



# طراحی فیلتر عبوری دو شکافی در محدوده طول موج‌های مرئی با استفاده از بلور نوری یک‌بعدی

فریده سادات سعیدی | مهرداد مرادی\*

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان

**چکیده:** در این پژوهش، از جفت‌لایه  $[Si/SiO_2]$  و بستر سلیکون نیتريد برای طراحی یک بلور نوری یک‌بعدی به منظور کاربرد در فیلترهای نور مرئی استفاده شده است. در حالت عادی طیف عبور بلور نوری دارای یک گستره طیف عبور ممنوعه است، اما با وارد کردن لایه  $TiO_2$  به‌عنوان یک لایه نقص در میان جفت لایه‌ها، یک شکاف عبور با عرض چند نانومتر در گستره ممنوعه ایجاد می‌شود. در ادامه، با یک نوآوری ساده و به کمک یک ساختار به‌نسبت قرینه، دو شکاف عبوری در گستره طول موج‌های مرئی و فرورسرخ ایجاد شد. با محاسبه ضرایب عبور و بازتاب، محل دو شکاف با تغییر ضخامت لایه‌ها، به‌طور قابل مهندسی و تنظیم بودند. لازم به ذکر است که در برخی از ساختارها سه شکاف قابل تنظیم ایجاد شد که می‌تواند کاربردهای متنوعی داشته باشد. محاسبات بر پایه روش ماتریس‌های انتقال  $2 \times 2$  با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

**واژگان کلیدی:** بلور نوری یک‌بعدی، لایه نقص، فیلتر نور مرئی، لایه نازک.

m.moradi@kashanu.ac.ir

عبور داشته باشند که در اینجا اهمیت فیلترهای نوری پررنگ‌تر می‌شود. بلورهای نوری که با همتای الکترونیکی خود یعنی دیودها مقایسه می‌شوند، می‌توانند باند مجاز و ممنوع داشته باشند که پهنایی از طول موج‌ها را عبور داده و دسته دیگر را از طیف نوری حذف کنند [۳]. در صورتی که درون یک بلور نوری یک نقص ایجاد شود نتیجه آن ایجاد یک دریچه باریک درون طیف جذب بلور نوری خواهد بود. برای استفاده از بلور نوری در کاربردهای متفاوت با تنظیم و تغییر در نقص درون بلور این دریچه عبوری بنا به نیاز تغییر داده می‌شود. تاکنون از این روش برای کاربردهای زیادی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به تشدید پلاسمونی در بلورهای نوری [۴]، طراحی حسگرهای فوتولتاییک [۵] و افزایش اثر مگنتو اپتیکی کر اشاره کرد [۶].

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌هایی بر بلورهای نوری با توجه به کاربردهای فراوان آن‌ها توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. کاربردهای وسیع در زمینه‌های متفاوت از جمله فیلترهای نوری، عینک‌های محافظ در برابر نور لیزر و سویچ‌های نوری، مشوق سرمایه‌گذاران را در این زمینه بوده است [۱ و ۲]. در این میان فیلترهای نوری که اساس کار آنها بر مبنای بلور نوری است، نقش بسزایی را در ابزار آلات فوتونی ایفا می‌کنند. در بسیاری از کاربردها لازم است که طول موج‌های خاصی عبور داده شود و مسیر بقیه طول موج‌ها مسدود شوند. برای مثال، در بعضی لیزر دیودها مانند لیزر ۵۳۲ نانومتر، پرتو با چند طول موج ایجاد می‌شود که نیاز است بعضی از آن‌ها حذف شده و فقط یک یا دو طول موج اجازه

الکتريکی و با استفاده از معادله ۳ به معادلات ۴ و ۵ می توان دست یافت:

$$\varepsilon_1 E_1^\perp - \varepsilon_2 E_2^\perp = 0 \quad E_1^\parallel - E_2^\parallel = 0 \quad (2)$$

$$B_1^\perp - B_2^\perp = 0 \quad \frac{B_1^\parallel}{\mu_1} - \frac{B_2^\parallel}{\mu_2} = 0$$

