بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تنظیم مد نقص در بلور فوتونی سه لایه با ولتاژ خارجی: طراحی فیلتر نوری کنترل پذیر

شیوا رشیدی[۱]، کاظم جمشیدی قلعه[۲] و علی واحدی[۱]

[۱] گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

[۲] گروه فیزیک دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

چکیده – در این مقاله، رفتار مد نقص در بلور فوتونی یک بعدی سه لایه‌ای $(MgF_2/Ag/TiO_2)^5LiNbO_3(TiO_2/Ag/MgF_2)^5$، تحت اعمال ولتاژ الکتریکی خارجی بررسی شده‌است. لایه نقص $LiNbO_3$، یک ماده الکترو- اپتیکی است که ضریب شکست آن وابسته به ولتاژ است. در مقایسه، منیزیم فلوراید و دی اکسید تیتانیم دارای ضرایب الکترو- اپتیکی خیلی پایینی هستند. بنابراین، با اعمال ولتاژ از لایه‌های نقره، ضریب شکست لایه نقص در راستای انتشار و به تبع آن راه نوری برای پرتو عبوری از ساختار تغییر کرده لذا محل مد نقص در داخل گاف باند فوتونی جابجا خواهد شد. این ساختار می‌تواند برای طراحی فیلتر تمام نوری کنترل‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه- بلور فوتونی، مد نقص، خواص الکترو- نوری، فیلتر تمام نوری کنترل پذیر

Tuning the Defect Mode in Ternary PC Structure with External Voltage: Designing Controllable Optical Filter

Shiva Rashidi[1], Kazem Jamshidi-Ghaleh [2], and Ali Vahedi[1]

[1] Department of Physics, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

[2] Department of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper, behavior of defect mode in ternary one-dimensional photonic crystal $(MgF_2/Ag/TiO_2)^5LiNbO_3(TiO_2/Ag/MgF_2)^5$ photonic crystal, under applied external electric voltage is investigated. The defect layer, $LiNbO_3$, is an electro-optical material which its refractive index is voltage dependent. In comparison, MgF_2 and TiO_2 have very low electro-optical coefficients. Therefore, by applying voltage from the Ag layers, the refractive index of the defect layer in direction of propagation and accordingly, the optical path length of the ray passing through the structure will be changed, so, the position of the defect mode will also shift. This structure can be employed to design a tunable all-optical filter.

Keywords: Photonic crystal, defect mode, electro-optical properties, tunable all-optical filter

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-28]

۱- مقدمه

در دو دهه گذشته انگیزه تازه‌ایی با هدف کنترل بشر بر خواص مواد و انتشار امواج الکترومغناطیسی، پدید آمده است. اگر بتوانیم مواد را طوری مهندسی کنیم که از آن نور منتشر نشود یا فقط در طول موج و یا جهت معینی منتشر شود یا در نواحی ویژه‌ایی جایگزیده گردد، در واقع به طراحی یک وسیله تمام نوری نائل شده‌ایم. هر وسیله اپتیکی که در ابزارهای ارتباطی امروزی استفاده می‌شود، دارای یک وسیله کنترل کننده نور است. این وسیله، می‌تواند درایو نوری موجود در لپ تاپ شما و یا کابلی که ارتباط تلفنی را از راه دور میسر می‌سازد، باشد. برای مثال هر سیستم ارتباطی نیازمند فیلترهایی است تا سیگنال مورد نظر را تصفیه کرده و پیغام‌های متفاوت را تفسیرکند. در صورت محقق شدن مدارهای مجتمع تمام نوری، فیلترهای تمام نوری عهده‌دار این مسئولیت خواهند بود. با پیدایش و اختراع لیزر و فیبر نوری، صنعت مخابرات به طور جدی متحول شد و مخابرات نوری بوجودآمد. با این حال، هنوز هم در مخابرات نوری از ابزارهای الکترونیکی استفاده می‌شود که سرعت انتقال و پردازش اطلاعات را پایین می‌آورد. یعنی در ضمن پیشرفتهای خوب و چشمگیری که در این زمینه صورت گرفته، هنوز هم دیودها و ترانزیستورهای الکترونیکی که براساس انتقال داده‌ها توسط الکترون کار می‌کنند، نقش اصلی را در پردازش اطلاعات بازی می‌کنند که این کار سرعت پردازش‌ها را در مقایسه با سرعت انتقال داده‌ها کاهش می‌دهد. حل این مشکل با تمام نوری کردن تمام ادوات به کار رفته در این مدارات ممکن است. به همین دلیل امروزه یکی از زمینه‌های پر رونق در علم مهندسی فوتونیک ساخت جایگزین‌های این ادوات الکترونیکی به صورت تمام نوری می‌باشد.

