



## مهندسی محدوده طول موجی عبور در بلور نوری $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$ به وسیله لایه نقص

### TiO<sub>2</sub>

مرادی، مهرداد؛ سعیدی، فریده سادات

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان

### چکیده

در این مقاله اثر اضافه کردن لایه نازک TiO<sub>2</sub> به عنوان یک نقص در بلور نوری یک بعدی متشکل از جفت لایه های [Si/SiO<sub>2</sub>] بر روی زیرلایه Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نظری بر پایه روش ماتریس های انتقال 2x2 با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است و تلاش شده تا طیف طول موج عبوری ساختار مهندسی شود. نقص به صورت تغییر در ضریب شکست در نظر گرفته شد و مشاهده شد که با ایجاد نقص در نانو ساختار می توان شکافی برای عبور در نوار ممنوعه ایجاد کرد. در ادامه با تغییر پارامترهایی مانند طول موج کاری، ضخامت لایه ها، ضخامت لایه نقص و تغییر چیدمان لایه ها، به جایجایی شکاف عبوری و تغییر ارتفاع آن پرداخته شد. نتایج نشان داد با تغییر پارامترهای ذکر شده، می توانیم به نحوه دلخواه بازه عبور و مقدار آن را مهندسی کنیم

### Engineering the transmission region in [Si/SiO<sub>2</sub>]<sup>6</sup>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photonic crystal by TiO<sub>2</sub> defect layer

Moradi, Mehrdad; Saeedi, Faride Saadat

Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran

### Abstract

In this paper, the effect of adding a thin layer of TiO<sub>2</sub> as defects in a one-dimensional photonic crystal consists of [Si/SiO<sub>2</sub>] stack on the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> substrate were investigated. Theoretical calculations based on 2x2 transfer matrix method were carried out using MATLAB software and trying to engineer the transmission wavelength spectra. The defect was considered as a variation in the refractive index and observed that presence of a defect in the nanostructure can create a gap for the transmission in the forbidden band. In addition, the height and position of the gap can be shifted by changes in the parameters such as working wavelength, thickness of layers, defect layer thickness and changing the layers order. The results show that by changing some parameters, it is possible to arbitrarily engineer the transmission spectrum.

PACS No: 42, 68

بلور نوری تکرار می شود. بلور نوری به زبان ساده به ساختاری که ضریب شکست اپتیکی آن به طور متناوب تکرار می شود، اطلاق می شود. تناوب در ضریب شکست ها باعث به وجود آمدن نوار ممنوعه ای می شود که مانعی برای انتشار فوتون در بلور نوری است که این امر منجر به کنترل انتشار نور در یک بسامد مشخص می شود. همچنین با ایجاد نقص در بلور نوری می توان تناوب و نوار ممنوعه موجود در بلور را شکست و شکافی را در نوار ممنوعه برای عبور نور ایجاد

### مقدمه

در نیمرساناها الکترون های آزاد وظیفه هدایت الکتریکی و اتم های سازنده بلور نقش پراکنده ساز را برای امواج الکترونی برعهده دارند. همچنین در یک نیمرسانا بواسطه پراش براگ گونه از اتم های شبکه، بلور نوارهای ممنوعه ای را برای انتشار الکترون در نظر می گیرد. عملکرد در یک بلور نوری، مشابه یک نیمرسانا است و پدیده هایی که برای الکترون درون یک نیمرسانا رخ می دهد به صورت مشابه برای فوتون در یک

انتشار و انعکاس لایه) به یکدیگر مربوط می‌شود. بدین منظور به هر لایه یک ماتریس نسبت می‌دهند و بعد از بدست آوردن این ماتریس، در هر جای ساختار که لایه مذکور قرار گرفته شده باشد این ماتریس ایفای نقش می‌کند. با داشتن ماتریس انتقال هر لایه می‌توان دامنه و فاز امواج الکترومغناطیسی را بعد از عبور از لایه مفروض حساب کرد و بدیهی است که با داشتن دامنه و فاز موج الکترومغناطیسی که از چندین لایه متفاوت عبور کرده است محاسبه ضریب عبور و بازتاب کار ساده‌ای خواهد بود. اساس روش ماتریس‌های انتقال براساس اصولی که برای نوشتن شرایط مرزی در معادلات ماکسول به کار می‌رود، بنا شده است. به منظور محاسبه ضرایب بازتاب و شکست از ماتریس انتقال  $2 \times 2$  استفاده شده است. در قطبش S فرود میدان الکتریکی، موج فرودی موازی با صفحه تابش بوده و موازی هم برمی‌گردد. ولی قطبش P میدان مغناطیسی موج موازی با سطح می‌باشد، در نتیجه ماتریس انتقال مرزی برای این دو مد دارای مولفه‌های جداگانه است. در مورد بلور نوری، روابط به صورت زیر نوشته می‌شوند:



