



NCWNN1396

سومین همایش ملی و کارگاههای تخصصی

علوم و فناوری نانو



اثر نقص بر شدت میدان الکتریکی بلور نوری یک بعدی شامل جفت لایه‌های $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]$

سعیدی، فریده سادات؛ مرادی، مهرداد*؛ گلی، مریم

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان

m.moradi@kashanu.ac.ir

چکیده

در این مقاله با استفاده از شبیه سازی بلور نوری یک بعدی متشکل از جفت لایه‌های $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]$ اثر اضافه کردن نقص بر میزان شدت میدان الکتریکی در داخل بلور مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نظری بر پایه روش ماتریس‌های انتقال 2×2 و با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است. با ایجاد نقص به صورت تغییر در ضریب شکست و تغییر در ضخامت تلاش شد تا شدت میدان الکتریکی در بلور افزایش یابد. مشاهده شد با ایجاد نقص در نانوساختار می توان نور را به دام انداخت و در نتیجه شدت میدان الکتریکی در اطراف نقص بیشینه خواهد بود. نتایج نشان داد میزان افزایش شدت میدان الکتریکی در حالت نقص در ضخامت بیش از حالت نقص در ضریب شکست است.

کلمات کلیدی: بلور نوری یک بعدی، لایه نقص، شدت میدان الکتریکی، ضریب شکست

The effect of defect on electrical field intensity in a one-dimensional photonic crystal consisting $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]$ stacks

F. Saeedi, M. Moradi*, M. Goli

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

m.moradi@kashanu.ac.ir

Abstract

In this paper, the effect of adding a defect on the electric field intensity in a one-dimensional photonic crystal consisting $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]$ stacks, has been theoretically investigated. Theoretical calculations based on 2×2 transfer matrix method were carried out using MATLAB software. We try to increase the electric field intensity inside the photonic crystal with adding a defect as a variation in the refractive index and thickness. It has been observed that the presence of a defect in the nanostructure can trap a light and consequently amplify the electric field intensity around the defect. Results showed that defect in thickness in compare to the defect state in the refractive index is more effective and led to higher amplify the intensity of the electric field.

Keywords: One-dimensional photonic crystal, Defect layer, Electrical field intensity, Refractive index

علوم و فناوری نانو

مقدمه

آرایه متناوبی از دی‌الکتریک‌ها که در آن تناوب از مرتبه طول موج نور فرودی باشد بلور نوری نامیده می‌شود و اولین بار توسط John و Yablonovich مطرح شد [۱،۲]. با توجه به ابعاد تناوب، بلورهای نوری به سه دسته یک، دو و سه بعدی تقسیم می‌شوند. امروزه بلورهای نوری توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است [۳،۴]. مهمترین خاصیت این ساختارها وجود نوارهای ممنوعه‌ای است که مانع عبور نور در برخی طول‌موج‌ها می‌شوند و بدین ترتیب نقش مهمی را در کنترل و فیلترسازی امواج به‌عنده دارند. با ایجاد نقص در بلور نوری می‌توان تناوب موجود در ساختار را شکست و مسیری برای عبور نور در نوار ممنوعه ایجاد کرد. از این خاصیت برای ساخت ادواتی مانند موجبرها [۵] و فیلترها [۶] می‌توان استفاده کرد. دانستن رفتار شدت موج الکترومغناطیسی به‌منظور تفسیر رفتار یک بلور نوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌ویژه در ساختارهایی که یک نقص در بلور نوری وجود داشته باشد اطلاع از چگونگی شدت موج الکترومغناطیسی در اطراف نقص همواره مورد توجه بوده است، زیرا در اغلب ساختارها، لایه نقص خاصیتی متفاوت از دو لایه بلور نوری دارد و برای محققان بسیار ارزشمند است که مقدار شدت موج الکترومغناطیسی در این ناحیه را بدانند. در ساختار مورد بررسی در این مقاله ناحیه نقص باعث شدت یافتن میدان الکتریکی وارد شده به بلور شده است و در واقع نقص، نقش یک کاواک تشدید را ایفا می‌کند، بنابراین از این خاصیت می‌توان در ساخت کاواک‌های تشدید استفاده کرد. ساده‌ترین نوع بلور نوری، بلور نوری یک بعدی است که در آن از دو لایه با ضریب شکست متفاوت n_1 و n_2 استفاده شده است و لایه‌ها به نحوی چیده شده‌اند که تناوب در یک بعد برقرار باشد.