$$k_i = 2\pi n/\lambda \quad (3)$$

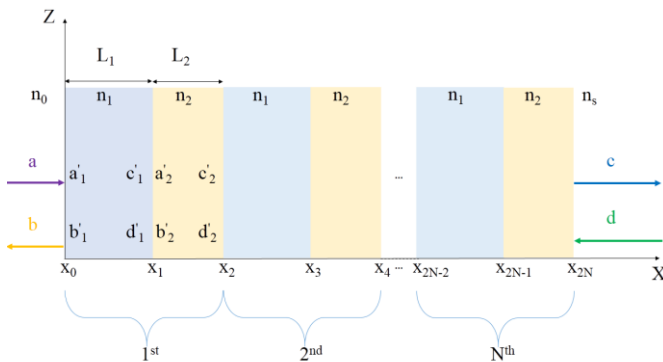
$$a - b = c - d \quad (4)$$

$$k_1(a + b) = k_1(c + d) \quad (5)$$

با استفاده از معادلات بالا می توان ماتریس انتقال مرزی بین دو محیط را به شکل معادله ۶ تشکیل داد:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ k_1 & k_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \quad (6)$$

برای بلوری همانند شکل ۲ ماتریس های انتقال و انتشار برای تابش فرودی عمود بر بلور و لایه م ساختار به صورت ماتریس انتقال مرزی A و ماتریس انتشار D است.



شکل ۲: طرحواره ای از یک بلور نوری.

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ k_i & k_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D_i = \begin{bmatrix} e^{-ik_i L_i} & 0 \\ 0 & e^{+ik_i L_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

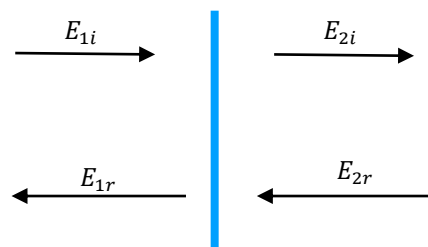
که فرمول ماتریس انتقال و انتشار،  $L_i$  ضخامت و  $k_i$  عدد موج لایه م در ساختار می باشد. و a و b دامنه های موج فرودی و بازتابی از لایه اول و c و d دامنه های موج عبوری و بازتابی از لایه آخر یا همان زیرلایه هستند. در مورد بلورهای نوری که در آن ساختار به طور متناوب تکرار می شود، رابطه (۹) برای ماتریس انتقال کل استفاده می شود:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = A_0^{-1} [A_1 D_1 A_1^{-1} A_2 D_2 A_2^{-1}]^N A_N \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \quad (9)$$

در این مقاله، بلور نوری  $Si_3N_4/[Si/SiO_2]^6$  طراحی و شبیه سازی شده است و درون آن نقص تیتانیوم دی اکسید ( $TiO_2$ ) تعبیه شده است. در این بلور از سیلیکون نیتريد ( $Si_3N_4$ ) به عنوان زیرلایه استفاده شد و سیلیکون (Si) به عنوان ماده با ضریب شکست بالا و سیلیکون دی اکسید ( $SiO_2$ ) به عنوان ماده با ضریب شکست پایین انتخاب شد. در این حالت، ثابت دی الکتریک ها به اندازه کافی متمایز هستند و جذب نور با لایه ها حداقل مقدار ممکن را خواهد داشت. تعداد لایه ها به گونه ای انتخاب شده است که در یک بازه طول موجی وسیع؛ سهم زیادی از نور از بلور عبور نکند و در نتیجه فیلتر عبور پایین خواهد بود که برای مقاصد ساخت عینک های محافظ در برابر نور لیزر مفید است. محاسبات و شبیه سازی به نحوی خواهد بود که نقص دو قله ای درون باند عبوری ایجاد شود به نحوی که امکان عبور دو طول موج فراهم بوده و بقیه ی طول موج ها عبور نکنند، همچنین، محاسبات و شبیه سازی به نحوی است که طول موج این قله های عبوری قابل است.