شکل ۱: طرحواره‌ای از یک بلور نوری.

ماتریس‌های انتقال و انتشار برای تابش عمود به بلور و لایه  $i$ ام ساختار به ترتیب به صورت ماتریس انتقال مرزی از یک لایه به لایه مجاور (A) و ماتریس انتشار درون یک لایه (D) است:

(۱)

(۲)

که در آن  $L_i$  ضخامت و  $k_i$  عدد موج لایه  $i$ ام در بلور می‌باشد. در مورد بلورهای نوری که در آن ساختار به طور

کرد. از این قابلیت‌ها می‌توان برای طراحی موجبرها، آینه‌های چند وجهی و فیلترهای نوری استفاده کرد [۱-۳]. فیلترهای نوری می‌توانند یک طول‌موج خاص را از یک موجبر گذر بدهند و نقش مهمی را در انتخاب یک طول‌موج و حذف بقیه طول‌موج‌ها بر عهده دارند. یکی از مهمترین انواع فیلترهای نوری پوشش‌های محافظ در برابر نور لیزر هستند.

در این مقاله بلور نوری متشکل از شش جفت‌لایه  $[Si/SiO_2]$  بر روی زیرلایه  $Si_3N_4$  طراحی شده است که در آن سیلیکون (Si) به عنوان ماده با ضریب شکست بالا و دی‌اکسید سیلیکون ( $SiO_2$ ) به عنوان ماده با ضریب شکست پایین انتخاب شد. در این ساختار ثابت دی‌الکتریک‌ها به اندازه کافی متفاوت هستند تا بتوانند تداخل‌های سازنده و ویرانگر لازم را ایجاد کنند. همچنین زیرلایه و لایه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در بازه طول‌موجی مورد نظر حداقل مقدار جذب ممکن را داشته باشند. تعداد لایه‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که در یک بازه طول‌موجی وسیع؛ سهم زیادی از نور از بلور عبور نکند و در نتیجه فیلتر عبور پایین خواهد بود. سپس به بررسی عوامل موثر در بهینه‌سازی بلور نوری، مانند ایجاد نقص به وسیله اضافه کردن ماده تیتانیوم دی‌اکسید ( $TiO_2$ )، تغییر طول‌موج کاری، میزان ضخامت لایه نقص و چیدمان لایه‌ها پرداخته شد.

## مبانی نظری

از دیدگاه فیزیکی، اصل اساسی در ایجاد نوار ممنوعه در یک ساختار متناوب، وجود پدیده‌ی پراش و تداخل در میان امواج فرودی بر ساختار و منعکس شده از آن می‌باشد [۴]. از این رو ویژگی‌های نوری چنین ساختارهایی تا حد زیادی به ویژگی‌های نوری لایه‌های تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد [۵]. یکی از روش‌های قدرتمند در بررسی چنین حالت‌هایی روش ماتریس انتقال است [۶،۷]. در این روش، مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در نواحی مختلف بلور نوری از طریق خصوصیات لایه‌ی دی‌الکتریک مورد بررسی، (مانند ضرایب

متناوب تکرار می‌شود، رابطه زیر برای ماتریس انتقال کل ساختار استفاده می‌شود:

$$(3)$$

که  $A_0$  مربوط به خلا یا به اصطلاح لایه اول است و  $N$  تعداد تکرار جفت‌لایه و  $S$  لایه آخر در بلور که همان زیرلایه است. بنابراین در نهایت بدست می‌آید:

$$(4)$$

که با توجه به شکل ۱ مقادیر  $a$  و  $b$  دامنه‌های موج‌های فرودی و بازتابی از لایه اول،  $c$  و  $d$  دامنه‌های موج‌های عبوری و بازتابی از لایه آخر هستند. با ادامه محاسبات ضرایب عبور و بازتاب و به دنبال آن مقادیر عبور و بازتاب به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$(5)$$

