

Study of defect in one dimensional photonic crystals and usage at liquid crystals

A. Marahsi Nasab¹
S. Ranjbaran²

Received: 2012.10.3

Accepted: 2013.1.28

Abstract

Photonic crystals are artificial dielectric materials with a periodic refractive index and new electromagnetic properties. These crystals have shown that due to the Bragg scattering in a periodic dielectric structure, there would be an answer in the form of photonic band gap. These gaps don't let the photons to be appeared in a specified energy region. When the frequency of the network breaks by using a defect, a localized defect appears in the range of band gap, which leads to a change in the behavior of light. These changes are determined by the nature and type of defect.

Keywords: Photonic crystal defect, Photonic crystals, Band gap, Liquid crystals

¹ Department of Physics, Tabriz Shahid Madani University;
m_allahkaram@yahoo.com

² Department of Physics, Tabriz Shahid Madani University

بررسی نقص در بلورهای فوتونیک یک بعدی و به کارگیری در بلورهای مایع

اله کرم مرعشی نسب^۱

سعید رنجریان^۲

تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۳

تاریخ تصویب: ۹۱/۱۱/۹

چکیده

بلورهای فوتونیک، مواد دی‌الکتریک مصنوعی با ضریب شکست تناوبی هستند که ویژگی‌های الکترومغناطیسی جدیدی دارند. این بلورها نشان داده‌اند که نتیجه پراکندگی براگ در یک ساختار دی‌الکتریک متناوب، پاسخی به شکل گاف باند فوتونیک است. این گاف‌ها از حضور فوتون‌ها در یک دامنه انرژی معین جلوگیری به عمل می‌آورند. وقتی تناوب شبکه با وارد کردن یک نقص جایگزیده در درون بلور فوتونیک شکسته می‌شود، یک مُد نقص جایگزیده در محدوده گاف نواری فوتونیک ظاهر می‌شود که منجر به تغییر در

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه شهید مدنی تبریز؛ m_allahkaram@yahoo.com

^۲ گروه فیزیک، دانشگاه شهید مدنی تبریز

رفتارِ تداخلی نور می‌شود. این تغییرات با ماهیت و نوع نقص تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نقص بلورهای فوتونیک، بلورهای فوتونیک، گاف نواری، بلورهای مایع.

مقدمه

در بلورهای دو بعدی یا سه بعدی یک نقص نقطه‌ای همانند یک میکرو کاواک، یک نقص خطی شبیه یک موجبر و نقص سطحی شبیه یک آینه کامل عمل می‌کند [۱-۲]. مشابه بلورهای فوتونیک دو بعدی یا سه بعدی، وارد شدن لایه‌های نقص به بلورهای فوتونیک یک بعدی نیز می‌تواند مدهای نقص جایگزیده ای درون گاف نواری فوتونیک ایجاد کند. مدهای نقص سبب تراگسیل در بلورهای فوتونیک یک بعدی شده و آن‌ها را می‌توان همانند فیلترها و جداکننده‌های TE/TM ^۱ مورد استفاده قرار داد [۳]. بنابراین مطالعه ویژگی‌های مدهای نقص در بلورهای فوتونیک یکی از جالب‌ترین موضوعات است، زیرا که در این حالت فوتون‌ها جایگزیده می‌شوند. به منظور دست آوردن مدهای نقص مناسب، کارهای بزرگی در جهت تنظیم موقعیت و شدت مدهای نقص انجام گرفته است. اوزاکی^۲ و همکارانش تنظیم الکتریکی فرکانس مدهای نقص را با وارد کردن یک لایه نقص بلور مایع^۳ به درون ساختار بلور فوتونیک یک بعدی نشان داده‌اند [۴-۵]. تغییر در مدهای نقص به واسطه تغییر در ضریب شکست لایه نقص می‌باشد، که این نیز از تنظیم دوباره میدان القایی مولکول‌های بلور مایع ناشی می‌شود.

