



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بررسی اثر پاشندگی ضریب شکست بر مدهای نقص ناحیه مرئی در بلور فوتونی یک بعدی دی اکسید تیتانیوم نانومتخلخل

محمد رضا حاتمی^۱، رویا رجبی^۲ و جمیله سید یزدی^۲

^۱ گروه فیزیک دانشگاه علوم و تحقیقات فارس

^۲ گروه فیزیک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

چکیده - در این مقاله با در نظر گرفتن اثر پاشندگی ضریب شکست و به کمک روش ماتریس انتقال، بعد از بهینه سازی بازه ضریب شکست و ضخامت لایه های بلور فوتونی به منظور قرار گرفتن نوار ممنوعه فوتونی در ناحیه مرئی، با افزودن یک لایه نقص و تشکیل بلور فوتونی با ساختار هندسی متقارن، گاف ممنوعه فوتونی و مدهای نقص مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که در نظر گرفتن اثر پاشندگی لایه های بلور فوتونی نه تنها باعث کاهش گاف ممنوعه می شود بلکه شدت و مکان مدهای نقص را هم کاهش می دهد. بنابراین اعمال اثر پاشندگی در مسائل کاربردی حائز اهمیت است.
کلید واژه - بلور فوتونی، پاشندگی، لایه نقص، روش ماتریس انتقال.

Investigation of Defect Modes in One-Dimensional Photonic Crystal of Nano-Porous TiO_2 in Visible Light Region Considering Refractive Index Dispersion

Mohammad Reza Hatami¹, Roya Rajabi², Jamileh Seyedyazdi²

¹Department of Physics, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Fars, Iran.

²Department of Physics, Faculty of Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.

Abstract- In this study considering refractive index dispersion and transfer matrix method, after optimization of the refractive index and thickness of the layers in a 1D photonic crystal in order to have a photonic band gap in the visible light region, we add a defect layer and made a photonic crystal with a symmetric structure and studied band gap and defect modes. The results show that considering refractive index dispersion for layers not only decrease the band gap, but also decrease the location and intensity of defect modes in the band gap. These findings are very important to consider in related applications.

Keywords: Photonic Crystal, Dispersion Relation, Defect Layer, Transfer Matrix Method

۱- مقدمه

$$M(\Lambda) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^2 \begin{pmatrix} \cos \beta_j & \frac{1}{ip_j} \sin \beta_j \\ -ip_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{pmatrix} \quad (1)$$

در رابطه بالا $\beta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j$ و $p_j = n_j \cos \theta_j$ و $j = 1, 2$ است. $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ عدد موج فضای آزاد است و θ_j زاویه پرتو متناظر با قانون شکست اسنل در هر لایه است. بنابراین ماتریس مشخصه کل برای یک بلور فوتونی با لایه‌های متناوب A و B و تعداد تناوب N، $\text{Air}/(\text{AB})^N/\text{Air}$ ، به صورت زیر است.

$$M_T(\Lambda N) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = M(\Lambda)^N = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}^N \quad (2)$$

ضریب بازتاب با استفاده از عناصر ماتریس مشخصه کل برابر است با:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_0) p_0 - (m_{21} - m_{22} p_0)}{(m_{11} + m_{12} p_0) p_0 + (m_{21} + m_{22} p_0)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $p_0 = n_0 \cos \theta_0$ است. بازتاب از رابطه $R = |r|^2$ به دست می‌آید. برای موج TM این محاسبات با جایگزینی ساده $p_j = \cos \theta_j / n_j$ به دست می‌آید. با فرض عدم جاذب بودن محیط، ضریب عبور از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T = 1 - R \quad (4)$$

با اعمال یک لایه نقص، D، ساختار به صورت $\text{Air}/(\text{AB})^N \text{D} (\text{BA})^N / \text{Air}$ است (شکل ۱). ماتریس مشخصه سلول‌های چپ و راست برای حالت متقارن و با تعداد N تناوب به صورت زیر است.

$$M_{\text{cellL}} = (M_2 M_1)^N \quad (5)$$

$$M_{\text{cellR}} = (M_1 M_2)^N \quad (6)$$

و ماتریس مشخصه لایه نقص برابر است با:

$$M_{\text{def}} = \begin{pmatrix} \cos \beta_{\text{def}} & \frac{1}{ip_{\text{def}}} \sin \beta_{\text{def}} \\ -ip_{\text{def}} \sin \beta_{\text{def}} & \cos \beta_{\text{def}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