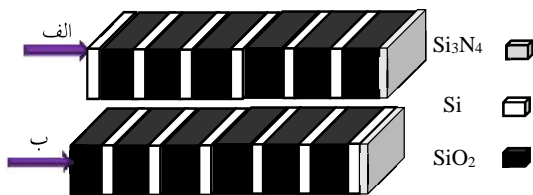
$$(6)$$

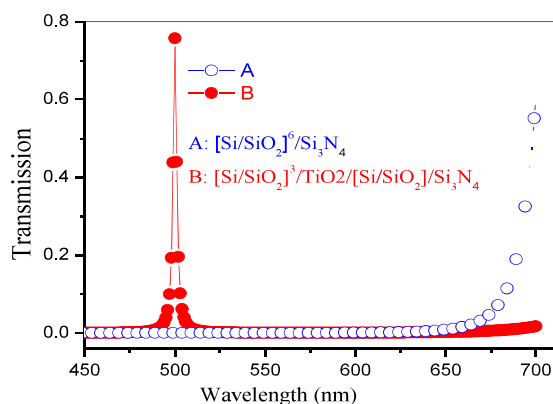
$$(7)$$

### محاسبات

در این مقاله بلور نوری به صورتی طراحی شده که ماده  $(Si_3N_4)$  در آن به عنوان زیرلایه استفاده شده است. سیلیکون (Si) به عنوان ماده با ضریب شکست بالا و دی‌اکسید سیلیکون ( $SiO_2$ ) به عنوان ماده با ضریب شکست پایین و لایه نقص ( $TiO_2$ ) انتخاب شدند. طول‌موج کاری ( $\lambda_w$ ) که برای ضخامت اولیه به آن نیاز داریم مقدار  $500$  نانومتر در محدوده میانه نور مرئی انتخاب شده است. در محاسبات برای رسم نمودار مقدار عبور از بلور، طول‌موج  $350$  تا  $850$  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 این ضریب شکست از منابع علمی [۸،۹] استخراج شده است. عدد موج در محاسبات به صورت  $k_i = 2\pi n/\lambda$  در نظر گرفته شده است،  $\lambda$  طول‌موجی است که بلور را جاروب می‌کند. در گام

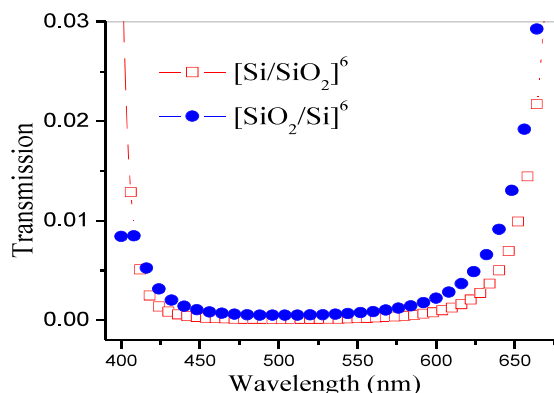
نخست ضخامت تمام لایه‌ها به صورت  $L = \lambda_w/(4n)$  تعریف شده‌اند که در آن مبداء همان طول‌موج کاری و  $500$  نانومتر نیز  $A_0 = A_1^{-1} [A_2 D_2 A_2^{-1} A_3 D_3 A_3^{-1}]^N A_5$  ضریب شکست لایه‌های  $Si$  و  $TiO_2$  که در این بازه طول‌موجی، قسمت موهومی نیز دارند تنها قسمت حقیقی ضریب شکست آورده شده است. بدین ترتیب ضخامت لایه سیلیکون نیتريد  $62/5$  نانومتر، دی‌اکسید سیلیکون  $(\frac{a}{b}) = \frac{M_{11} M_{22} - M_{12} M_{21}}{M_{22}}$  کون  $36/5$  نانومتر و لایه تیتانیوم دی‌اکسید  $44/7$  نانومتر در نظر گرفته شده است. ابتدا شش جفت‌لایه سیلیکون و دی‌اکسید سیلیکون بر روی زیرلایه سیلیکون نیتريد طراحی می‌شود و با نماد  $Si_3N_4/SiO_2$  [۶] نشان داده می‌شود که لایه‌های داخل براکت به ترتیب لایه‌های موجود در ساختار را نشان می‌دهد و عدد بیرون از براکت  $\frac{M_{21}}{M_{11}}$  نشانه تکرار جفت‌لایه‌ها است. در گام اول برای یافتن  $\frac{M_{21}}{M_{11}}$  به این نحوه چیده شدن جفت لایه‌ها  $T = \frac{n_0 \cos \theta_s}{n_s \cos \theta_s} |t|^2 = \frac{n_0 \cos \theta_0}{n_s \cos \theta_s} |M_{11}^{-1}|^2$  جفت لایه‌ها  $[SiO_2/Si]_6$  و  $[Si/SiO_2]_6$  با یکدیگر مقایسه شدند که طرحواره آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. طیف عبور دو ساختار در شکل ۳ نمایش داده شده است.



