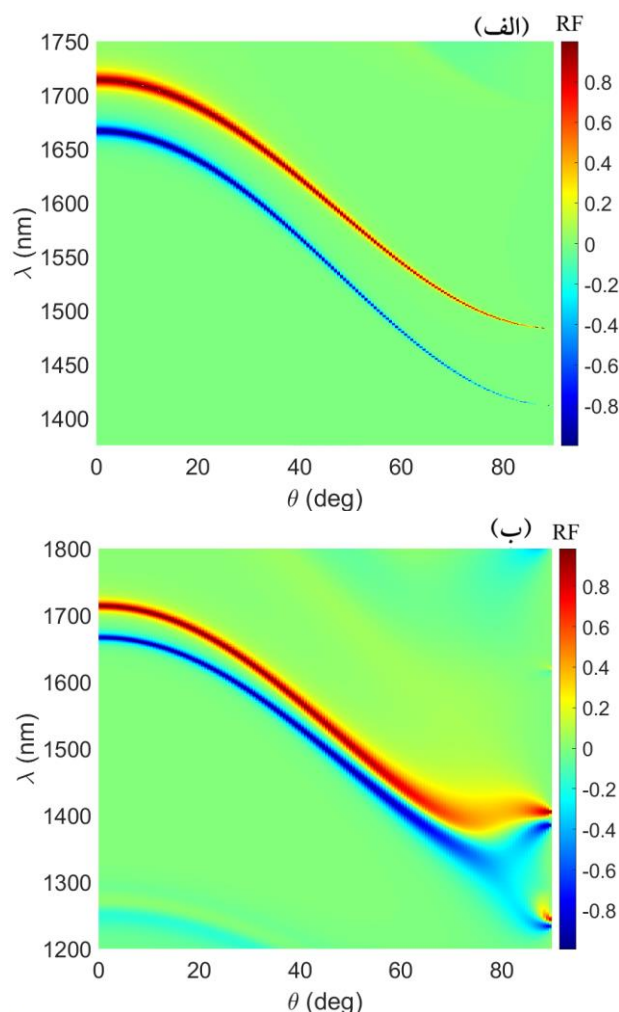
درون آن، نوار باریک و روشن مربوط به مد نقص قابل ردیابی است. این مد نقص نیز با افزایش زاویه، انتقال آبی را تجربه می‌کند که همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ناشی از کاهش مؤلفه عمودی بردار موج و در نتیجه کاهش مسیر نوری مؤثر در کاواک است. در قطبش TE، پهنای مد نقص با افزایش بیشتر زاویه کاهش یافته و بنابراین عامل کیفیت افزایش می‌یابد. در مقابل، در قطبش TM پهنای مد نقص افزایش یافته و با افزایش بیشتر زاویه و نزدیک شدن به زاویه بروستر، این مد به لبه گاف نواری جابه‌جا می‌شود. لذا، منجر به افت کارایی صافی در قطبش TM به ویژه

بزرگتر از مد TM است. با افزایش زاویه تابش، پهنای گاف نواری در قطبش TE افزایش و در قطبش TM کاهش می‌یابد. برای وضوح بیشتر از چگونگی رفتار نوری ساختار در زوایای تابشی مختلف، در شکل ۶ طرح دو بعدی تراگسیلندگی را در صفحه طول موج-زاویه برای دو حالت آمورف (الف) و بلورین (ب) نمایش داده‌ایم. در هر نمودار نیمه چپ مربوط به قطبش TE و نیمه راست مربوط به قطبش TM است. به وضوح نمایان است که با افزایش زاویه تابش، در هر دو فاز آمورف و بلورین، گاف نواری فوتونی به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود و

افزایش تراگسیلندگی بر اثر گذار فاز و مقادیر منفی نشانگر کاهش تراگسیلندگی پس از بلوری شدن لایه نقص است. بیشینه مقادیر مثبت و منفی RF تقریباً برابر با یک است که به ترتیب با خطوط منحنی باریک قرمز و آبی نمایان‌اند و مربوط به مد نقص در فازهای بلورین و آمورف هستند که قبلاً در شکل ۶ مشاهده شدند. این منحنی‌ها برای هر یک از زوایای تابشی در طول موج‌های متفاوتی رخ می‌دهند که با افزایش زاویه، انتقال آبی می‌یابند. فاصله و جدایی بین آن‌ها در موج قطبیده TE بزرگتر از موج قطبیده TM است که نشان دهنده حساسیت بالاتر پاسخ نوری ساختار به درجه بلورین لایه نقص در قطبش TE است. بنابراین، با تنظیم دقیق موقعیت طیفی مد نقص از طریق کنترل فاز ماده Sb_7S_3 در گذار از آمورف به بلوری و با انتخاب قطبش مناسب، می‌توان ساختارهایی با صافی‌های عبوری کوک‌پذیر و با کیفیت بالا طراحی و پیاده‌سازی نمود.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهند که ادغام لایه نقصی از Sb_7S_3 در یک بلور فوتونی یک‌بعدی متقارن، امکان کنترل دقیق پاسخ طیفی از طریق گذار بین فازهای آمورف و بلورین را فراهم می‌سازد. تغییر ضریب شکست در این گذار، موجب جابه‌جایی قابل توجه طول موج مد نقص و تنظیم موقعیت گاف نواری فوتونی می‌شود. علاوه بر این، تغییر زاویه تابش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های طیفی داشته و در قطبش TM به‌ویژه در مجاورت زاویه بروستر، سبب کاهش پایداری و کارایی صافی می‌گردد؛ در حالی که قطبش TE پایداری طیفی و عامل کیفیت بالاتری نشان می‌دهد. تحلیل اختلاف تراگسیلندگی بین دو فاز نیز بیانگر قابلیت بالای ساختار در بازآرایی ویژگی‌های اپتیکی است که امکان کنترل دقیق مشخصات طیفی مد نقص را فراهم می‌کند. این یافته‌ها بر توانایی بالای چنین ساختاری برای پیاده‌سازی صافی‌های نوری زاویه-حساس و وسایل نوری بازآرایی پذیر با قابلیت سوئیچ



