

ORIGINAL ARTICLE

Simulation and Analysis of Optical Density in a One-Dimensional Photonic Crystal Containing Silica and Zirconia Layers on a Polycarbonate Substrate

Hadi Rahimi^{1*}, Ahmad Heshmati²

1 Associate Professor, Department of Physics, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Physics, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Correspondence

Hadi Rahimi

Email: h_rahimi@tabrizu.ac.ir

How to cite

Rahimi, H. Heshmati, A. (2026). Simulation and Analysis of Optical Density in a One-Dimensional Photonic Crystal Containing Silica and Zirconia Layers on a Polycarbonate Substrate, Optoelectronic, 8(3), 25-30.

ABSTRACT

This study investigates the optical density in a one-dimensional photonic crystal structure composed of alternating layers of silica and zirconia deposited on a polycarbonate substrate. The analysis employs the transfer matrix method to evaluate transmission spectra of both transverse electric and transverse magnetic polarizations. Within the 400-1600 nm spectral range, the structure exhibits a photonic bandgap spanning 750-1200 nm. The results show that the edges of this band gap are shifted towards shorter wavelengths in both transverse electric and transverse magnetic polarizations with increasing angle of incidence. Also, we observed distinct polarization-dependent behavior: optical density gradually increases with angle for TE polarization while decreasing for TM polarization. The lower the transmittance corresponds the higher the optical density, and vice versa. These findings can be used in spectroscopic analysis, optical sensing technologies, advanced optical window design, and radiation shielding applications, etc.

KEYWORDS

Optical Density, Photonic Crystal, Silica, Zirconia, Polycarbonate.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

شبیه‌سازی و تحلیل چگالی نوری در بلور فوتونی یک‌بعدی حاوی لایه‌های سیلیکا و زیرکونیا روی زیرلایه پلی کربنات

هادی رحیمی^{۱*}، احمد حشمتی^۲

۱ دانشیار، گروه فیزیک، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.
۲ استادیار، گروه فیزیک، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

چکیده

در این مقاله، به بررسی و شبیه‌سازی چگالی نوری در یک بلور فوتونی یک‌بعدی حاوی لایه‌های سیلیکا و زیرکونیا که روی زیرلایه پلی کربنات نشانده شده‌اند، می‌پردازیم. روش محاسباتی مبتنی بر ماتریس انتقال بوده و برای هر دو قطبش عرضی الکتریکی و مغناطیسی انجام شده است. در ساختار پیشنهادی، در محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ نوار ممنوعه‌ای در ناحیه ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر ایجاد شد. لبه‌های این نوار ممنوعه در هر دو قطبش الکتریکی عرضی و مغناطیسی عرضی، با افزایش زاویه تابش به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شوند. همچنین معلوم شد که در قطبش الکتریکی عرضی، چگالی نوری با افزایش زاویه به تدریج افزایش می‌یابد؛ ولی در قطبش مغناطیسی عرضی کاهش می‌یابد. هر چقدر ضریب انتقال کمتر باشد، مقدار چگالی نوری بیشتر است و برعکس. نتایج حاصل می‌توانند در طیف‌سنجی مواد، حسگرهای نوری، طراحی پنجره‌های اپتیکی، محافظت نوری و غیره به کار برده شوند.

واژه‌های کلیدی

چگالی نوری، بلور فوتونی، سیلیکا، زیرکونیا، پلی کربنات.

نویسنده مسئول:

هادی رحیمی

رایانامه: h_rahimi@tabrizu.ac.ir

استناد به این مقاله:

هادی رحیمی، احمد حشمتی (۱۴۰۵). شبیه‌سازی و تحلیل چگالی نوری در بلور فوتونی یک‌بعدی حاوی لایه‌های سیلیکا و زیرکونیا روی زیرلایه پلی کربنات. فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک، ۳۸(۳)، ۲۵-۳۰