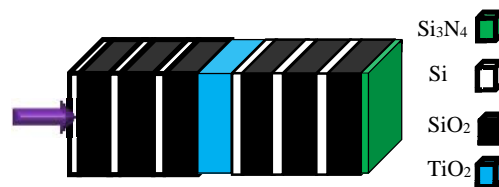


شکل ۵: طیف‌های عبوری ساختارهای بدون نقص:  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  و با نقص  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$ . مشاهده می‌شود در قسمتی که عبور صفر بوده است با ایجاد نقص به دلیل ایجاد بی‌نظمی، امکان عبور بوجود می‌آید. در این حالت در طول موج ۵۰۰ نانومتر تا حدود ۷۵ درصد عبور ممکن است و شکافی برای عبور طول‌موج‌های حوالی ۵۰۰ نانومتر در داخل نوار ممنوعه ایجاد شده است. برای اطمینان از انتخاب بهترین چیدمان مجدداً در شرایطی که لایه نقص وجود دارد ترتیب لایه‌ها جابجا می‌شود، با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با جابجایی لایه‌ها مقدار عبور از شکاف به ۶۸ درصد کاهش می‌یابد، در نتیجه از بهینه بودن ترتیب لایه‌ها اطمینان حاصل شد. در این شکل برای نمایش بهتر، بازه قبل از ۴۷۰ و ۵۳۰ نانومتر که عبور صفر داشتند نمایش داده نشده است.

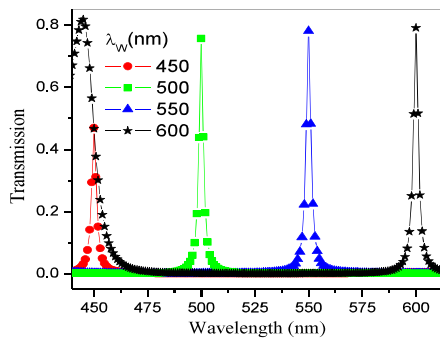
شکل ۲: الف) بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  ب) بلور نوری  $[\text{SiO}_2/\text{Si}]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$



شکل ۳: طیف ساختارهای  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  و  $[\text{SiO}_2/\text{Si}]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  مشاهده می‌شود که طیف هر دو ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  و  $[\text{SiO}_2/\text{Si}]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  بسیار نزدیک به یکدیگر است که با توجه به شکل ۲ می‌توان علت آن را اینگونه بیان کرد که دو ساختار به علت تناوبی بودن فقط در لایه اول و آخر متفاوت هستند بنابراین انتظار می‌رفت که طیف عبوری آن‌ها نیز مشابه یکدیگر باشد. بنابراین جفت لایه  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]$  به طور دلخواه برای ادامه کار انتخاب می‌شود. در گام دوم سه جفت لایه  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]$  در نظر گرفته می‌شود و سپس یک لایه  $\text{TiO}_2$  به عنوان نقص وارد می‌شود و در ادامه مجدداً سه جفت لایه  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]$  قرار می‌گیرند، طرحواره‌ای از ساختار در شکل ۴ مشاهده می‌شود. متذکر می‌شویم که  $\text{Si}_3\text{N}_4$  همچنان نقش زیرلایه را بازی می‌کند.