در این مقاله نشان می‌دهیم که وقتی در بلور فوتونیک یک بعدی نقصی وجود داشته باشد و نقش این لایه نقص را برای میدان‌های خارجی یک بلور مایع نماتیک بازی کند که

^۱ -Splitters

^۲ -Ozaki

^۳ -Liquid Crystal

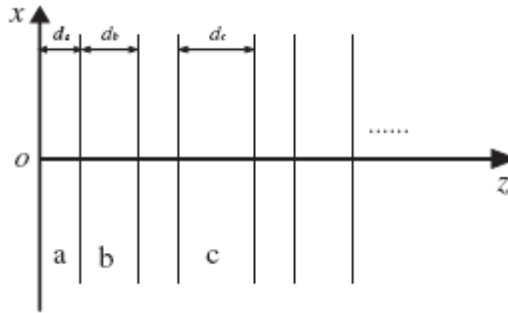
دارای گذردهی الکتریکی ناهمسانگرد نیرومندی است، در این صورت طیف مدهای نقص و جایگزیدگی میدان در این مدها ویژگی‌های به خصوصی را دارا می‌شوند.

نقص تدریجی در بلورهای فوتونیک

در این مقاله ویژگی مدهای نقص را در یک بلور فوتونیک یک بعدی شامل یک لایه نقص تدریجی بررسی می‌کنیم [۶].

فرمول بندی

یک ساختار لایه‌ای دی الکتریک متناوب یک بعدی را در نظر می‌گیریم که دارای یک لایه نقص تدریجی است. چنین ساختاری در شکل (1) نشان داده شده است. فرض می‌شود که لایه‌های متناوب S شامل دو نوع ماده دی الکتریک a و b باشد، به طوری که داشته باشیم: $S = (ab)^n$. n به تعداد سلول‌های واحد ab اشاره می‌کند. ضخامت‌های دو لایه دی الکتریک به ترتیب d_a و d_b است. طول تناوب کامل ساختار $d = d_a + d_b$ می‌باشد. فرض می‌کنیم که لایه‌های سازنده a و b غیر جذبی، همسانگرد و دی الکتریک همگن هستند. نسبت‌های گذردهی الکتریکی لایه‌ها به ترتیب ϵ_a و ϵ_b ، و نسبت‌های نفوذپذیری مغناطیسی μ_a و μ_b می‌باشند. برای رسیدن به مدهای جایگزیده در گاف باند فوتونیک، یک لایه نقص از ماده تدریجی c را به درون ساختار متناوب وارد می‌کنیم. نسبت‌های گذردهی الکتریکی $\epsilon_c(z)$ و نفوذپذیری مغناطیسی $\mu_c(z)$ لایه نقص تدریجی در راستای عمود بر سطح لایه‌ها تغییر می‌کند. ضخامت لایه نقص تدریجی d_c است. منحنی وابستگی در راستای z گذردهی الکتریکی یا نفوذپذیری مغناطیسی را می‌توان از طریق آزمایش به دست آورد.



شکل ۱. طرحی از یک ساختار چند لایه‌ای متناوب با یک لایه نقص تدریجی.

یک راه ممکن برای ساختن مواد تدریجی مرگب، استفاده از روش‌های تزریقی است که در آن ترکیب در راستای z تغییر می‌کند و از آن‌ها به منحنی تغییرات گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی منجر می‌شود. لایه نقص تدریجی را به تعداد زیادی زیر لایه تقسیم کرده هر زیر لایه را می‌توانیم یک محیط همگن در نظر بگیریم. بنابراین می‌توانیم روش ماتریس انتقال [۷-۹] را برای یافتن ویژگی‌های مدهای نقص در ساختاری مانند $(ab)^n c(ab)^{N-n}$ به کار ببریم.