مقدمه

بلورهای فوتونی یک‌بعدی، ساختارهای متناوبی هستند که با چینش دوره‌ای مواد دی‌الکتریک با ضرایب شکست متفاوت ایجاد می‌شوند. این ساختارها به دلیل توانایی منحصر به فرد در کنترل انتشار نور و ایجاد گاف فوتونی، نقش مهمی در فوتونیک و اپتوالکترونیک ایفا می‌کنند. خاصیت کلیدی این بلورها، بازتاب انتخابی طول موج‌های خاصی از نور است که ناشی از تداخل سازنده امواج در ساختارهای تناوبی است [۱،۲]. در سال‌های اخیر، بلورهای فوتونی یک‌بعدی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند؛ چرا که طراحی نسبتاً ساده‌تری داشته و در عین حال امکان کنترل دقیق خواص نوری را فراهم می‌کنند. این ساختارها کاربردهای گسترده‌ای در ساخت آینه‌های براگ، فیلترهای نوری، حسگرها و ادوات لیزر پیدا کرده‌اند. مطالعه خواص نوری این بلورها، به ویژه تحلیل چگالی نوری و توزیع میدان الکترومغناطیسی در آنها، برای بهینه‌سازی عملکرد و طراحی ادوات فوتونی پیشرفته سودمند خواهد بود [۳،۴].

چگالی نوری یکی از پارامترهای مهم در مطالعه رفتار نور در مواد و ساختارهای فوتونی است. این کمیت، که گاهی با جذب نوری مرتبط است، بیانگر میزان تضعیف نور هنگام عبور از یک محیط مادی است. در واقع، چگالی نوری معیاری از ظرفیت یک ماده برای جذب یا پراکندگی نور در طول موج‌های مختلف است و به صورت لگاریتمی نسبت شدت نور ورودی به نور خروجی تعریف می‌شود [۵]. چگالی نوری در بلورهای فوتونی کاربردهای متعددی در فناوری‌های نوین دارد؛ از جمله طراحی حسگرهای نوری بسیار حساس برای شناسایی مواد شیمیایی و زیستی، ساخت آینه‌های براگ با بازتابندگی انتخابی برای کاربردهای لیزری و مخابرات نوری و توسعه فیلترهای نوری هوشمند در تصویربرداری پزشکی و طیف‌سنجی [۶]. این مفهوم همچنین در بهینه‌سازی موجبرهای نوری با تلفات کم، افزایش بازده سلول‌های خورشیدی از طریق بهبود جذب نور، ایجاد حافظه‌های تمام‌نوری و ساخت منابع نور تک‌فام کاربرد اساسی دارد. مهندسی دقیق چگالی نوری امکان کنترل و بهبود عملکرد این ادوات فوتونیک را فراهم می‌سازد و نقش کلیدی در توسعه نسل آینده سیستم‌های نوری ایفا می‌کند [۷،۸].

بلور فوتونی در نظر گرفته شده، حاوی لایه‌های سیلیکا (SiO₂) و زیرکونیا (ZrO₂) بوده که به‌طور متناوب روی زیرلایه پلی‌کربنات لایه نشانی شده‌اند. انتخاب این مواد

مبتنی بر مزایای آنهاست. SiO₂ دارای ضریب شکست پایین و تلفات نوری ناچیز [۹،۱۰]، ZrO₂ دارای ضریب شکست بالا برای ایجاد کنتراست مناسب [۱۱،۱۲] و پلی‌کربنات به عنوان زیرلایه‌ای سبک، انعطاف‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه با شفافیت نوری عالی است. این ترکیب علاوه بر برآورده کردن نیازهای اپتیکی (شفافیت در محدوده مرئی، تلفات پایین)، مزایای مکانیکی مانند مقاومت حرارتی و ضربه‌ای را نیز برآورده می‌کند که آن را برای کاربردهای عملی مانند ادوات فوتونی انعطاف‌پذیر و سیستم‌های لیزری قابل حمل ایده‌آل می‌سازد [۱۳].