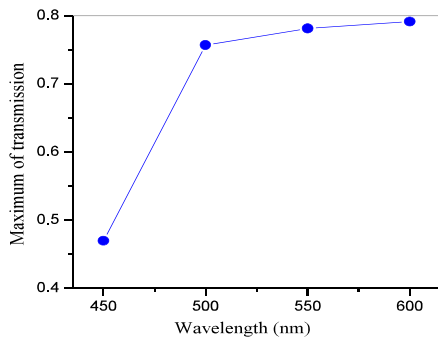


شکل ۴: طرحواره‌ای از بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در شکل ۵ طیف عبور برای حالتی که بلور فقط از شش جفت لایه  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  تشکیل شده است با حالتی که یک لایه  $\text{TiO}_2$  به عنوان نقص اضافه شده است، مقایسه شده است.

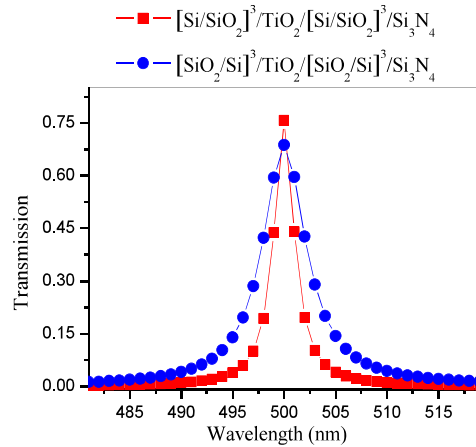


شکل ۷: طیف عبور بلور نوری  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در طول موج‌های کاری ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ نانومتر.

تغییر طول موج کاری علاوه بر جابجایی مکان بیشینه عبوری، شدت نور عبوری را نیز تغییر می‌دهد، به منظور کنترل میزان شدت نور عبوری رابطه ارتفاع قله و طول موج در نمودار شکل ۸ بررسی شد. همانگونه که مشاهده می‌شود در این حالت با افزایش طول موج کاری منتخب مقدار نور عبوری به صورت نمایی افزایش می‌یابد.



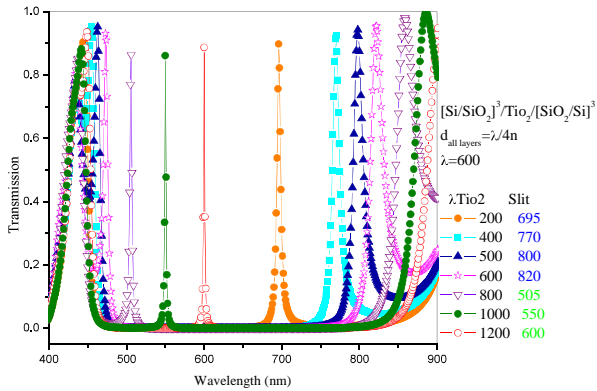
شکل ۸: بیشینه عبور (ارتفاع قله‌ها) بر حسب طول موج کاری برای ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  در محاسبات به این نتیجه رسیدیم که برای جابجایی محل شکاف می‌توان فقط ضخامت لایه نقص را تغییر داد که بدیهی است که اگر بتوان آن را مهندسی کرد از نظر صرفه جویی در وقت و هزینه بسیار کارآمد خواهد بود بدین منظور با تغییر ضخامت لایه نقص با استفاده از رابطه  $L = \lambda_w/4n$  و بکارگیری طول موج‌های کاری ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰، ۷۵۰ و ۸۵۰ نانومتر در ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  مقدار عبور محاسبه و در شکل ۹ نمایش داده شده است. برای بقیه



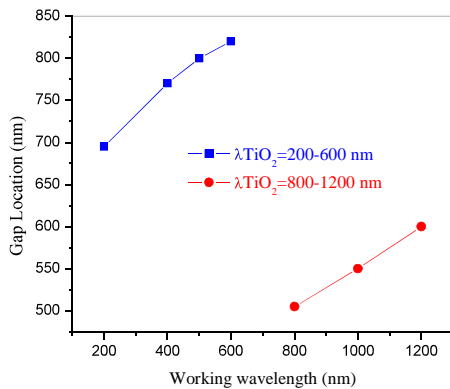
شکل ۹: طیف‌های عبوری ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  و ساختار  $[\text{SiO}_2/\text{Si}]^3/\text{TiO}_2/[\text{SiO}_2/\text{Si}]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$