بلورهای فوتونی نانوساختارهایی هستند [۱، ۲] که برای طراحی آسان این نوع ادوات می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. این ساختارها مفهوم جدیدی در دانش مدرن می‌باشند که بین گرایش‌های مختلف همچون: نانواپتیک، میکروالکترونیک و فیزیک حالت جامد ارتباط برقرار کرده و کاربردهای فراوانی را در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت مخابرات، اپتوالکترونیک، ارتباطات و مدارهای مجتمع تمام نوری و... دارند [۳،۴]. در سایه توانایی منحصر به فرد نانوساختارهای بلورهای فوتونی در کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی، به ویژه بلورهای فوتونی یک بعدی به خاطر سهولت در ساخت، کاندیدای خوبی برای طراحی المان‌های پایه ابزارهای مجتمع تمام نوری هستند که مطالعات فراوانی صورت گرفته است [۵-۷].

ابزارهای تمام نوری که بتوان ویژگی آنها را با یک عامل خارجی کنترل کرد، چشم انداز کاربردهای فراوانی را در زمینه ارتباطات و پردازش اطلاعات تمام نوری تداعی می‌کنند. تلاشهای زیادی تحت عنوان کنترل پذیری با تغییر پارامترهای فیزیکی در ساختار بلور فوتونی از جمله تغییر ضخامت لایه نقص و نظایر آن صورت گرفته است. ولی به نظر ما این نوع کارها نمی تواند روشی برای کنترل پذیری باشد؛ چرا که وقتی ما یکی از پارامترهای فیزیکی ساختار را تغییر می‌دهیم، ساختار جدیدی بدست می آید که باید در عمل دوباره ساخته شود. این کار در واقع یک روش تئوری برای بهینه کردن و یافتن ساختاری مناسب برای کار کردن در یک مورد خاص که ما احتیاج داریم، می‌باشد. از نظر عملی وقتی چنین ساختاری ساخته می شود، نمی‌توان در آن دستکاری کرد مگر اینکه یک ساختار دیگری ساخته شود. منظور ما از کنترل پذیر بودن این است که بتوان در یک ساختار معین با یک عامل خارجی تغییرات فیزیکی و یا اپتیکی ایجاد کرد که وقتی آن عامل خارجی قطع شود ساختار بدون تغییر به حالت اولیه خود برگردد. برای این کار راهکارهای متفاوتی وجود دارد. استفاده از مواد یا ماده‌ای که خواص نوری آن به یک یا چند عامل خارجی، برای مثال: میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، دما و ... حساس باشد.

در این مقاله با در نظر گرفتن یک بلور فوتونی معین با آرایش تناوب سه لایه شامل مواد دی‌الکتریک و فلز و وارد کردن یک لایه نقص با ضریب شکستی حساس به میدان الکتریکی خارجی، رفتار مد نقص در داخل گاف باند فوتونی را مطالعه کرده‌ایم. نشان داده شده که با تغییر ولتاژ خارجی اعمالی، می‌توان طول موج جایگزیده در داخل گاف باند را که می‌تواند به عنوان یک فیلتر استفاده شود، جابجا کرد.