در این مقاله، به بررسی و شبیه‌سازی چگالی نوری در یک بلور فوتونی یک‌بعدی متشکل از لایه‌های متناوب SiO₂ و ZrO₂ روی زیرلایه پلی‌کربنات می‌پردازیم. روش محاسباتی مبتنی بر ماتریس انتقال و برای دو قطبش عرضی الکتریکی و مغناطیسی خواهد بود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تاثیر پارامترهایی مانند نوع قطبش، زاویه تابش و طول موج بر چگالی نوری است. نتایج حاصل می‌تواند در طیف‌سنجی مواد، حسگرهای نوری، طراحی پنجره‌های اپتیکی، محافظت نوری و غیره به کار برده شوند.

روش‌ها

همان‌طور که می‌دانیم چگالی جذب نوری^۱ (OD) نشان‌دهنده ضریب اتلاف ایجادشده توسط یک فیلتر نوری است؛ به عبارت دیگر میزان کاهش توان پرتو تابشی را نشان می‌دهد. OD وابسته به میزان عبور است که با معادله زیر بیان می‌شود:

$$OD = \log\left(\frac{1}{T}\right) = \log\left(\frac{I_i}{I_t}\right) \quad (1)$$

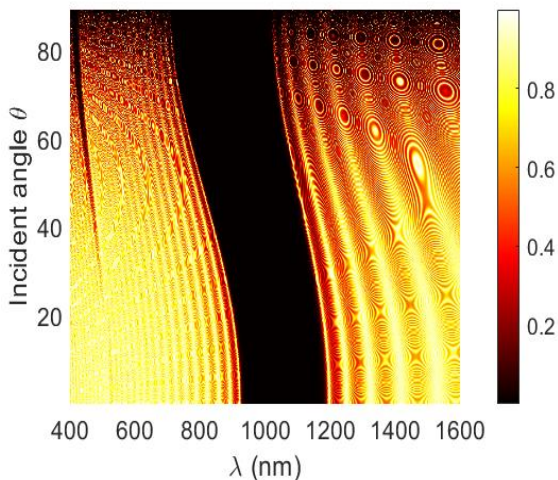
T ضریب انتقال یا عبور، I_i شدت موج تابشی و I_t شدت موج عبوری است. هر چقدر درصد انتقال کمتر باشد، مقدار چگالی نوری بیشتر است. T مقداری بین ۰ و ۱ است. انتخاب یک فیلتر با چگالی جذب نوری بالاتر به انتقال کمتر و جذب بیشتر نور تابشی منجر می‌شود. برای انتقال بیشتر و جذب کمتر، فیلتری با چگالی جذب نوری پایین‌تر مناسب خواهد بود. به عنوان مثال، یک فیلتر با چگالی نوری برابر با ۲، مقدار عبورش ۰/۰۱ است، به این معنی که شدت پرتو ورودی به ۱٪ کاهش می‌یابد [۷،۸].

بلور فوتونی محیطی با خواص اپتیکی متناوب است. بلور



شکل ۱. ساختار بلور فوتونی پیشنهادی حاوی زیرلایه پلی‌کربنات و لایه‌هایی از جنس SiO_2 (A) و ZrO_2 (B) ضرایب شکست و ضخامت لایه‌ها عبارتند از $n_A=1/46$ ، $n_B=2/1$ ، $d_B=120\text{nm}$ ، و $d_A=180\text{nm}$ ضخامت و ضریب شکست زیرلایه پلی‌کربنات به ترتیب ۲ میلی‌متر و $1/59$ است. تناوب ساختار ۱۰ است.