از آنجا که در برخی کاربردها نیاز است تا بتوان شکاف عبوری را به سمت طول موج‌های بیشتر یا کمتر جابجا کرد در این مرحله به آن پرداخته شده است. نتایج محاسبات اولیه نشان داد که می‌توان با تغییر طول موج کاری مکان قله را تغییر داد. این کار زمانی مفید خواهد بود که هدف طراحی فیلتر نوری باشد که در یک طول موج مشخص شکافی برای عبور داشته باشد. شکل ۷ طیف را برای ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{TiO}_2/[\text{Si}/\text{SiO}_2]^3/\text{Si}_3\text{N}_4$  با طول موج‌های متفاوت کاری ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. با تغییر طول موج کاری ضخامت تمام لایه‌ها با توجه به رابطه  $L = \lambda_w/(4n)$  تغییر می‌کنند. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود محل شکاف عبوری دقیقاً در طول موج کاری منتخب قرار می‌گیرد و بیشینه عبوری تا حدی افزایش می‌یابد ولی محدوده طول موجی شکاف عبوری تغییر نمی‌کند.

تا ۸۰۰ نانومتر که مکان شکاف عبوری در این حالت بین ۶۹۵ تا ۸۲۰ نانومتر واقع می‌شود و دیگری برای طول موج کاری بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر که مکان شکاف عبوری در این حالت بین ۵۰۵ تا ۶۰۰ نانومتر قرار می‌گیرد، در نتیجه دو خط کالیبراسیون وجود دارد و ارتباط بین طول موج کاری و مکان شکاف در نمودار شکل ۱۱ و ۱۲ ترسیم شده است.

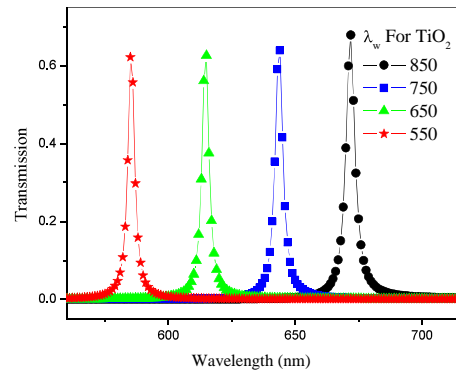


شکل ۱۱: طیف عبور بلور نوری  $[Si/SiO_2]^3/TiO_2/[SiO_2/Si]^3/Si_3N_4$  در ضخامت‌های مختلف.

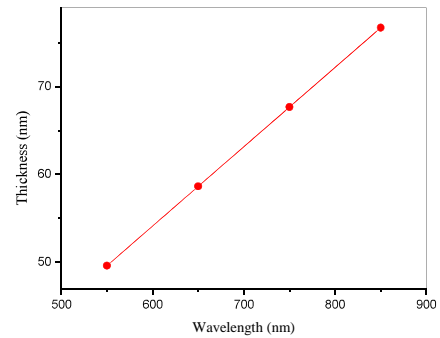


شکل ۱۲: رابطه بین طول موج کاری منتخب و مکان شکاف برای بلور نوری  $[Si/SiO_2]^3/TiO_2/[SiO_2/Si]^3/Si_3N_4$  برای طول موج ۲۰۰ تا ۶۰۰ و ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر در قسمت بالای شکل ۱۲ مشاهده می‌شود رابطه بین طول موج کاری منتخب و مکان شکاف از  $y = y_0 + Ae^{-x/t}$  بدست می‌آید، که در آن  $y_0=913/86$ ،  $A=335/66$ ،  $t=67/27$  است.

لایه‌ها طول موج کاری ۶۰۰ نانومتر به نمایش درآمد. علت انتخاب طول موج ۶۰۰ نانومتر این است که در این طول موج هر دو شکاف عبوری وجود دارند و امکان مشاهده جابجایی بیشینه عبوری متناسب با تغییر ضخامت به صورت واضح‌تر ممکن است. حال شکاف ایجاد شده دیگر در همان طول موج کاری منتخب برای لایه نقص نیست و طبق شکل ۱۰ از رابطه  $Y = A + BX$  تبعیت می‌کند که در آن  $A=-0/1$  و  $B=0/9$  است.