## ۲- بخش تئوری

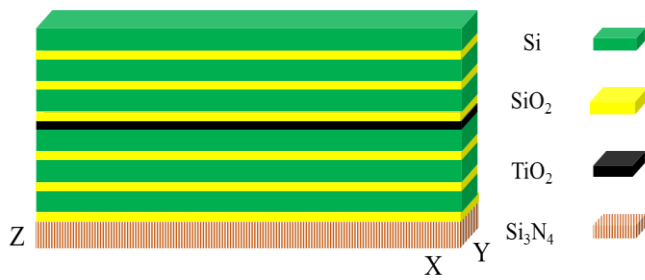
برای تداخل های ایجاد شده با ساختارهای تناوبی در بلورهای نوری سبب شده تا ماهیت برداری نور با استفاده از معادلات ماکسول مورد بررسی قرار بگیرد [۹-۷]. در اینجا، باریکه پرتو نور به صورت یک موج الکترومغناطیسی  $\vec{E}(r) = E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$  در نظر گرفته می شود و برای ساختاری همانند شکل ۱ معادلات موج الکتريکی فرودی، بازتابیده و عبوری از ساختار به صورت معادلات ۱ خواهد بود.



شرایط مرزی در حالت کلی و در نبود بار و جریان آزاد در سطح مرزی به صورت معادلات ۲ هستند که برای مولفه های میدان

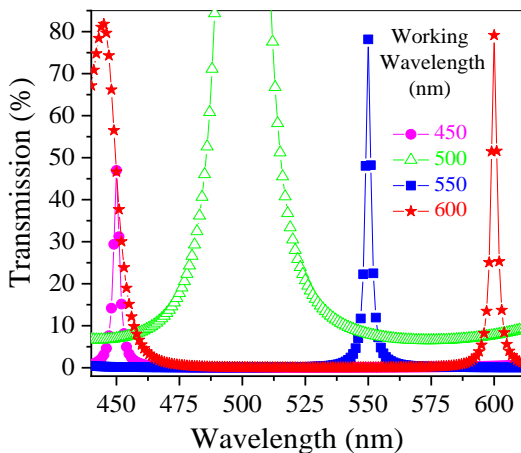
$$E_{1i} = a e^{i(k_1 x - \omega t)} \quad E_{1r} = b e^{-i(k_1 x + \omega t)} \quad (1)$$

$$E_{2i} = c e^{i(k_2 x - \omega t)} \quad E_{2r} = d e^{-i(k_2 x + \omega t)}$$



شکل ۳: طرح‌های از بلور نوری  
[Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>3</sup>/TiO<sub>2</sub>/[Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>3</sup>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

در صورتی وجود نقص کاربردی است که شکاف عبوری قابلیت تغییر به سمت طول‌موج‌های بیشتر یا کمتر داشته باشد. محاسبات نشان داد که در این ساختار می‌توان با تغییر طول‌موج کاری مکان قله را تغییر داد. این محاسبات زمانی مفید است که هدف طراحی فیلتر نوری باشد و در یک طول‌موج مشخص شکافی برای عبور وجود داشته باشد. شکل ۴ طیف عبور را برای ساختار [Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>3</sup>/TiO<sub>2</sub>/[Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>3</sup>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> با طول‌موج‌های متفاوت کاری ۴۰۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. شایان ذکر است که با تغییر طول‌موج کاری ضخامت تمام لایه‌ها با توجه به رابطه  $L = \lambda_w / 4n$  تغییر می‌کنند. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، محل شکاف عبوری به‌طور دقیق در طول‌موج کاری منتخب قرار گرفته است. بیشینه عبور برای طول‌موج کاری ۴۵۰ نانومتر نزدیک به ۵۰ درصد و برای سایر طول‌موج‌های کاری بالای ۸۰ درصد است. پهنای قله‌ها در نصف مقدار بیشینه (FWHM) بجز طول‌موج کاری ۵۵۰ نانومتر، کمتر از ۴ نانومتر است که برای کاربرد فیلتری بسیار مناسب است.



شکل ۴: طیف عبور بلور نوری [Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>3</sup>/TiO<sub>2</sub>/[Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>3</sup>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> با طول‌موج‌های کاری ۴۰۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ نانومتر.