از آنجایی‌که چگالی نوری با ضریب انتقال در ارتباط است، برای این منظور طیف انتقال بر حسب زاویه تابش و طول موج و برای قطبش‌های الکتریکی عرضی (شکل ۲) و مغناطیسی عرضی (شکل ۳) رسم شد. محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل‌ها، در این محدوده، نوار ممنوعه‌ای در ناحیه ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر ایجاد می‌شود. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است که در هر دو قطبش الکتریکی عرضی و مغناطیسی عرضی، با افزایش زاویه تابش، لبه‌های نوار ممنوعه به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شوند. طبق رابطه براگ، در بلورهای فوتونی با افزایش زاویه تابش، اندازه مؤلفه عمودی بردار موج کاهش می‌یابد که منجر به جابه‌جایی آبی طیف می‌شود. همچنین، در طیف انتقال قطبش مغناطیسی عرضی (شکل ۳) پهنای نوار ممنوعه با افزایش زاویه تابش کم می‌شود که دلیل آن زاویه برون‌تر است.



شکل ۲. طیف انتقال میدان الکتریکی عرضی بر حسب زاویه تابش و طول موج نور تابشی. ناحیه سیاه رنگ نوار ممنوعه فوتونی است. در نواحی روشن، عبور موج امکان‌پذیر است.

فوتونی بسیار پاشنده است و میزان گذردهی و انعکاس آن به شدت وابسته به طول موج می‌باشد. فوتون‌ها می‌توانند از بلورهای فوتونی عبور کنند یا منعکس شوند. طول موج‌هایی که اجازه عبور ندارند در نوار ممنوعه انرژی قرار می‌گیرند. روش عددی مورد استفاده در این مقاله، روش ماتریس انتقال است [14]. برای قطبش الکتریکی عرضی با وارد کردن شرایط مرزی در فصل مشترک بین لایه‌ها، ماتریس انتقال بین لایه‌ها طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos(k_z^j \Delta z) & j/q_j \sin(k_z^j \Delta z) \\ jq_j \sin(k_z^j \Delta z) & \cos(k_z^j \Delta z) \end{pmatrix} \quad (1)$$

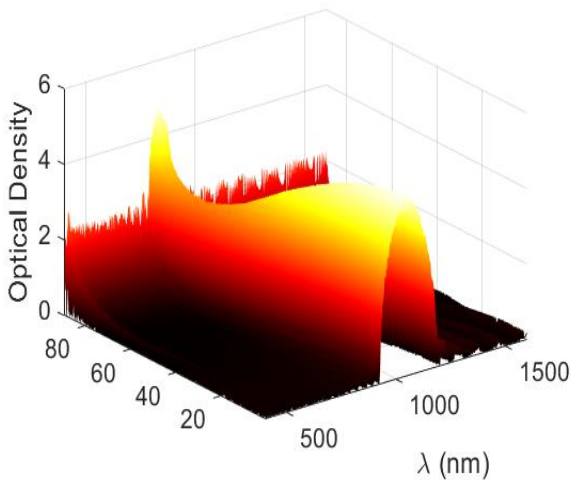
که در آن $k_z^j = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_j} \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j}$ مولفه بردار موج در امتداد محور z است، ω فرکانس نور تابشی، c سرعت نور، ϵ ضریب دی‌الکتریک در هر لایه، μ نفوذپذیری مغناطیسی، θ زاویه تابش و $q_j = \sqrt{\epsilon_j} / \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j}$ است. در این صورت ضریب انتقال برابر است با

$$t(\omega, \theta) = \frac{2 \cos \theta}{(m_{11} + m_{22}) \cos \theta + i(m_{12} \cos^2 \theta - m_{21})} \quad (3)$$

ضرایب m، عناصر ماتریس انتقال برای کل لایه‌ها هستند.