شکل ۹: طیف عبور  $[Si/SiO_2]^3/TiO_2/[Si/SiO_2]^3/Si_3N_4$



شکل ۱۰: رابطه بین ضخامت لایه نقص و مکان شکاف دوم برای بلور نوری  $[Si/SiO_2]^3/TiO_2/[Si/SiO_2]^3/Si_3N_4$

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که اگر طول موج کاری منتخب برای تمام لایه‌ها بجز لایه نقص ۶۰۰ نانومتر و طول موج تعیین کننده ضخامت لایه نقص متغیر در نظر گرفته شود، در این حالت محل قرار گرفتن شکاف عبوری را به دو ناحیه می‌توان تقسیم کرد، یکی برای طول موج کاری بین ۲۰۰

- [1] K. Tsuruda, M. Fujita, T. Nagatsuma, "Extremely low-loss terahertz waveguide based on silicon photonic-crystal slab", *Optical Society of America*, **23**, 77-90 (2015)
- [2] A. Bruyant G. Lerondel P. J. Reece and M. Gal, "All-silicon omnidirectional mirrors based on one-dimensional photonic crystals", *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3227 (2003).
- [3] S. Arafa, M. Bouchemat, T. Bouchemat, A. Benmerkhi, "Design of Optical Filter Based on Photonic Crystal Squared Silicon Nitride Microcavity", *Nanoscience and Nanotechnology*, **6**, 97-104 (2016).
- [4] 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)
- [5] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, "Photonic crystals: Molding the Flow of Light", *Princeton University Press* (1995).
- [6] J. D. Jackson, "classical electrodynamics", John Wiley & Sons, *New York* (1962).
- [7] 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).
- [8] <http://refractiveindex.info>
- [9] <http://www.filmetrics.com>

در قسمت پایین شکل ۱۳ شکاف از  $Y = A + BX$  تبعیت می‌کند که در آن  $B = 0.24$  و  $A = 314/17$  است، با استفاده از این معادلات می‌توان در هر طول‌موج دلخواه شکاف را قرار داد. به عنوان مثال اگر سازندگان بخواهند شکافی در ۵۲۵ نانومتر داشته باشند با توجه به شکل ۱۱ باید از تابع شکل ۱۲ که متعلق به رنگ سبز است استفاده کنند که در این صورت طول‌موج کاری مناسب برای ساخت ضخامت لایه نقص باید ۸۷۹ نانومتر انتخاب شود. با انتخاب این ساختار امکان ایجاد شکاف در تمام ناحیه مرئی وجود خواهد داشت، البته این امکان برای ساختاری که در آن چیدمان لایه‌ها در دو طرف لایه نقص یکسان باشد نیز وجود دارد اما در ساختار شکل ۱۱ مکان شکاف‌ها و نحوه جابجایی آن‌ها واضح‌تر است.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد با ایجاد نقص و برهم زدن تناوب موجود در بلور مسیر جدیدی برای عبور موج در نوار ممنوعه ایجاد می‌شود. با جابجایی لایه‌های ساختار  $[\text{Si}/\text{SiO}_2]^6/\text{Si}_3\text{N}_4$  هنگام اضافه کردن لایه نقص ارتفاع بیشینه عبوری کاهش می‌یابد. با کاهش طول‌موج کاری از مقدار اولیه ۵۰۰ نانومتر مکان و ارتفاع بیشینه عبوری تغییر می‌کند، در صورتی که ضخامت تمام لایه‌ها به صورت ربع موج در نظر گرفته شود مکان بیشینه با طول‌موج کاری رابطه مستقیم خواهد داشت. اما رابطه مستقیمی بین طول‌موج کاری و ارتفاع بیشینه وجود ندارد. با افزایش طول‌موج کاری علاوه بر تغییر در مکان و ارتفاع بیشینه عبوری یک گستره عبوری جدید برای عبور موج ایجاد می‌شود. با تغییر ضخامت لایه نقص بیشینه عبوری جابجا می‌شود و علاوه بر کاهش هزینه‌ها مکان شکاف را می‌توان مهندسی کرد. ساختاری که در آن چیدمان لایه‌ها در دو طرف لایه نقص یکسان نباشد شکاف در تمام ناحیه مرئی وجود دارد و می‌توان مکان شکاف را مدیریت کرد.

### منابع