در این مقاله بلور نوری یک بعدی متشکل از دو جفت لایه اکسید سیلیسیم SiO₂ به‌عنوان ماده با ضریب شکست پایین و پنتاکسید دی‌نایوبیم Nb₂O₅ به‌عنوان ماده با ضریب شکست بالا تشکیل شده است. تعداد لایه‌ها ۸ عدد و به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که تداخل‌های سازنده و ویرانگری که در بلور اتفاق می‌افتد منجر به تقویت شدن میدان داخل بلور شود. در نهایت برای مشاهده اثر نقص بر شدت میدان الکتریکی داخل بلور از دو نوع نقص شامل نقص در ضریب شکست با وارد کردن لایه اکسید

هافنیم HfO₂ و نقص در ضخامت با تغییر در ضخامت یکی از لایه‌های Nb₂O₅ استفاده شد. بدین ترتیب اختلال در تناوب ضریب شکست موجود در بلور به طور کامل بررسی می‌شود و اثر هر دو نقص بر شدت میدان قابل تحلیل و بررسی است.

بخش نظری

در ابتدا ضرایب بازتاب برای کل بلور نوری باید محاسبه گردد که ماتریس انتقال مورد نظر برای این منظور به صورت معادله ۱ است [۷].

$$M = A_0^{-1} [A_1 D_1 A_1^{-1} A_2 D_2 A_2^{-1}]^N A_0 \quad (1)$$

که در آن N تعداد تکرار جفت لایه‌ها است، A ماتریس انتشار است و برای قطبش s و قطبش P به صورت دو ماتریس جداگانه زیر تعریف می‌شود:

$$A_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -k_i \cos q_i & k_i \cos q_i \end{pmatrix} & \text{for TE wave} \\ \begin{pmatrix} \cos q_i & -\cos q_i \\ k_i & k_i \end{pmatrix} & \text{for TM wave} \end{cases} \quad (2)$$

A₀ در ساختار مورد بررسی در این مقاله لایه هوا با ضریب شکست یک است. θ زاویه برخورد نور با بلور است و K_i عدد موج لایه i ام در بلور می‌باشد و به صورت $k = 2\pi n / \lambda$ تعریف می‌شود. D ماتریس انتقال بین لایه‌ها است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_i = \begin{bmatrix} e^{-ik_i L_i} & 0 \\ 0 & e^{+ik_i L_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن L_i ضخامت لایه i ام است. اکنون با استفاده از این ماتریس، ضرایب بازتاب و عبور به صورت معادلات ۴ و ۵ بدست می‌آیند.

$$r = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (4)$$

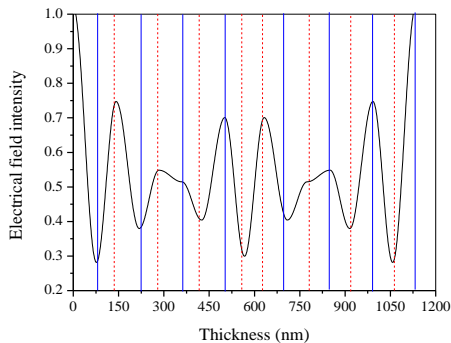
$$t = \frac{1}{M_{11}} \quad (5)$$

برای محاسبه توزیع میدان در داخل ساختار باید میدان‌های جلو رونده (میدان‌های فرودی E⁺) و عقب رونده (میدان‌های بازتابی E⁻) در هر نقطه محاسبه شوند که هر یک از میدان‌ها E⁺ و