نتایج و بحث

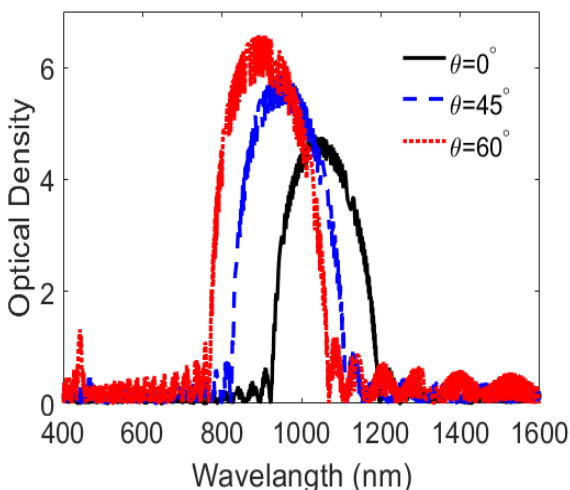
در این مقاله، به بررسی چگالی نوری در یک بلور فوتونی یک‌بعدی متشکل از لایه‌های متناوب SiO_2 و ZrO_2 روی زیرلایه پلی‌کربنات می‌پردازیم. مطابق شکل ۱، در ساختار فرض شده، لایه اول SiO_2 دارای ضریب شکست $1/46$ و ضخامت ۱۸۰ نانومتر و لایه دوم ZrO_2 دارای ضریب شکست $2/1$ و ضخامت ۱۲۰ نانومتر است. همچنین ضخامت لایه پلی‌کربنات ۲ میلی‌متر و ضریب شکست آن $1/59$ است. تناوب ساختار لایه‌ای نیز ۱۰ است. لایه‌ها همگن و خطی هستند. ضخامت لایه‌ها از رابطه یک - چهارم طول موج پیروی می‌کند تا پهنای نوار ممنوعه بزرگ باشد؛ یعنی $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0 / 4$ که در آن λ_0 طول موج مرکزی نوار ممنوعه است [۱۵]. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، مبتنی بر روش ماتریس انتقال و استفاده از نرم‌افزار متلب است.



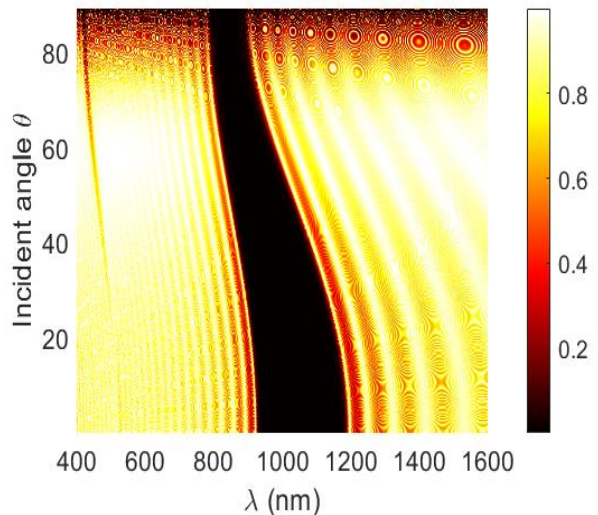
Incident angle θ

شکل ۵. نمودار سه بعدی چگالی نوری برای قطبش مغناطیسی عرضی برحسب طول موج و زاویه تابش. نواحی سیاه رنگ دارای کمترین چگالی نوری و ناحیه نوار ممنوعه دارای بیشترین چگالی نوری است.

برای درک بهتر شکل‌های ۴ و ۵ و مشخص کردن مقدار چگالی نوری، نمودار یک بعدی چگالی نوری برحسب طول موج در سه زاویه مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ رسم شد. در قطبش الکتریکی عرضی و در زوایای ۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، چگالی نوری به ترتیب ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ است (شکل ۶ را ببینید)؛ ولی در قطبش مغناطیسی عرضی، این مقادیر به ترتیب ۴/۵، ۳/۵ و ۳ هستند (شکل ۷ را ببینید). در شکل (۶) با افزایش زاویه، چگالی نوری بیشتر ولی در شکل (۷) به تدریج کاهش می‌یابد.