۲- مدل و تئوری

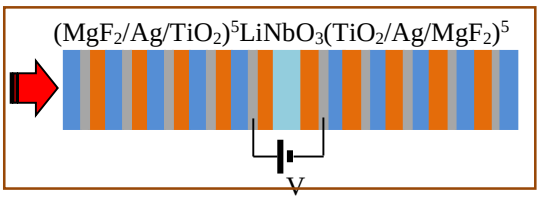
طرحواره ساختار بلور فوتونی پیشنهادی در شکل ۱ مشاهده می‌شود که از تناوب سه لایه دی‌الکتریک /فلز/ دی‌الکتریک تشکیل شده است. جنس لایه‌های دی‌الکتریک می‌توانند یکسان انتخاب شوند. در این صورت بلور فوتونی ساختاری

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-28]

با تناوب دو لایه و آرایشی خاص خواهد بود. ولی انتخاب ساختاری با تناوب سه لایه در طراحی و ساخت دارای انعطاف پذیری بیشتری خواهد بود. همچنین نشان داده شده که این نوع ساختارها گاف باند پهن‌تری نسبت به ساختار با تناوب دو لایه دارند [۵]. در این کار منیزیم فلوراید (n=1/38) و تیتانیم اکساید (n=2/46) به عنوان لایه‌های دی‌الکتریک و نقره به عنوان فلز انتخاب شده‌اند که ضخامت‌های آن‌ها به ترتیب برابر ۹۰ و ۹۰ و ۱۰ نانومتر می‌باشد. ضریب شکست نقره با استفاده از مدل درود با رابطه‌ی زیر، به فرکانس میدان تابشی مربوط می‌شود:

$$\varepsilon(\omega)=1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2-i\gamma\omega} \qquad (۱)$$

که در آن، فرکانس پلاسمایی $\omega_p=2\pi\times2.175\times10^{15}\ rad/s$ و فرکانس میرایی $\gamma=2\pi\times4.35\times10^{12}\ rad/s$ است.



شکل ۱: طرحواره ساختار بلور فوتونی پیشنهاد شده برای طراحی فیلتر نوری کنترل‌پذیر با اعمال ولتاژ خارجی.

لیتیم نیوبات ($LiNbO_3$) به عنوان لایه نقص در ساختار بلور فوتونی وارد شده است. این ماده ساختار بلوری ناهمسانگردی دارد که خواص نوری آن به راستای موج انتشاری بستگی دارد [۸]. برای مثال اگر میدان اعمالی در راستای محور z باشد، ضریب شکست در این راستا مربوط به موج غیرعادی و به صورت $n_e=n_{e0}+0.5n_{e0}^3\gamma_{13}V/d$ خواهد بود که در آن n_{e0} ضریب شکست در غیاب میدان و γ_{13} ضریب الکترو-اپتیکی نامیده می‌شود که مقدار آن برای لیتم نیوبات ۳۰/۹پیکومتر بر ولت است [۸]. مقدار ضریب شکست در غیاب میدان ۲/۴۱ می باشد. برای محاسبه‌ی ضریب عبور از روش ماتریس انتقال استفاده می‌کنیم. در حالت کلی، مولفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در ابتدا و انتهای لایه‌ی jام، با ضخامت d_j توسط ماتریس انتقال زیر به هم مربوط می‌شوند [۹]:

$$M_j[d_j]=\begin{pmatrix}\cos\gamma_j & -\frac{i}{p_j}\sin\gamma_j\\ -ip_j\sin\gamma_j & \cos\gamma_j\end{pmatrix} \qquad (۲)$$

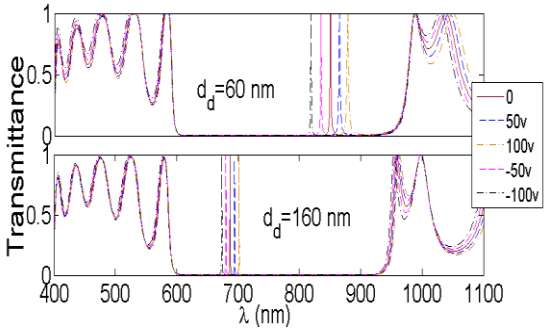
که در آن $\gamma_j=\frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_j}\sqrt{\mu_j}\,d_j\sqrt{1-\frac{\sin^2\theta}{\varepsilon_j\mu_j}}$ و c تندی نور در خلا می‌باشد. برای موج با قطبش TE، $p_j=\frac{c}{\omega\mu_j}(\gamma_j/d_j)$ و برای موج با قطبش TM، $p_j=\frac{c}{\omega\varepsilon_j}(\gamma_j/d_j)$ می‌باشد. ماتریس انتقال کل ساختار نیز از ضرب ماتریس‌های انتقال تک تک لایه‌ها بدست می‌آید. با انجام محاسبات، ضریب تراگسیل ساختارها با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$t(\omega)=\frac{2\cos\theta}{(m_{22}+m_{12}\cos\theta)\cos\theta+(m_{21}+m_{11}\cos\theta)} \qquad (۴)$$