شکل ۷. اختلاف تراگسیلندگی بین فازهای آمورف و بلورین در صفحه طول موج و زاویه نور فرودی برای الف. قطبش TE و ب. قطبش TM.

در زوایای بالا می‌شود. بنابراین، ساختار فوتونیک ما نسبت به نوع قطبش بسیار حساس بوده و جهت استفاده در کارکردهای صافی عبوری با کیفیت بالا، قطبش TE گزینه مناسب‌تری است. در نهایت، به منظور مقایسه دقیق‌تر پاسخ نوری ساختار در گذار فاز از آمورف به بلورین ماده نقص، اختلاف تراگسیلندگی بین این دو فاز را که به عنوان پارامتر بازآرایی به صورت $RF = T^{m=1} - T^{m=0}$ تعریف می‌کنیم، به صورت تابعی از طول موج و زاویه تابش محاسبه کرده‌ایم. نتایج برای قطبش‌های TE و TM به ترتیب در شکل‌های ۷. الف و ۷. ب نمایش داده شده‌اند. رنگ‌بندی نمودار بیانگر مقدار پارامتر

تأکید دارد.

مراجع

1. J D Joannopoulos, S G Johnson, J N Winn, and R D Meade, “*Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*”, Princeton University Press, (2008).
2. K J Vahala, *Nature* **424**, (2003) 839.
3. T Wang and Y Niu, *Sci. Rep.* **13** (2023), 21338.
4. S Noda and T Baba (Eds.), “*Roadmap on Photonic Crystals*”, Springer Series in Optical Sciences, Springer, (2003).
5. T V Mikhailova, V N Berzhansky, A N Shaposhnikov, A V Karavainikov, A R Prokopov, Yu M Khachenko, I M Lukienko, O V Miloslavskaya, and M F Kharchenko, *Opt. Mater.* **78** (2018) 521.
6. A Rashidi and A Namdar, *Eur. Phys. J. B.* **91** (2018) 91.
7. R Ozaki, H Miyoshi, M Ozaki, and K Yoshino, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **433** (2005) 247.
8. B Gholipour, J Zhang, K F MacDonald, D W Hewak, and N I Zheludev, *Nat. Photonics* **7** (2013) 931.
9. M Wutting, H Bhaskaran, and T taubner, *Nat. Photonics* **11** (2017) 465.
10. Z Fang, J Zheng, A Saxena, J Whitehead, Y Chen, and A Majumdar, *Adv. Opt. Mat.* **9** (2021) 2002049.
11. P Moitra, Y Wang, X Liang, L Lu, A Poh, T W W Mass, R E Simpson, A I Kuznetsov, and R Paniagua-Dominguez, *Adv. Mat.* **35** (2023) 2205367.
12. T Y Teo, M Krbal, J Mistrik, J Prikryl, L Lu, and R E Simpson, *Opt. Mat. Express* **12** (2022) 606.
13. S Deng, M Cui, J Jiang, C Wang, Z Cheng, H Sun, M Xu, H Tong, Q He, and X Miao, *J. Semicond.* **45** (2024) 072302.
14. Z Han, C Li, T Liu, N Hu, Z Fan, Y Guo, B Liu, H Yang, A Jin, B Quan, S Tian, Y Yang, G Li, X Fan, S Hu, X Huang, and C Gu, *Nano Lett.* **25** (2025) 7435.
15. L Gao, F Lemarchand, and M Lequime, *Opt. Express* **20** (2012) 15734.
16. T Siefke, S Kroker, K Pfeiffer, O Puffky, K Dietrich, D Franta, I Ohlidal, A Szeghalmi, E Kley, and A Tünnermann, *Adv. Opt. Mater.* **4** (2016) 1780.
17. T Wang, H Jia, H Chen, and J Yang, *Opt. Commun* **527** (2023) 128974.
18. DE Aspnes, *Am. J. Phys.* **50** (1982) 704.
19. A Yariv and P Yeh, “*Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation*”, Wiley-Interscience, New York, (1983).