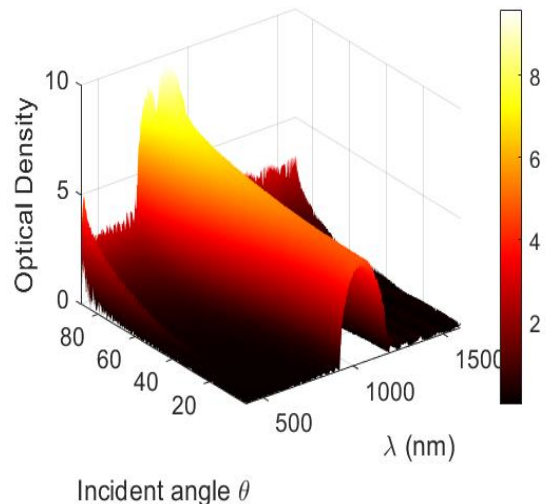


شکل ۶. نمودار یک بعدی چگالی نوری برحسب طول موج در سه زاویه مختلف برای قطبش الکتریکی عرضی. در این قطبش در زوایای ۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، چگالی نوری به ترتیب ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ است.



شکل ۳. طیف انتقال قطبش مغناطیسی عرضی برحسب زاویه تابش و طول موج نور تابشی. ناحیه سیاه رنگ نوار ممنوعه فوتونی است. در نواحی روشن، عبور موج امکان‌پذیر است.

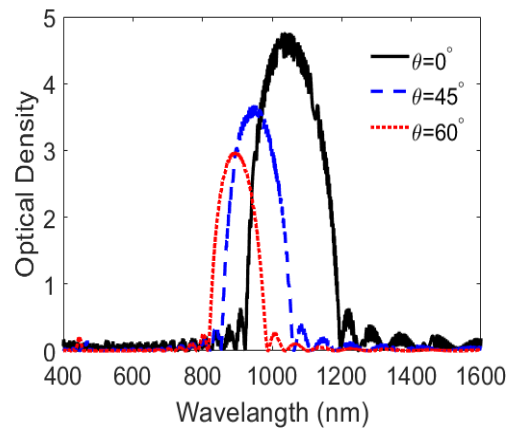
در ادامه، با استفاده از رابطه ۱، نمودار چگالی نوری برای قطبش الکتریکی عرضی (شکل ۴) و قطبش مغناطیسی عرضی (شکل ۵) رسم شد. همان طور که در شکل ۴ مشخص است، در قطبش الکتریکی عرضی چگالی نوری به تدریج با افزایش زاویه افزایش می‌یابد؛ ولی در قطبش مغناطیسی عرضی کاهش می‌یابد. هر چقدر ضریب انتقال کمتر باشد، مقدار چگالی نوری بیشتر است. بنابراین در نواحی سیاه رنگ دارای کمترین چگالی نوری و ناحیه نوار ممنوعه دارای بیشترین چگالی نوری است.



Incident angle θ

شکل ۴. نمودار سه بعدی چگالی نوری برای قطبش الکتریکی عرضی برحسب طول موج و زاویه تابش. نواحی سیاه رنگ دارای کمترین چگالی نوری و ناحیه نوار ممنوعه دارای بیشترین چگالی نوری است.

نتایج نشان می‌دهد که ساختار طراحی شده قادر به ایجاد یک نوار ممنوعه اپتیکی در محدوده ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر است. مطالعه وابستگی زاویه‌ای سیستم نشان داد که با افزایش زاویه تابش، لبه‌های نوار ممنوعه در هر دو قطبش به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شوند. همچنین مشخص شد که چگالی نوری در قطبش الکتریکی عرضی روند افزایشی و در قطبش مغناطیسی عرضی روند کاهشی با افزایش زاویه تابش از خود نشان می‌دهد. همچنین یک رابطه معکوس بین ضریب انتقال و چگالی نوری در این سیستم مشاهده شد. در قطبش الکتریکی عرضی، چگالی نوری با افزایش زاویه به تدریج افزایش می‌یابد؛ ولی در قطبش مغناطیسی عرضی کاهش می‌یابد. هر چقدر ضریب انتقال کمتر باشد، مقدار چگالی نوری بیشتر است و برعکس. این یافته‌ها می‌تواند در طراحی ادوات فوتونیک مانند فیلترهای نوری انتخابی، حسگرهای حساس به زاویه تابش و پوشش‌های محافظ نوری استفاده شود. ترکیب سیلیکا و زیرکونیا روی زیرلایه پلی‌کربنات، امکان دستیابی به خواص نوری قابل تنظیم را فراهم می‌سازد.



