

خواص تراگسیلی بلورهای فوتونی یک بعدی شامل لایه نقص مگنتوآپتیک با اپسیلون - نزدیک - صفر

رضا عبدی قلعه^{1*}، رضا سلدوزی²، امیر مدنی³، وحید فلاحی⁴

1. استادیار، گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

2. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

3. استادیار، گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

4. استادیار، گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

تاریخ پذیرش: 1395/06/19

تاریخ دریافت: 1395/04/28

Transmittance Properties of One - Dimensional Photonic Crystals Containing an Epsilon-Near-Zero Magneto-Optical Defect Layer R. Abdi-Ghaleh^{*1}, R. Suldozi², A. Madani³, V. Fallahi⁴

1. Assistant Professor, Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab

2. M.Sc. Student, Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab

3. Assistant Professor, Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab

4. Assistant Professor, Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab

Received: 2016/07/18

Accepted: 2016/09/09

Abstract

In this paper, the transmittance characteristics of a one-dimensional photonic crystal containing an epsilon-near-zero magneto-optical defect layer have been investigated, through varying the permittivity tensor diagonal element of defect layer. For calculations the 4×4 transfer matrix method has been utilized. Investigation on the obtained results reveal that such a structure is absolutely opaque for one of the circular polarizations, whereas for the other polarization has the complete transmittance coefficient ($T=1$), but for specific thicknesses of the defect layer. Moreover, the Faraday rotation of the structure has been studied. Furthermore, the behavior of the circular polarization transmittance coefficients for different layer numbers of the structure have been calculated and compared with each other.

Keywords

Photonic Crystals, Magneto - Optics, Epsilon - Near - Zero.

چکیده

در این مقاله، ویژگی‌های تراگسیلی بلور فوتونی یک بعدی حاوی لایه نقص مگنتوآپتیک با اپسیلون - نزدیک - صفر و با تغییر المان قطری تانسور گذردهی الکتریکی لایه نقص بررسی شده است. برای انجام محاسبات روش ماتریس انتقال 4×4 به کار گرفته شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که چنین ساختاری برای یکی از قطبش‌های دایروی کاملاً غیر شفاف است، در صورتی که برای قطبش دیگر به ازای ضخامت‌های خاص و معینی می‌تواند دارای ضریب تراگسیل کامل ($T=1$) باشد. همچنین چرخش فارادی این ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر آن رفتار ضریب تراگسیل قطبش‌های دایروی به ازای تعداد لایه‌های مختلف ساختار محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.

واژگان کلیدی

بلورهای فوتونی، مگنتوآپتیک، اپسیلون - نزدیک - صفر.

* نویسنده مسئول: رضا عبدی قلعه

ایمیل نویسنده مسئول:

*Corresponding Author: r.abdi@bonabu.ac.ir

مقدمه

بلورهای فوتونی یک بعدی لایه‌های متناوبی از دو یا چند لایه اپتیکی هستند که ثابت دی‌الکتریک آن‌ها متفاوت از هم و ضخامت اپتیکی لایه‌ها از مرتبه طول موج باشد [1]. مهم‌ترین ویژگی بلورهای فوتونی داشتن نوار ممنوعه است، بدین معنی که اگر فرکانس نور در بازه این نوار ممنوعه قرار گیرد، نمی‌تواند در داخل بلور فوتونی منتشر شود. اگر چه از سال 1887 مطالعه بلورهای فوتونی شروع شده، اما یابلونوویچ و جان صد سال بعد از آن یعنی در 1987، برای نخستین بار این واژه را به کار بردند [2,3]. بسیاری از کاربردهای مهم بلورهای فوتونی با ایجاد نقص در آنها به وجود می‌آید، زیرا نوری با فرکانس مد نقص می‌تواند در داخل بلور منتشر شود [4]. این ویژگی بلورهای فوتونی سبب به وجود آمدن کاربردهای زیادی مانند استفاده از بلورهای فوتونی در فیلترهای نوری شده است. در صورتی که حداقل یک لایه از لایه‌های بلور فوتونی دارای خاصیت مگنتوآپتیکی باشد، ساختار حاصل بلور مگنتوفوتونی نامیده می‌شود [5,6]. اساسی‌ترین ویژگی بلورهای مگنتوفوتونی تقویت اثرهای مگنتوآپتیکی در اثر تشدید دامنه میدان الکتریکی مد نقص است.