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \quad (10)$$

که N تعداد تکرار جفت‌لایه و S لایه آخر در بلور است، با ادامه محاسبات ضرایب بازتاب r و عبور t به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$r = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad \text{و} \quad t = \frac{1}{M_{11}} \quad (11)$$

و مقادیر بازتاب R و عبور T بدین صورت نوشته می‌شوند:

$$R = |r|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (12)$$

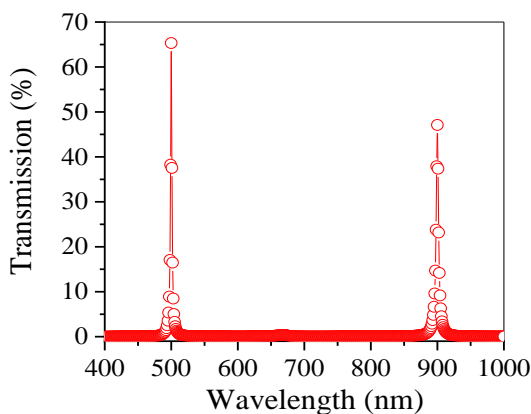
$$|t|^2 = \frac{n_s}{n_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (13)$$

### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، بلور نوری به گونه‌ای طراحی شده که ماده (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) نقش زیرلایه را بازی می‌کند. سیلیکون (Si) و سیلیکون دی‌اکسید (SiO<sub>2</sub>) به ترتیب به‌عنوان لایه‌ها با ضرایب شکست بالا و پایین و (TiO<sub>2</sub>) به‌عنوان لایه نقص انتخاب شدند. طول‌موج کاری ( $\lambda_w$ ) که برای تعیین ضخامت اولیه به آن نیاز داریم، مقدار ۶۰۰ نانومتر در گستره میانه نور مرئی انتخاب شده است. در محاسبات برای رسم نمودار مقدار عبور از بلور، طول‌موج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر جاروب می‌شود و ضریب شکست لایه‌ها تابعی از همین طول‌موج است. در نتیجه با تغییر طول‌موج، ضریب شکست لایه‌ها نیز متناسب با طول‌موج تغییر می‌کنند. ضریب شکست‌ها از منابع علمی [۱۰-۱۲] استخراج و در کد محاسباتی لحاظ شده است. در گام نخست، ضخامت تمام لایه‌ها به صورت  $L = \lambda_w / 4n$  تعریف شده‌اند که در آن طول‌موج کاری ۶۰۰ نانومتر در نظر گرفته و برای ضریب شکست لایه‌های مورد استفاده که در این گستره طول‌موجی، قسمت موهومی نیز دارند تنها قسمت حقیقی ضریب شکست در نظر گرفته شده است. بنابراین، ضخامت لایه‌های نازک Si، SiO<sub>2</sub> و TiO<sub>2</sub> به ترتیب ۴۳/۸، ۱۰۲/۹ و ۵۲/۲ نانومتر انتخاب شدند. از آنجا که یک لایه نقص می‌تواند یک شکاف در قسمت عبور ایجاد کند، در گام نخست، سه جفت‌لایه [Si/SiO<sub>2</sub>] در نظر گرفته شد. سپس، یک لایه TiO<sub>2</sub> به‌عنوان نقص وارد می‌شود و در ادامه، دوباره سه جفت‌لایه [Si/SiO<sub>2</sub>] پس از لایه نقص قرار می‌گیرند، طرح‌راهی از ساختار در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

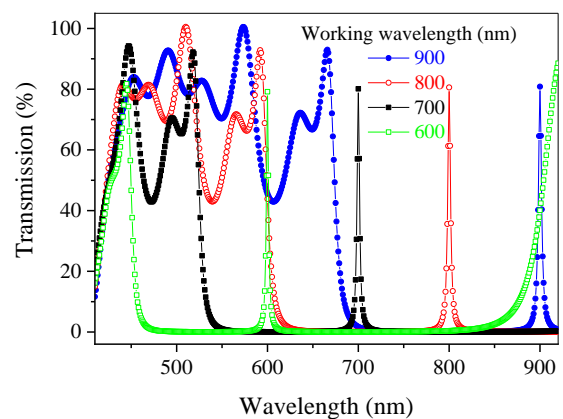
پشت سر یکدیگر بتوان یک فیلتر دو یا سه شکافی داشت که می‌تواند کاربردهای خاص خود را داشته باشد. این قابلیت از آنجا به وجود می‌آید که ساختارهای شکل ۴ دارای یک شکاف و یک باند عبور هستند و مشابه همین اتفاق در ساختارهای شکل ۵ می‌افتد. حال اگر بتوان طوری این طراحی را انجام داد که شکاف یک ساختار در باند عبور ساختار دوم اتفاق بیفتد، در آن صورت یک ساختار دو شکافی خواهیم داشت.