بلورهای فوتونی دارای گستره وسیعی از کاربردهای عملی می‌باشند که می‌توانند باعث تحول عظیمی در کارهای تحقیقاتی و صنعتی شوند [۱]. این بلورها در برابر امواج الکترومغناطیسی رفتاری مشابه رفتار الکترون‌ها در بلورهای نیمه‌رسانا از خود نشان می‌دهند. از آنجایی که برای محیط‌هایی که سرعت موج در آن‌ها با طول موج تغییر می‌کند، خاصیت پاشندگی داریم، بسته به نوع ماده‌ای که به عنوان بلور فوتونی استفاده می‌شود، باید این خاصیت در نظر گرفته شود. رابطه ضریب شکست محیط و ثابت دی‌الکتریک و عدد موج به رابطه پاشندگی معروف است. اگر عدد موج را k ، سرعت زاویه‌ای موج را ω و ضریب شکست را با n نشان دهیم، رابطه پاشندگی بصورت $n = n(\omega, k)$ است. با در نظر گرفتن پاشندگی و انتخاب ساختار بلوری و ضرایب دی‌الکتریک مناسب می‌توان به نوار ممنوعه فوتونی، دست پیدا کرد [۲]. با افزودن یک لایه نقص در ساختار بلور فوتونی، در نوار ممنوعه فوتونی مدهایی ظاهر می‌شوند که به آن‌ها مُد نقص یا مُد تشدید گفته می‌شود [۳]. با توجه به این خاصیت بلورهای فوتونی می‌توان از آن‌ها به عنوان تشدیدگر یا کلید نوری استفاده کرد.

در این مقاله با در نظر گرفتن پاشندگی ضریب شکست دی اکسید تیتانیوم نانومتخلخل و انتخاب پارامترهای ساختاری مناسب، نوارممنوعه فوتونی را در ناحیه نور مرئی ایجاد کرده و سپس با ایجاد لایه نقص و تغییر در زاویه پرتو تابش، گاف ممنوعه فوتونی و همچنین رفتار و تعداد مدهای نقص را مورد بررسی قرار داده و نتایج با مورد مربوط به عدم در نظر گرفتن پاشندگی مقایسه شده است.

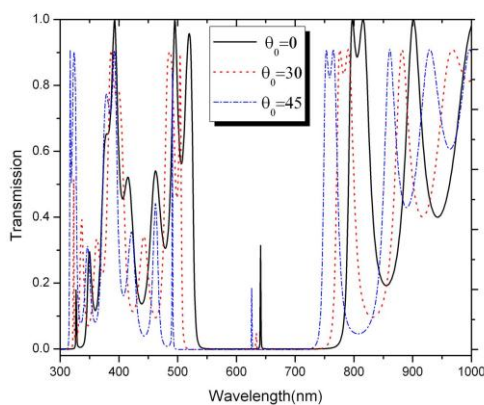
۲- تئوری

در این مقاله روش ماتریس انتقال برای بررسی عبور موج الکترومغناطیسی به کار برده شده است [۴]. در یک موج الکترومغناطیسی که با زاویه θ_0 فرود می‌آید، ماتریس مشخصه به قطبش موج فرودی وابسته است. طبق روش ماتریس انتقال ابتدا باید ماتریس مشخصه $M(\Lambda)$ مربوط به یک تناوب مشخص شود. برای موج TE ماتریس انتقال از یک سلول به صورت زیر است.

نقص با ضریب شکست $n_{def} = 4/2$ و ضخامت $d_{def} = 200 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است.