علوم و فناوری نانو

نتایج شبیه‌سازی

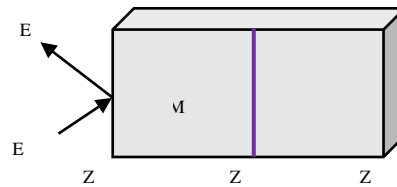
با استفاده از روابطی که ذکر شد، می‌توان شدت موج الکترومغناطیسی را در هر نقطه از بلور نوری محاسبه کرد. در شکل ۲ توزیع شدت برای ساختاری که از دو ماده SiO₂ با ضریب شکست ۱/۹۶ و Nb₂O₅ با ضریب شکست ۲/۳ تشکیل شده است، در طول موج کاری ۶۰۰ نانومتر محاسبه می‌شود. ضخامت هر دو ماده به صورت ربع موج در نظر گرفته شده، در نتیجه ضخامت یک لایه SiO₂ ۷۶/۵۳ نانومتر و ضخامت یک لایه Nb₂O₅ ۶۵/۲۱۰ نانومتر است. زاویه تابش به بلور نیز عمود است. لایه‌ها به صورت چهار جفت‌لایه متوالی [SiO₂/Nb₂O₅] و سپس چهار جفت‌لایه [Nb₂O₅/SiO₂] چیده شده است تا منجر به بی‌نظمی در تناوب ساختار شود. خطوط خط‌چین در نمودار نشان دهنده ضخامت لایه Nb₂O₅ و خطوط صاف مربوط به ضخامت SiO₂ است. مشاهده می‌شود که با ورود نور به داخل بلور از شدت آن کاسته شد تا نهایتاً در انتهای لایه اول شدت میدان به کمینه مقدار خود می‌رسد، با عبور از لایه اول شدت میدان بیشتر می‌شود تا آنجا که در انتهای لایه دوم و در ضخامت ۱۴۳ نانومتر که مجموع ضخامت دو جفت لایه است شدت میدان به بیشینه مقدار خود در داخل بلور که برابر با ۰/۷۴ است، می‌رسد.



شکل ۲: توزیع شدت میدان در بلور نوری [Nb₂O₅/SiO₂]^۴ [SiO₂/Nb₂O₅]^۴.

با عبور از لایه دوم شدت میدان کم می‌شود و با عبور از لایه اول و ورود به لایه دوم مجدداً شدت میدان بیشتر می‌شود، شدت میدان نسبت به ضخامت ۵۵۸ نانومتر که مکان جابه‌جایی لایه‌ها است از تقارن برخوردار است. در شکل ۳ با استفاده از HfO₂ با ضریب شکست ۲/۱۱ به عنوان نقص در ساختار به بررسی شدت میدان پرداخته شده است، در این شکل شرایط بلور همانند قبل

E- از دو مولفه Es و Ep تشکیل شده‌اند. برای محاسبه این میدان‌ها ابتدا باید ماتریس MF مناسب برای هر نقطه نوشته شود تا بتوان شدت میدان در آن نقطه را محاسبه کرد. برای این منظور با توجه به شکل ۱ ماتریس MF برای هر نقطه از ساختار نوشته می‌شود.



شکل ۱: طرحواره‌ای از ساختار بلور نوری.

$$M_F = A_i^{-1} \prod_m A_m D_m A_m^{-1} (A_F D_F A_F^{-1}) \quad (6)$$

که در آن‌ها ماتریس‌های A و D به ترتیب ماتریس‌های انتشار و انتقال برای لایه‌های مختلف تا محل نقطه مورد نظر است. باید توجه داشت که در نوشتن ماتریس A و D نکته مهم این است که نقطه مورد نظر در کدام لایه قرار دارد و چه مقدار از ضخامت لایه به آن تعلق می‌گیرد، همچنین ماتریس A برای چه نوع قطبشی نوشته می‌شود. پس از محاسبه ماتریس MF با استفاده از رابطه ۶ و با محاسبه ضریب بازتاب با استفاده از رابطه ۴ به شرط آنکه ماتریس A در رابطه ۲ در مد TE نوشته شده باشد از روابط ۷ و ۸ در صورت استفاده از مد TM از روابط ۹ و ۱۰، برای محاسبه میدان استفاده می‌شود و با مجذور کردن روابط ۸ و ۱۰ شدت میدان بدست می‌آید. با جا‌روپ کردن نقطه F می‌توان شدت میدان در کل ساختار را محاسبه کرد.

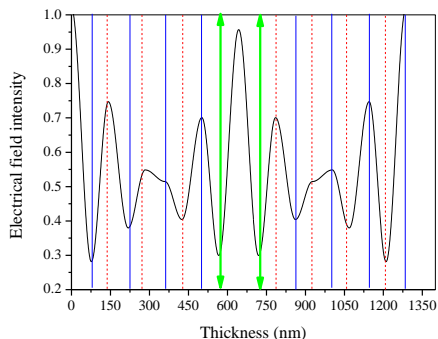
$$\begin{bmatrix} 1 \\ r_{ss} \end{bmatrix} = \vec{M}_F \begin{bmatrix} E_s^+ \\ E_s^- \end{bmatrix}_{z=F} \quad (7)$$

$$E_s = E_s^+ + E_s^- \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r_{pp} \end{bmatrix} = \vec{M}_F \begin{bmatrix} E_p^+ \\ E_p^- \end{bmatrix}_{z=F} \quad (9)$$

$$E_p = E_p^+ + E_p^- \quad (10)$$

علوم و فناوری نانو



شکل ۴: توزیع شدت میدان در بلور نوری $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]^4 \text{Nb}_2\text{O}_5 [\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}]^4$