بدین منظور، محاسبه مقدار عبور از ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  با لایه نقص در ضخامت مربوط به طول موج کاری ۵۰۰ نانومتر و سپس، عبور از ساختار مشابه پیشین با لایه نقص در ضخامت مربوط به طول موج کاری ۹۰۰ نانومتر انجام شده و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، تنها در این دو طول موج عبور ممکن و در بقیه موارد عبور نور صفر است. در واقع این حالت ترکیبی از دو عبور متفاوت از دو ساختار متوالی است. بنابراین، در طول موج‌هایی که هر دو نمودار عبور داشته‌اند، در اینجا نیز عبور وجود دارد. اما چون عبور در هر طول موج کاری کوچکتر از یک است، در حالت طول موج ترکیبی عبور کل در یک طول موج مشخص به طور مثال، ۵۰۰ نانومتر کمتر از مقدار آن در حالتی خواهد بود که تنها برای طول موج کاری ۵۰۰ نانومتر محاسبه شده است. بدیهی است که اگر طیف عبور هر دو طول موج کاری منتخب، در یک طول موج ثابت عبور نداشته باشند یا یکی از طول موج‌های کاری عبور داشته باشد ولی دیگری عبور نداشته باشد در این صورت عبور کل صفر خواهد بود.



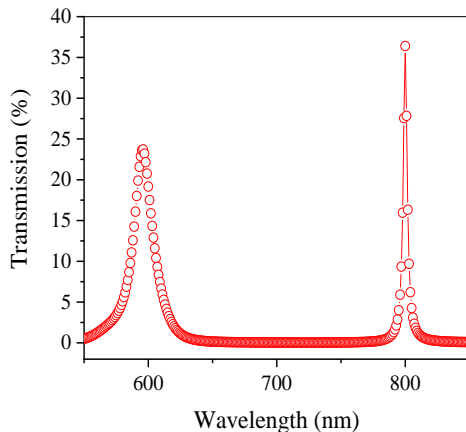
شکل ۶: طیف عبوری از بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در طول موج کاری ترکیبی ۵۰۰ و ۹۰۰ نانومتر.

یک نکته قابل توجه آن است که با انتخاب طول موج کاری ۶۰۰ نانومتر افزون بر شکاف عبوری با پهنای حدود چند نانومتر در محل طول موج کاری، یک گستره عبور دیگر در طول موج‌های بلندتر نیز مشاهده می‌شود که مقدار نور عبوری از آن به طور متوسط بالای ۸۰ درصد است، محاسبات نشان داد که با افزایش طول موج کاری بیش از ۵۵۰ نانومتر می‌توان شکاف‌های عبوری جدیدی با طول باند عبور بزرگتر و شدت نور عبوری بیش‌تری ایجاد می‌شود. در نتیجه محل شکاف، تعداد شکاف‌ها، طول باند شکاف و شدت نور عبوری به‌طور کامل قابلیت مدیریت و کنترل دارند. از سوی دیگر، این نکته برای طول موج‌های کاری بلندتر از ۵۵۰ نانومتر به صورت معکوس اتفاق می‌افتد. یعنی به غیر از یک شکاف عبور در طول موج کاری مربوطه، یک گستره عبور در طول موج‌های بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر خواهیم داشت. این مطلب در شکل ۵ طیف عبور بلور برای طول موج‌های کاری ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ نانومتر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این طول موج‌ها افزون بر شکاف عبوری، یک باند عبوری نیز در طول موج‌های کوتاه وجود دارد. به عنوان مثال، با انتخاب طول موج کاری ۹۰۰ نانومتر، افزون بر یک شکاف عبوری در همین طول موج، یک باند عبوری در بگستره تقریبی ۴۲۰ تا ۶۸۰ نانومتر وجود دارد و برای طول موج کاری ۸۰۰ نانومتر باند عبور در گستره ۶۰۰-۴۲۰ نانومتر را افزون بر شکاف مربوطه خواهیم داشت.