که در آن m_{ij} عناصر ماتریس انتقال کل ساختار هستند. بالاخره، با معلوم بودن ضریب تراگسیل، تراگسیلندگی نیز به صورت $T=|t|^2$ قابل محاسبه خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲، رفتار مد نقص را در داخل گاف باند فوتونی، برای دو ضخامت متفاوت لایه نقص (۶۰ و ۱۶۰ نانومتر) در چندین ولتاژ اعمالی نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود برای تمامی مقادیر ولتاژ، محدوده‌ی گاف باند در هر دو ضخامت لایه نقص ثابت است ولی با افزایش ضخامت لبه بالایی گاف به سمت طول موج‌های کمتر جابجا شده است. علاوه بر آن برای ضخامت ۶۰ نانومتر مد نقص نزدیک به لبه بالایی و برای ضخامت ۱۶۰ نانومتر نزدیک به لبه

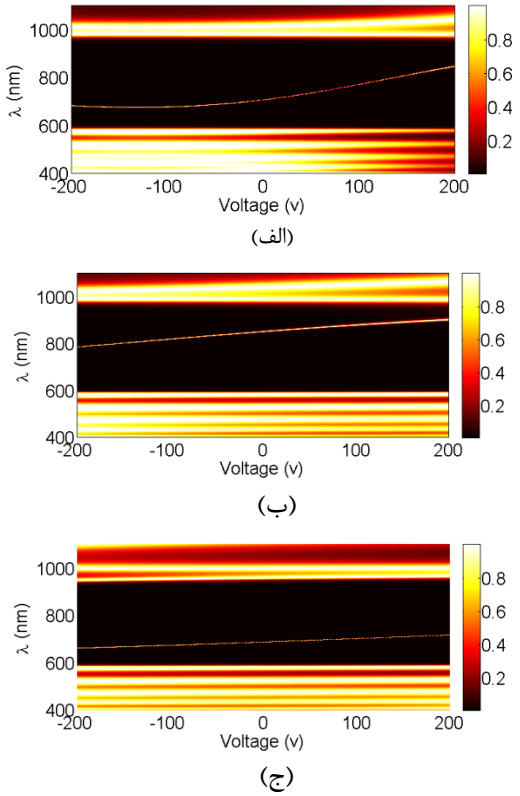


شکل ۲: نمودار تراگسیلندگی برحسب طول موج تابشی از ساختار بلور فوتونی $(MgF_2/Ag/TiO_2)^5 LiNbO_3 (TiO_2/Ag/MgF_2)^5$ جابجایی مد نقص در داخل گاف باند فوتونی با اعمال ولتاژ خارجی قابل مشاهده است.

پایین است. در هر دو حالت با افزایش ولتاژ از مقدار صفر،

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-28]

مد نقص به طرف طول موج‌های بیشتر و با معکوس کردن ولتاژ به سمت طول موج‌های کمتر جابجا می‌شود. این جابجایی می‌تواند به طور پیوسته تا ولتاژ آستانه تخریب، یعنی اندازه ولتاژی که ساختار می‌تواند تحمل کند، ادامه یابد. برای مشاهده این رفتار برای هر دو حالت رفتار طیف تراگسیل برای محدوده ولتاژ اعمالی ۲۰۰ تا ۲۰۰- ولت در شکل ۳ نمایش داده شده است.