انتشار امواج الکترومغناطیسی در ساختار لایه‌ای را در نظر می‌گیریم. برای انتشار موج الکترومغناطیسی در m امین لایه، یعنی یک موج الکتریکی عرضی (TE) یا یک موج مغناطیسی عرضی (TM)، بردار موج برابر است با:

$$\vec{k}_m = k_{mx} \vec{e}_x + k_{mz} \vec{e}_z \quad (1)$$

که k_{mx} و k_{mz} مؤلفه‌ها در راستای x و z هستند. برای تمام لایه‌ها مؤلفه k_{mx} است $(k_{1x} = k_{2x} = \dots = k_x)$. بنابر معادلات ماکسول، مؤلفه k_{mz} برابر است با:

$$k_{mz} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_m \mu_m - k_x^2} \quad , \quad (k_0^2 \epsilon_m \mu_m - k_x^2 > 0) \quad \text{برای امواج منتشر شونده}$$

$$k_{mz} = i\sqrt{k_x^2 - k_0^2 \epsilon_m \mu_m} \quad , \quad (k_x^2 - k_0^2 \epsilon_m \mu_m > 0) \quad \text{برای امواج میرا}$$

که ϵ_m و μ_m به ترتیب نسبت‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی m امین لایه هستند. k_0 عدد موج در خلا می‌باشد. برای مورد خاص تابش عمودی موج نوری و

$$k_{mz} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_m \mu_m} \quad \text{و} \quad k_x = 0 \quad \text{قطبش موازی با سطوح لایه‌ها داریم.}$$

میدان الکترومغناطیسی در m امین لایه را به این صورت می توان نوشت:

$$\vec{E}_m = [A_m \exp(ik_{mz}(z - z_{m-1})) + B_m \exp(-ik_{mz}(z - z_{m-1}))] \exp(i(k_x x - \omega t)) \vec{e}_x \quad (2)$$

$$\vec{H}_m = \frac{k_{mz}}{\omega \mu_m} [-A_m \exp(ik_{mz}(z - z_{m-1})) + B_m \exp(-ik_{mz}(z - z_{m-1}))] \exp(i(k_x x - \omega t)) \vec{e}_y \quad (3)$$

$$+ \frac{k_x}{\omega \mu_m} [A_m \exp(ik_{mz}(z - z_{m-1})) + B_m \exp(-ik_{mz}(z - z_{m-1}))] \exp(i(k_x x - \omega t)) \vec{e}_z$$

که $z_m = z_{m-1} + d_m$ مختصات m امین مرز با شرط $z_0 = 0$ می باشد. d_m ضخامت m امین لایه است. A_m و B_m به ترتیب ضرایب امواج پیشرونده و عقب رونده در m امین مرز می باشند. یادآور می شویم که B_N باید صفر باشد زیرا که هیچ موج برگشتی در آخرین مرز وجود ندارد. دامنه های میدان دو لایه مجاور با معادله زیر به هم مربوط می شوند:

$$\begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} = (M_m) \begin{pmatrix} A_{m+1} \\ B_{m+1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

که M_m ماتریس انتقال است. با استفاده از شرایط مرزی زیر می توانیم این ماتریس را به دست آوریم:

$$\vec{e}_z \times \left(\vec{E}_{m+1} - \vec{E}_m \right)_{z=z_m} = 0, \quad \vec{e}_z \times \left(\vec{H}_{m+1} - \vec{H}_m \right)_{z=z_m} = 0$$

$$M_m = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} \left(1 + \frac{k_{(m+1)z} \mu_m}{k_{mz} \mu_{m+1}} \right) \exp(-ik_{mz} d_m) & \left(1 - \frac{k_{(m+1)z} \mu_m}{k_{mz} \mu_{m+1}} \right) \exp(-ik_{mz} d_m) \\ \left(1 - \frac{k_{(m+1)z} \mu_m}{k_{mz} \mu_{m+1}} \right) \exp(ik_{mz} d_m) & \left(1 + \frac{k_{(m+1)z} \mu_m}{k_{mz} \mu_{m+1}} \right) \exp(ik_{mz} d_m) \end{pmatrix} \quad (5)$$

لایه نقص تدریجی را به L زیر لایه تقسیم می کنیم، به طوری که می توان هر زیر لایه را به عنوان یک لایه همگن در نظر گرفت. در هر یک از لایه ها نسبت های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی متفاوت و به منحنی های تغییرات وابسته هستند. برای سادگی بیشتر منحنی های تغییرات گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی لایه نقص را خطی فرض می کنیم:

$$\varepsilon_c(z) = p_1(z - nd) + p_2, \quad \mu_c(z) = q_1(z - nd) + q_2 \quad (nd < z < nd + d_c) \quad (6)$$