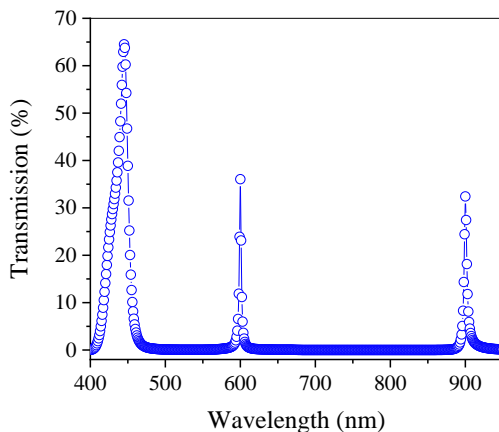


شکل ۵: طیف عبور بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  با طول موج‌های کاری ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ نانومتر.

با در نظر گرفتن قابلیت ساختار در شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان انتظار داشت که با قرار دادن دو ساختار با دو طول موج کاری متفاوت،



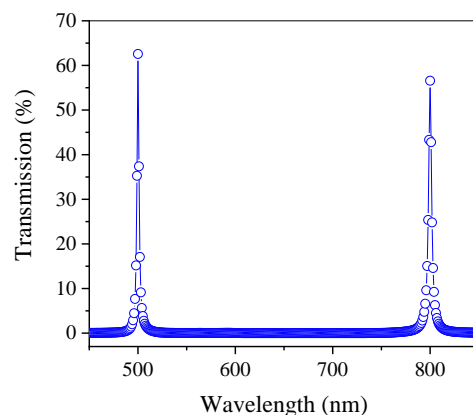
شکل ۸: طیف عبوری از بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در طول موج کاری ترکیبی ۶۰۰ و ۸۰۰ نانومتر.



شکل ۹: طیف عبوری از بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در طول موج کاری ترکیبی ۶۰۰ و ۹۰۰ نانومتر.

از جمله محدودیت‌های عملیاتی کردن این شبیه‌سازی‌ها، می‌توان به دقت دستگاه‌های لایه‌نشانی و خطا در ضخامت لایه‌ها اشاره کرد. اما از آنجا که ضخامت دو تا از لایه‌ها در حدود ۵۰ نانومتر و ضخامت لایه دیگر در حدود ۱۰۰ نانومتر است، طبق تجربه کارهای آزمایشگاهی، خطا در لایه‌نشانی به اندازه چند نانومتر نمی‌تواند تغییرات محسوسی را در نتایج ایجاد کند. همچنین، با توجه به اینکه اغلب ساختارها عبور بالای ۵۰ درصد را دارند و منطقه‌های عبور به‌طور کامل قابل مهندسی هستند، می‌توان انتظار داشت که این ساختارها بسیار کاربردی باشند.

شکل‌های ۷ و ۸ طیف عبوری از ساختار کاری متفاوت نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در طول موج‌های ترکیبی ۵۰۰ و ۸۰۰ نانومتر (شکل ۷) و طول موج‌های کاری ۶۰۰ و ۸۰۰ نانومتر (شکل ۸) دو شکاف در طول موج‌های مربوطه وجود دارد. در ترکیب طول موج‌های کاری ۶۰۰ و ۹۰۰ نانومتر ترکیب دو ساختار به گونه‌ای انجام می‌گیرد که سه شکاف عبوری در طول موج‌های ۴۵۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ نانومتر وجود دارد، در نتیجه فیلتر چند شکافی قابلیت پذیرش طول موج‌های ورودی بیشتر، فیلترسازی با کیفیت و نزدیک به صفر و شکاف عبوری متعدد را دارد. شایان ذکر است که برای مهندسی محل شکاف‌ها، باید محل هر کدام از شکاف‌ها را جداگانه تنظیم کرد، بدیهی است که گستره عبوری هر کدام از ساختارها، احتمال حضور شکاف دوم در آن گستره را تضمین می‌کند و مقدار عبور از شکاف دوم بستگی شدیدی به مقدار عبور محدوده طول موجی ساختار دوم دارد. لازم به یادآوری است که مقدار عبور از شکاف اول نیز تحت تاثیر مقدار عبور در بازه طول موجی کمی کاهش پیدا خواهد کرد. برای فرایند ساخت پیشنهاد می‌شود دو ساختار در دو طرف یک شیشه ساخته شوند. در این صورت، شیشه برای یکی از ساختارها نقش زیرلایه و برای ساختار دیگر نقش محیط اول را بازی خواهد کرد. با توجه به ضخامت میلیمتری شیشه، دو ساختار به‌طور کامل مجزا از هم خواهند بود و حضور یکی از آن‌ها عملکرد دیگری را مختل نخواهد کرد.