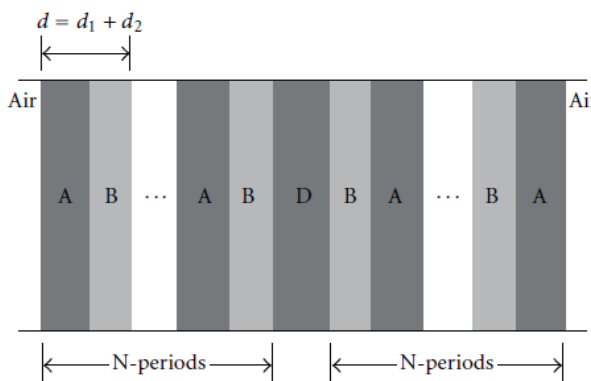
۴- تحلیل نتایج

در ابتدا طیف عبوری بر حسب طول موج برای بلور فوتونی متقارن در قطبش TE به ازای زوایای 0° ، 30° و 45° درجه با و بدون در نظر گرفتن اثر پاشندگی ضریب شکست لایه‌ها رسم شده است (شکل‌های ۲ و ۳). هر دو نمودار نشان می‌دهند که با افزایش زاویه تابش مُد نقص به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر جابجا می‌شود. ولی مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثر پاشندگی، گاف ممنوعه فوتونی کاهش یافته است. همچنین شدت مُد نقص مربوط به تابش عمود نسبت به حالت بدون پاشنده کاهش یافته ولی مکان آن تغییر نکرده است. در مورد تابش‌های مربوط به زوایای 30° و 45° درجه، شدت مُدهای نقص مربوطه با در نظر گرفتن اثر پاشندگی کاهش می‌یابد و مکان آنها به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابجا می‌شود.



شکل ۲: طیف عبوری ساختار بلور فوتونی یک بعدی متقارن دی‌اکسیدتیتانیوم نانومتخلخل با یک لایه نقص به ازای زوایای 0° و 30° و 45° درجه با در نظر گرفتن اثر پاشندگی ضریب شکست لایه‌ها.

شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات مُد نقص به ترتیب به ازای ضریب شکست‌های $1/6$ ، $1/9$ و $2/1$ با و بدون در نظر گرفتن پاشندگی در بلور فوتونی متقارن با زاویه تابش فرودی صفر درجه را نشان می‌دهند.



شکل ۱: ساختار بلور فوتونی یک بعدی متقارن با یک لایه نقص.

در رابطه (۷)، $\beta_{def} = k_0 n_{def} \cos \theta_{def}$ و $p_{def} = n_{def} \cos \theta_{def}$ بوده، بنابراین ماتریس مشخصه کل سیستم است با:

$$M_{total} = M_{cellR} \cdot M_{def} \cdot M_{cellL} \quad (8)$$

۳- مشخصات ساختار

ساختار بررسی شده در این تحقیق یک بلور فوتونی یک بعدی است که در راستای محور z متناوب و در راستای محورهای x و y همسانگرد می‌باشد. جنس لایه‌های بلور فوتونی، دی‌اکسید تیتانیوم نانومتخلخل در نظر گرفته شده است. تناوب لایه‌ها $N=5$ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه اثر پاشندگی ضریب شکست لایه‌ها بر حسب طول موج در نظر گرفته شده است. در ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود در این زمینه [۶-۵]، رابطه مناسبی مربوط به تغییرات ضریب شکست دی‌اکسید تیتانیوم نانومتخلخل با در نظر گرفتن میزان تخلخل بر حسب طول موج به دست آمده است.

$$n = \sqrt{(1 - (0.9e^{\frac{-\lambda}{299.3}} + 2.1)^2)(p - 1)} \quad (9)$$

لایه‌های متناوب A و B با درصد‌های تخلخل ۲۰ و ۸۷ در نظر گرفته شده‌اند. با تغییر ضخامت لایه‌ها و بررسی طیف عبوری موج TM و TE با تابش عمود برای ساختار بدون لایه نقص، ضخامت بهینه لایه‌ها بدست آمده است. طیف عبوری به ازای ضخامت $d_1 = d_2 = 90 \text{ nm}$ در بازه 558 nm تا 790 nm دارای میزان عبور صفر است و نوار ممنوعه فوتونی در محدوده نور مرئی قرار دارد. لایه

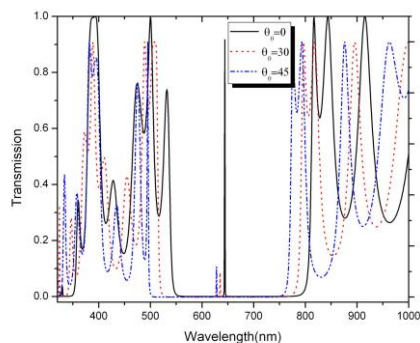
نقص کاهش می‌یابد و این کاهش ارتفاع در مورد مربوط به عدم در نظر گرفتن پاشندگی محسوس تر است.