نسبت‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی l امین زیر لایه در لایه نقص تدریجی به این صورت بیان می‌شود:

$$\varepsilon_c(l) = p_1 l \frac{d_c}{L} + p_2, \quad \mu_c(l) = q_1 l \frac{d_c}{L} + q_2 \quad (7)$$

عبور از مرزها با ماتریس‌های انتقال $M_{(1)}, M_{(2)}, \dots, M_{(l)}, \dots, M_{(L)}$ داده می‌شود که می‌توان این ماتریس‌ها را همانند ماتریس ارائه شده در رابطه (۵) در نظر گرفت. بنابراین ماتریس انتقال لایه نقص تدریجی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = M_{(1)} M_{(2)} \dots M_{(L)} \quad (8)$$

در نهایت انتشار امواج الکترومغناطیسی از میان چنین ساختار لایه‌ای، با ضرب تک‌تک ماتریس‌های انتقال لایه‌های سازنده ساختار بیان می‌شود:

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = M_1 M_2 \dots M \dots M_{N-2} M_{N-1} \begin{pmatrix} A_N \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

ضرب تراگسیل ساختار کامل به این صورت نوشته می‌شود:

$$T = \left| \frac{A_N}{A_1} \right|^2 \quad (10)$$

بنابراین ویژگی‌های تراگسیلی بلورهای فوتونیک یک بعدی شامل یک لایه نقص تدریجی، وابستگی زیادی به منحنی‌های تغییرات گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی لایه نقص تدریجی دارد.

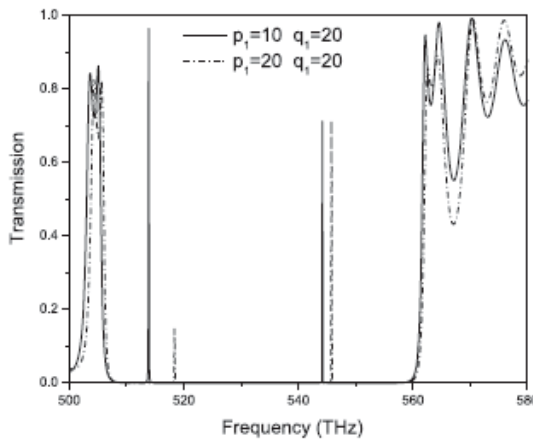
نتایج عددی و بحث‌های مربوطه

در این مقاله چندین محاسبه عددی را روی ویژگی‌های تراگسیلی بلور فوتونیک یک بعدی و برای منحنی‌های تغییرات گوناگون لایه نقص تدریجی انجام می‌دهیم. دی‌اکسید تیتانیوم^۱ و دی‌اکسید سیلیسیم^۲ را برای مواد دی‌الکتریک a و b به عنوان یک سیستم نمونه انتخاب می‌کنیم، و لایه‌های دی‌الکتریک گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری

^۱ -TiO₂

^۲ -SiO₂

مغناطیسی ایده آل و بدون اتلاف دارند. نسبت‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی لایه‌ها این چنین هستند $\varepsilon_a = 5.3$ و $\mu_a = 1$ برای TiO_2 ، $\varepsilon_b = 2.13$ و $\mu_b = 1$ برای SiO_2 ، ضخامت‌ها $d_a = 95.3 \text{ nm}$ و $d_b = 234.9 \text{ nm}$. برای حصول نتایج دقیق تر، L باید بزرگ در نظر گرفته شود. انتخاب ما $L = 100$ است. لایه نقص تدریجی را در مرکز ساختار لایه‌ای قرار می‌دهیم و برای ضخامت این لایه داریم: $d_c = 2d_a$. ابتدا منحنی تغییرات خطی گوناگونی را برای نسبت‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی لایه نقص تدریجی در نظر می‌گیریم. طیف تراگسیلی در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل وجود مدهای نقص در گاف‌های باند ممنوعه را نشان می‌دهد.