شکل ۷. نمودار یک بعدی چگالی نوری برحسب طول موج در سه زاویه مختلف برای قطبش مغناطیسی عرضی. در این قطبش در زوایای ۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، چگالی نوری به ترتیب به ترتیب ۳/۵، ۴/۵ و ۳ است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار اپتیکی یک بلور فوتونی یک‌بعدی متشکل از لایه‌های تناوبی سیلیکا و زیرکونیا روی زیرلایه پلی‌کربنات بررسی شده است. با استفاده از روش ماتریس انتقال، طیف انتقال سیستم برای هر دو قطبش الکتریکی عرضی و مغناطیسی عرضی در محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر تحلیل شد.

منابع

References

- [1] Wu F, Zhang X, Liu D, Yin C. Angle-insensitive phase shift in one-dimensional photonic crystal containing hyperbolic metamaterials in the visible range. *Physica B: Condensed Matter*. 2022 Aug 15;639:413967.
- [2] Shirin NA, Roslyakov IV, Kushnir SE, Napolskii KS. One-dimensional photonic crystals based on porous anodic alumina: Optical and morphology changes under thermal and chemical treatments. *Optical Materials*. 2024 Jun 1;152:115518.
- [3] Yeganegi E, Lagendijk A, Mosk AP, Vos WL. Local density of optical states in the band gap of a finite one-dimensional photonic crystal. *Physical Review B*. 2014 Jan 15;89(4):045123.
- [4] Jao RF, Lin MC. Quantitative analysis of photon density of states for one-dimensional photonic crystals in a rectangular waveguide. *Crystals*. 2019 Nov 4;9(11):576.
- [5] d'Aguanno G, Mattiucci N, Scalora M, Bloemer MJ, Zheltikov AM. Density of modes and tunneling times in finite one-dimensional photonic crystals: A comprehensive analysis. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2004 Jul;70(1):016612.
- [6] Lin Y, Chou S H, Robust W J. High-Q filter with complete transmission by conjugated topological photonic crystals. *Sci Rep*. 2020 Oct 10: 7040.
- [7] Makasyuk I, Woods M. Calculating laser eyewear effective OD and VLT using manufacturer OD curves. In *International Laser Safety Conference*. 2019 Dec 1: TP1002 .
- [8] Wang H, Zhao X. Measurement of optical density of microbes by multi-light path transmission method. 2024 Jan 3; 4:565-572.
- [9] Griscom DL. Optical properties and structure of defects in silica glass. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 1991 Oct 1;99(1154):923-42.
- [10] Sinitskii AS, Knot'ko AV, Tretyakov YD. Silica photonic crystals: synthesis and optical properties. *Solid state ionics*. 2004 Aug 31;172(1-4):477-9.
- [11] Manziuc MM, Gasparik C, Negucioiu M, Constantiniuc M, Burde A, Vlas I, Ducea D. Optical properties of translucent zirconia: A review of the literature. *EuroBiotech J*. 2019 Jan 1;3(1):45-51.
- [12] Keiteb AS, Saion E, Zakaria A, Soltani N. Structural and optical properties of zirconia nanoparticles by thermal treatment synthesis. *Journal of nanomaterials*. 2016;2016(1):1913609.
- [13] Aden M, Roesner A, Olowinsky A. Optical characterization of polycarbonate: Influence of additives on optical properties. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2010 Feb 15;48(4):451-5.
- [14] Missoni L, Ortiz G, Martínez-Ricci M, Toranzos V, Luis-Mochán W. Rough 1D photonic crystals: a transfer matrix approach. *Opt. Mater*. 2020 Jul 109: 110012 .
- [15] Wu C, Yu-Nian R, Wei-Hsieh H. Enhancement of photonic band gap in a disordered quarter-wave dielectric photonic crystal. *Progress In Electromagnetics Research*. 2010 Mar 100: 27-36.