۵- نتیجه‌گیری

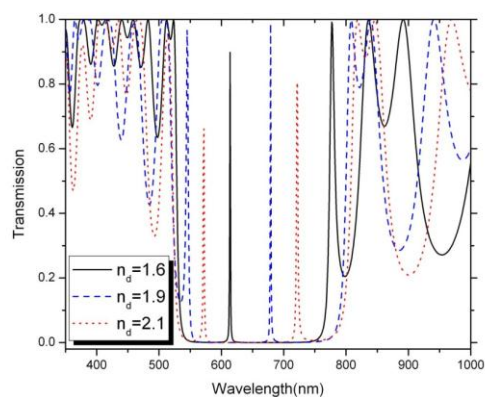
به دلیل اهمیت اعمال اثر پاشندگی ضریب شکست در بلورهای فوتونی در مسائل کاربردی، رابطه مربوط به تغییرات ضریب شکست دی‌اکسید تیتانیوم نانومتخلخل با در نظر گرفتن میزان تخلخل بر حسب طول موج به دست آمده است. با در نظر گرفتن اثر پاشندگی ضریب شکست و روش ماتریس انتقال، بعد از بهینه‌سازی بازه ضریب شکست و ضخامت لایه‌های بلور فوتونی به منظور قرار گرفتن نوار ممنوعه فوتونی در ناحیه مرئی، با افزودن یک لایه نقص و تشکیل بلور فوتونی با ساختار هندسی متقارن و نامتقارن، گاف ممنوعه فوتونی و مدهای نقص مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثر پاشندگی لایه‌های بلور فوتونی نه تنها باعث کاهش گاف ممنوعه می‌شود بلکه شدت و مکان مدهای نقص را هم کاهش می‌دهد.

مراجع

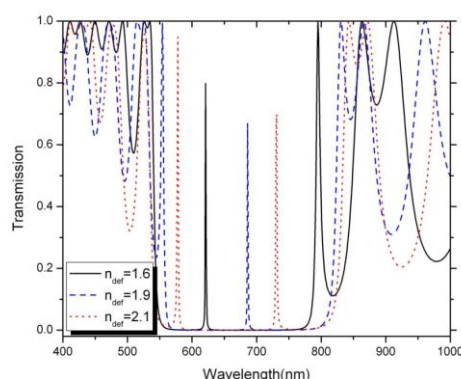
- [1] Sakoda K., "Optical Properties of Photonic Crystals", Springer-Verlag, 4-6 (2001).
- [2] Yablonovitch E., "Inhibited Spontaneous Emission in Solid State Physics and Electronics", **Phys. Rev. Lett.**, 58 (1987) 2059-2062.
- [3] Wu, C.-J., Chu B.-H., and Weng M.-T., "Analysis of optical reflection in a chirped distributed Bragg reflector," **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, 23, 1 (2009) 129-138.
- [4] Wang R. L., Zhang J., Hu Q. F., "Simulation of Band Gap Structures of 1D Photonic Crystal", **Journal of the Korean Physical Society**, 52 (2008) S71-S74.
- [5] Abdel-Aziz M. M., Yahia I. S., Wahab L. A., Fadel M., Afifi M. A., "Determination and analysis of dispersive optical constant of TiO_2 and Ti_2O_3 thin films" **Applied Surface Science** 252 (2006) 8163-8170.
- [6] Sreemany M., Sen S. "A simple spectrophotometric method for determination of the optical constants and band gap energy of multiple layer TiO_2 thin films", **Material Chemistry and Physics** 83 (2004) 169-177.



شکل ۳: طیف عبوری ساختار بلور فوتونی یک بعدی متقارن دی‌اکسید تیتانیوم نانومتخلخل با یک لایه نقص به ازا زوایای ۰ و ۳۰ و ۴۵ درجه بدون در نظر گرفتن اثر پاشندگی ضریب شکست لایه‌ها.



شکل ۴: طیف عبوری ساختار بلور فوتونی یک بعدی متقارن دی‌اکسید تیتانیوم نانومتخلخل با یک لایه نقص با ضخامت ۲۰۰ nm و ضریب شکست‌های ۱/۶، ۱/۹ و ۲/۱ با در نظر گرفتن پاشندگی.



شکل ۵: طیف عبوری ساختار بلور فوتونی یک بعدی متقارن دی‌اکسید تیتانیوم نانومتخلخل با یک لایه نقص با ضخامت ۲۰۰ nm و ضریب شکست‌های ۱/۶، ۱/۹ و ۲/۱ بدون در نظر گرفتن پاشندگی.

با افزایش ضریب شکست لایه نقص، مد نقص به سمت طول‌موج‌های بزرگ‌تر حرکت می‌کند و ارتفاع مدهای