شکل ۷: طیف عبوری از بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در طول موج کاری ترکیبی ۵۰۰ و ۸۰۰ نانومتر.



## ۴- نتیجه گیری

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با ایجاد نقص و برهم زدن تناوب موجود در بلور مسیر جدیدی برای عبور پرتو در نوار ممنوعه ایجاد می‌شود که با مهندسی و طراحی مناسب، از این مسیر جدید می‌توان برای عبور طول موج‌های دلخواه و فیلتر کردن سایر طول موج‌ها استفاده کرد. در صورتی که ضخامت لایه‌ها به صورت  $L = \lambda_{fix}/4n$  در نظر گرفته شود مکان بیشینه با طول موج کاری رابطه مستقیم داشته و هر طول موج کاری که انتخاب شود مکان بیشینه عبوری در همان طول موج قرار می‌گیرد. همچنین، با افزایش طول موج کاری افزون بر تغییر در مکان و ارتفاع بیشینه عبوری یک گستره عبوری جدید برای عبور موج ایجاد می‌شود. با کنار هم قرار دادن دو ساختار به صورت نسبتاً قرینه به گونه‌ای که موج خروجی از ساختار اول به عنوان موج فرودی برای ساختار دوم منظور شود، می‌توان فیلتری ساخت که دو یا سه شکاف عبوری داشته و در سایر طول موج‌ها نور را با کیفیت بالایی متوقف کند.

## مراجع

- [1] F. Yang, G. Yen, B. T. Cunningham, "Integrated 2D photonic crystal stack filter fabricated using nanoreplica molding", *Optics Express*, 18, 11846-11856, 2010.
- [2] M. Chena, C. Lia, M. Xub, W. Wangb, S. Mab, Y. Xia, "Eye-protection glasses against YAG laser injury based on the band gap reflection of one-dimensional photonic crystal", *Optics & Laser Technology*, 39, 214-218, 2007.
- [3] T. Pan, C. Tang, L. Gao, Z. Li, "Optical bistability of nonlinear multilayered structure containing left-handed materials", *Phys. Lett. A* 337, 473-479, 2005.
- [4] S. M. Hamidi, "Optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetized coupled resonator plasma photonic crystals", *Phys. Plasmas*, 19, 3-8, 2012.
- [5] M. Moradi, H. Alisafae, M. Ghanaatshoar, "The Kerr effect enhancement in non-quarter-wave lossy magnetophotonic crystals", *Physica B*, 405, 4488-4491, 2010.
- [6] N. Ansari, E. Mohebbi, "Increasing optical absorption in one-dimensional photonic crystals including MoS<sub>2</sub> monolayer for photovoltaics applications", *Opt. Mater.* 62, 152-158, 2016.

- [7] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, "Photonic crystals: Molding the Flow of Light", Princeton University Press, 1995.
- [8] J. D. Jackson, "Classical electrodynamics", John Wiley & Sons, New York, 1962.
- [9] N. H. Liu, S. Y. Zhu, H. Chen, X. Wu, "Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect", *Phys. Rev. E* 65, 07-14, 2002.
- [10] <http://refractiveindex.info>
- [11] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, New York, 1998.
- [12] <http://www.filmetrics.com>



# Design a Two-Gap Transmission Filter in Visible Wavelength by One-Dimensional Photonic Crystal

F. Saeedi, M. Moradi\*

Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan

**Abstract:** In this paper [Si/SiO<sub>2</sub>] stacks and silicon nitride as substrate were used to design a one-dimensional photonic crystal for application in visible light filters. In normal mode, transmission spectrum has a forbidden transmission region, but by inserting the TiO<sub>2</sub> thin film as a defect layer between the stacks, a transmission gap with a width of a few nanometers was created in the forbidden band. In addition, with a simple innovation and with the help of a relatively symmetric structure we managed to create two gaps in the band of visible and infrared wavelengths. By simple calculations, the location of the two gaps by changing the layer thicknesses, can be quite engineered and adjusted. It should be noted that in some structures three adjustable gaps were created which can have a variety of applications. All calculations have been carried out based on a  $2 \times 2$  transfer matrix method (TMM) using MATLAB software.

**Keywords:** One-dimensional photonic crystal, Defect layer, Visible light filter, Thin film