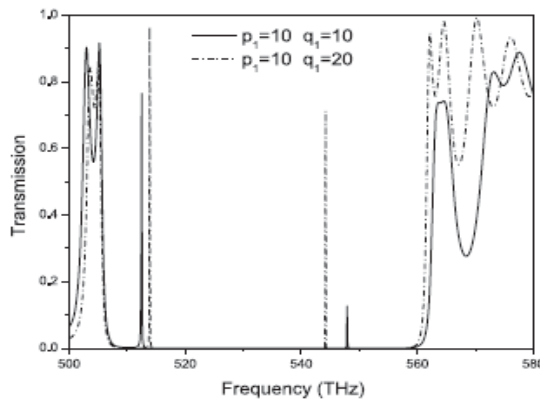


شکل ۲. طیف تراگسیلی برای منحنی تغییرات خطی گوناگون نسبت گذردهی الکتریکی لایه نقص تدریجی. پارامترها: $q_2 = 1$ ، $p_2 = 5.3$.

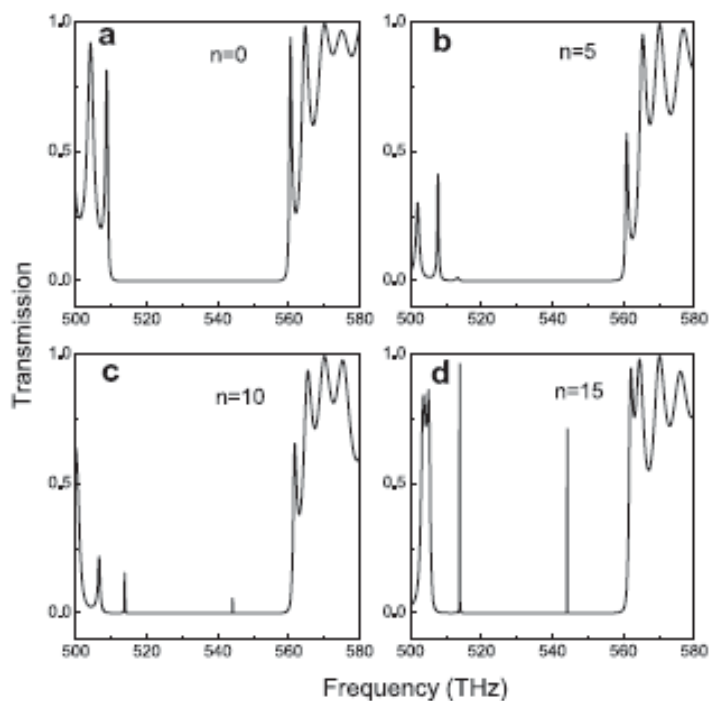
موقعیت مکانی و شدت مدهای نقص با p_1 تغییر می‌کند. هنگامی که p_1 افزایش می‌یابد، شدت مدهای نقص کاهش می‌یابد و موقعیت این مدها به سمت فرکانس‌های بالاتر تغییر می‌کند. این پدیده به این صورت توجیه می‌شود: وقتی p_1 افزایش می‌یابد، آهنگ تغییر نسبت گذردهی الکتریکی لایه نقص تدریجی افزایش یافته و در نتیجه مقاومت موجی لایه نقص تدریجی بالا می‌رود. تغییر در مقاومت موجی، شدت مدهای

نقص را تحت تاثیر قرار می دهد. از سوی دیگر، با افزایش p_1 ، ضریب شکست نیز افزایش یافته و از آنها تغییری در طول راه نوری لایه نقص تدریجی بوجود می آید. این تغییر، موقعیت مدهای نقص را به سمت فرکانس های بالاتر سوق می دهد [۱۰]. در ادامه، منحنی تغییر خطی گوناگونی را نیز برای نسبت نفوذپذیری مغناطیسی لایه نقص تدریجی در نظر می گیریم. طیف تراگسیلی در شکل (۳) نشان داده شده است. از این شکل در می یابیم که می توان با تغییر پارامترهای منحنی های تغییر خطی لایه نقص تدریجی، شدت و موقعیت مدهای نقص را تنظیم کرد.