(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۳: نمایش رفتار مد نقص در ساختار بلور فوتونی یک بعدی $(MgF_2/Ag/TiO_2)^5LiNbO_3(TiO_2/Ag/MgF_2)^5$ برحسب ولتاژ اعمال شده برای طول موجهای مختلف به ازاء سه ضخامت: (الف) ۱۰ نانومتر، (ب) ۶۰ نانومتر و (ج)۱۶۰ نانومتر لایه نقص.

به وضوح دیده می شود که با اعمال ولتاژ خارجی طول موج جایگزیده به طور پیوسته جابجا می‌شود. از این رو، این ساختار می‌تواند به عنوان یک فیلتر کنترل پذیر مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که با انتخاب مواد و ضخامت لایه‌های مورد استفاده در آرایش ساختار می‌توان محدوده گاف باند و طول موج جایگزیده را در ناحیه مورد نظر تنظیم کرد. نتایج ارائه شده دراین کار، یک مثال نوعی بود که محدوده گاف باند ۶۰۰ تا ۹۷۰ نانومتر و طول موج جایگزیده در غیاب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶۰ نانومتری لایه نقص حدود ۸۵۰ نانومتر و برای ضخامت ۱۶۰ نانومتری حدود ۶۸۰ نانومتر می باشد. با تغییر ولتاژ اعمالی از ۲۰۰ ولت به ۲۰۰- ولت طول موج جایگزیده از ۹۰۰ نانومتر به ۷۸۰ نانومتر جابجا می شود. از نقاط بارز دیگری که در مورد این ساختار می‌توان به آن اشاره کرد این است که تراگسیل برای طول موج جایگزیده برای تمامی حالت‌ها کامل می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

رفتار مد نقص در بلور فوتونی یک بعدی سه لایه‌ای $(MgF_2/Ag/TiO_2)^5LiNbO_3(TiO_2/Ag/MgF_2)^5$ تحت اعمال ولتاژ الکتریکی خارجی بررسی شد. نشان داده شده که با تغییر ولتاژ، طول موج جایگزیده در داخل گاف باند بدون اینکه تغییری در اندازه تراگسیل آن حاصل شود جابجا می شود. به دلیل وابستگی ضریب شکست لیتیم نیوبات به ولتاژ که به عنوان لایه نقص وارد ساختار شده شرط براگ برای جایگزیدگی تغییر کرده لذا مد نقص جابجا می شود. از این ساختار می‌توان برای طراحی فیلتر تمام نوری کنترل‌پذیر استفاده کرد.

سپاسگزاری

از سرکار خانم آرزو رشیدی، دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز، به خاطر کمک‌هایی که در رسم نمودارها و راهنمایی-های مفیدی که داشتند، تشکر می‌کنیم.

مراجع

[1] Yablonovitch E., *Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics*, **Phys. Rev. Lett.** 58 (1987) 2059-2062.

[2] John S., *Strong localization of photons in certain disordered dielectric supperlattices*, **Phys. Rev. Lett.** 58 (1987) 2486-2489.

[3] Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D., *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, p. 191*, Princeton University Press, 2008.

[4] Poli F., Cucinota A., Selleri S., *Photonic Crystal Fibers*, p. 42, Springer series in materials science, 2007.

[5] C.-J. Wu, Y.-H. Chung, B.-J. Syu and T.-J. Yang, *Band gap extension in one-dimensional ternary metal-dielectric photonic crystal*, **Progress In Electromagnetics Research, PIER** 102 (2010) 81-93.

[6] Banerjee A., *Binary number sequence multilayer structure based refractometric optical sensing element*, **J Electromagnet Wave** 22 (2008) 2439-2449.

[7] Wang X., Hu X., Li Y., Jia W., Xu C., Liu X., Zi J., *Enlargement of omnidirectional total reflection frequency range in one-dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures*, **Appl. Phys. Lett.** 80, (2002) 4291-4293.

[8] Yariv A., *Quantum Electronics*, p. 307, John Wily & Sons, 1989.

[9] Born M., Wolf E., *Principles of Optics*, p. 54, Cambridge University Press: Cambridge, 1999.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-28]