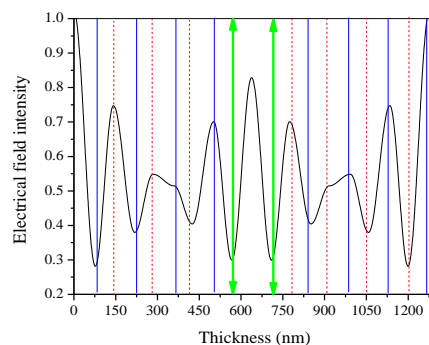
جمع‌بندی

نتایج نشان داد با ورود نور به داخل بلور و عبور آن از لایه‌های مختلف ساختار شدت میدان دچار افت و خیز می‌شود و همواره این افت و خیزها حول محل جابه‌جایی لایه‌ها از تقارن برخوردار هستند. در صورت وارد کردن نقص در داخل بلور، در نواحی اطراف نقص میزان شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. در صورتی که نقص در ضخامت ایجاد شود میزان افزایش شدت میدان بیشتر از حالت نقص در ضریب شکست خواهد بود.

مرجع‌ها

- [1] E. Yablonovich, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2059-2062.
- [2] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices", *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2486-24879.
- [3] Z. Hayran, H. Kurt, K. Staliunas, "Rainbow trapping in a chirped three-dimensional photonic crystal", *Sci. Rep.* **7**, (2017) Article number: 3046.
- [4] A. Prasmusinto, M. Sotto, A. Al-Attili, K. Debnath, S. Saito, "Theoretical designs for novel photonic crystal nanocavities with Si (111) interfaces", *Phot. Nano. Fund. Appl.* **26** (2017) 1-7.
- [5] K. Debnath, T. Dominguez Bucio, A. Al-Attili, A. Z. Khokhar, S. Saito, F. Y. Gardes, "Photonic crystal waveguides on silicon rich nitride platform", *Optics Express*, **25** (2017) 3214-3221.
- [6] R. Sathyadevaki, A. Sivanantha Raja, D. Shanmugasundar, "Photonic crystal-based optical filter: a brief investigation", *Photonic Netw. Commun.* **33** (2017) 77-84.
- [7] E. X. Perez, "Design, fabrication and characterization of porous silicon multilayer optical devices", *Universitat Rovira i Virgili* (2007).

است و تنها در این ساختار بعد از اتمام چهار جفت‌لایه $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]$ از لایه نقص با ضخامت نصف طول‌موج $(142/18)$ نانومتر استفاده شده است (در نمودار به صورت پیکان مشخص شده است) و بعد از آن جفت‌لایه $[\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}]$ قرار می‌گیرد. در این حالت شدت میدان در نقص به بیشینه مقدار خود یعنی $0/82$ در ضخامت 640 نانومتر می‌رسد و نمودار نسبت به این ضخامت متقارن است. در نتیجه با وارد کردن لایه نقص در بلور می‌توان پرتو را در نقص به دام انداخت و باعث افزایش برهمکنش پرتو با ماده مورد نظر شد که در مواردی که این لایه مغناطیسی باشد تقویت اثرات مگنتوپتیکی را به دنبال خواهد داشت. در این حالت دو ساختار قبل و بعد لایه نقص به عنوان کاواک تشدید نوری عمل کرده‌اند.



شکل ۳: توزیع شدت میدان در بلور نوری $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]^4 \text{HfO}_2 [\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}]^4$

برای بررسی اثر نقص ضخامت در بلور، پس از قرارگیری چهار جفت لایه $[\text{SiO}/\text{Nb}_2\text{O}_5]$ یک لایه Nb_2O_5 با ضخامت نصف طول‌موج قرار داده می‌شود و سپس چهار جفت‌لایه $[\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}]$ طراحی می‌شود نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت شدت میدان در نقص به $0/95$ در ضخامت 635 نانومتر می‌رسد و تقریباً تمام نور فرودی در نقص متمرکز می‌شود در نتیجه عملکرد نقص به عنوان یک محل برای متمرکز کردن شدت نور استفاده شده است.