همچنین ویژگی مدهای نقص با موقعیت های متفاوت لایه نقص تدریجی در ساختار لایه ای متناوب را مورد بررسی قرار می دهیم. در شکل (۴)، ضریب تراگسیل به صورت تابعی از فرکانس برای ساختارهایی همانند $(ab)^{N-n} c (ab)^n$ نشان داده شده است. وقتی که لایه نقص تدریجی از سمت چپ ساختار به مرکز ساختار لایه ای تغییر مکان می دهد، مدهای نقص به تدریج در گاف باند فوتونیکی ممنوعه ظاهر می شوند. در حقیقت، شدت مدهای نقص با تغییر مکان لایه نقص افزایش می یابد و این شدت وقتی که لایه نقص در مرکز ساختار قرار می گیرد بیشترین مقدار خود را دارد.

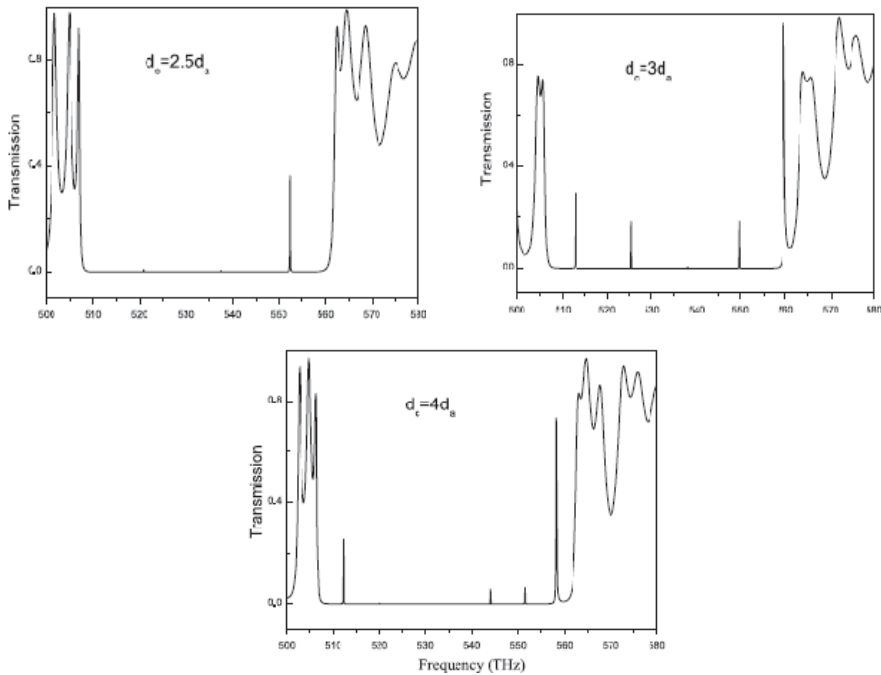


شکل ۳. طیف تراگسیلی برای منحنی تغییرات خطی متفاوت نسبت نفوذپذیری مغناطیسی لایه نقص تدریجی. پارامترها همان مقادیر شکل (۲) را دارا می باشند.



شکل ۴. طیف تراگسیل ساختاری به صورت $(ab)^n c (ab)^{N-n}$ با n متفاوت ($N = 30$).

این پدیده از جفت شدگی مدهای ویژه در لایه نقص و این مدها در لبه های باند ناشی می شود [۱۱]. وقتی لایه نقص تدریجی در مرکز ساختار لایه ای قرار دارد، این جفت شدگی بزرگ می باشد. در غیر این صورت، جفت شدگی ناچیز است. بنابراین شدت مدهای نقص را می توان با تغییر موقعیت لایه نقص تدریجی در ساختار لایه ای متناوب تنظیم کرد.



شکل ۵. طیف تراگسیلی برای ضخامت‌های متفاوت لایه نقص تدریجی.

علاوه بر این، تعداد مدهای نقص درون گاف‌های باند ممنوعه را نیز می‌توان با تغییر ضخامت لایه نقص تدریجی کنترل کرد. شکل (۵) طیف تراگسیلی با ضخامت‌های متفاوت لایه نقص را، وقتی لایه در مرکز ساختار لایه‌ای متناوب قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. از این شکل در می‌یابیم وقتی ضخامت لایه نقص تدریجی زیاد می‌شود، تعداد مدهای نقص درون گاف‌های ممنوعه افزایش می‌یابد. مدهای نقص چندگانه درون گاف‌های باند ممنوعه از تنظیم راه نوری لایه نقص تدریجی در ساختار سرچشمه می‌گیرند [۱۲]. در حقیقت راه نوری لایه نقص تدریجی، نه تنها به ضخامت خود لایه بستگی دارد، بلکه به منحنی‌های تغییر گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نیز وابسته است. در کل نتیجه‌ای که از این بررسی‌ها می‌گیریم این است که می‌توان مدهای نقص اپتیکی درون گاف‌های ممنوعه را با وارد کردن لایه نقص تدریجی به درون ساختار

لایه‌ای متناوب و تنظیم منحنی‌های تغییر گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی این لایه و همچنین موقعیت و ضخامت لایه نقص تدریجی، به طور موثر کنترل کرد.

نتیجه‌گیری

در مجموع ما در این کار نشان دادیم که وقتی در بلور فوتونیک یک بعدی نقصی وجود داشته باشد و نقش این لایه نقص را برای میدان‌های خارجی یک بلور مایع نماتیک بازی کند که دارای گذردهی الکتریکی ناهمسانگرد نیرومندی است، در این صورت طیف مدهای نقص و جایگزیدگی میدان در این مدها ویژگی‌های را بخصوصی را از خود نشان می‌دهند.

مهم‌ترین آن که، وقتی جهت‌گیری محور اپتیکی نماتیک تغییر می‌کند، این تغییر حالت موجب می‌شود که کیفیت طیفی مدهای نقص تغییر کند و ترازهای مد نقص جدیدی ظاهر شود و تغییرات اساسی در درجه جایگزیدگی مدهای نقص ایجاد شود. همچنین نشان دادیم هنگامی که که محور اپتیکی نماتیک تغییر حالت می‌دهد طیف تراگسیلی بلور فوتونیک با دو نقص شبکه‌ای آرایش دوباره‌ای پیدا می‌کند و می‌توان این طیف تراگسیلی را با تغییر فاصله میان لایه‌های نقص تعدیل کرد.

منابع

- [1] J. D. Joannopoulos, J. N. Winn, and R. D. Mead; *"photonic crystals: Molding the Flow of Light"*; Princeton University Press (1995).
- [2] H. Y. Lee and T. Yao; *J. Appl. Phys.* **93** (2003) 819.
- [3] Z. M. Jiang, B. Shi, D. T. Zhao, J. Liu, and X. Wang; *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 3395.
- [4] R. Ozaki, T. Matsui, M. Ozaki, and K. Yoshino; *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 3593.
- [5] R. Ozaki, Y. Matsuhisa, M. Ozaki, and K. Yoshino; *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 1844.
- [6] Z. F. Sang and Z. Y. Li; *Opt. Commun.* **273** (2007) 162-166

- [7] Z. Wang, R. W. Peng, F. Qiu, Z. H. Tang, X. F. Hu, X. Q. Huang, M. Wang, A. Hu, S. S. Jiang, and D. Feng; *J. Cryst. Growth* **275** (2005) e1209.
- [8] M. Kohmoto, B. Sutherland, and K. Iguchi; *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2436.
- [9] L. Gao and C. T. Tang; *Phys. Lett. A* **322** (2004) 390.
- [10] C. S. Kee, J. E. Kim, H. Y. Park, and H. Lim; *IEEE Trans. Microw. Theory* **47** (1999) 2148.
- [11] J. Zi, J. Wan, C. Zhang; *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 2084.
- [12] F. Qiu, R. W. Peng, X. Q. Huang, Y. M. Liu, M. Wang, A. Hu, and S. S. Jiang; *Europhys. Lett.* **63** (2003) 853.