اثرهای مگنتوآپتیکی در پی اندرکنش نور و ماده تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی به وجود می‌آیند. از دید کلی، پدیده‌های مگنتوآپتیکی را می‌توان بر حسب اینکه نور از محیط مغناطیسه تراگسیل یا بازتابیده می‌شود، به دو مد تراگسیلی و بازتابی تقسیم کرد [7,8]. در مد تراگسیلی با توجه به جهت‌گیری بردار انتشار نور و بردار مغناطش ماده دو هندسه اصلی تعریف می‌شود: هندسه فارادی و هندسه ویگت. اثرهایی که در مد بازتابی به وجود می‌آیند به اثرهای کر مگنتوآپتیکی مشهورند و با توجه به وضعیت جهت‌گیری بردار مغناطش ماده نسبت به سطح بازتاب دهنده و صفحه فرود، در سه هندسه با نام‌های هندسه قطبی، هندسه طولی و هندسه عرضی طبقه‌بندی می‌شوند. هر کدام از ثرات مگنتوآپتیکی می‌تواند کاربردهای مختلفی داشته باشند. ما در اینجا اثر فارادی را مورد توجه و بررسی قرار می‌دهیم که اولین بار مایکل فارادی در سال 1845 آن را معرفی کرده است [9]. اثر فارادی به چرخش صفحه قطبش نور در حین عبور از ماده مگنتوآپتیکی که بردار مغناطش آن در راستای انتشار نور باشد،

اطلاق می‌گردد. مواد مگنتوآپتیکی عادی ویژه چرخش فارادی بسیار اندکی دارند. مثلاً تک لایه Bi:YIG دارای ویژه چرخش فارادی 0.1 deg/mm - است. ولی اگر این ماده در بلور فوتونی مورد استفاده قرار گیرد، ساختار حاصل می‌تواند چرخش فارادی چند ده درجه‌ای را ایجاد کند [5]. چنین چرخش‌های فارادی تقویت شده‌ای در طراحی و ساخت ایزولاتورها و سیرکیولاتورهای نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [10-12].

از طرفی دیگر، فرامواد نوع جدیدی از مواد مصنوعی هستند که دارای ویژگی‌های غیرطبیعی هستند. از نظر اپتیکی، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مواد ضریب شکست منفی آنهاست [13,14]. همچنین فرامواد ویژگی‌های شگفت‌انگیزی دیگری نیز مانند تصویربرداری فوق‌تفکیک‌پذیر، نامرئی‌سازی و... دارند [15,16]. علاوه بر آن، اخیراً دسته‌ای از فرامواد مورد توجه قرار گرفته‌اند که اپسیلون (گذردهی الکتریکی) آنها نزدیک صفر است [17-19]. در این مواد به دلیل نزدیک صفر بودن اپسیلون، اندازه عدد موج بسیار کوچک است که منجر به تغییرات بسیار اندک فاز نور ضمن انتشار در داخل ماده می‌شود. این خصوصیت باعث مطرح شدن ویژگی‌های الکترومغناطیسی خاصی نظیر پدیده ابر جفت‌شدگی و تونل‌زنی غیرعادی انرژی الکترومغناطیسی شده است [18,19]. همچنین نشان داده شده است که اگر مواد اپسیلون نزدیک صفر دارای خاصیت مگنتوآپتیکی باشند، می‌توانند ویژگی‌های خاص دیگری را نمایان سازند؛ به عنوان مثال، داویان و همکارانش در سال 2013 با محاسبه عددی نشان دادند که برای یک تیغه مگنتوآپتیکی در هندسه فارادی که دارای ویژگی اپسیلون صفر (دقیقاً مساوی صفر) باشد، یک‌سوسازی اپتیکی برای قطبش‌های دایروی راست‌گرد و یا چپ‌گرد می‌تواند اتفاق بیفتد [20,21]. همچنین، ما در کار اخیر خود، به صورت تحلیلی کارهای گروه تحقیقاتی فوق را گسترش دادیم و رابطه‌ای تحلیلی برای توصیف ضرایب تراگسیل قطبش‌های دایروی از تیغه مگنتوآپتیکی با اپسیلون صفر را به دست آوردیم [22]. اما در مقاله حاضر، ویژگی‌های تراگسیلی و چرخش فارادی ساختار بلور فوتونی را که دارای لایه مگنتوآپتیکی با اپسیلون نزدیک صفر باشد مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهیم و این ویژگی‌ها را بر حسب تغییر المان

المان‌های قطر اصلی با هم برابر و المان‌های غیرقطری نیز مساوی صفر خواهند بود.

با فرض اینکه نور فرودی بر روی ساختار دارای قطبش خطی باشد، می‌توان آن را به قطبش‌های دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد تجزیه کرد. اگر E_+^i و E_-^i دامنه‌های میدان‌های قطبش‌های دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد نور فرودی باشند، با استفاده از معادلات ماکسول و با توجه به شرایط مرزی میدان‌ها، رابطه میدان‌های فرودی، بازتابی و تراگسیلی از ساختار را می‌توان با رابطه ماتریسی زیر نشان داد:

$$\begin{pmatrix} \mathcal{E}_+^i \\ \mathcal{E}_+^r \\ \mathcal{E}_-^i \\ \mathcal{E}_-^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & M_{34} \\ 0 & 0 & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{E}_+^t \\ 0 \\ \mathcal{E}_-^t \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن ماتریس انتقال کل M به صورت

$$M = \hat{\mathcal{E}}D^{(0)} \hat{\mathcal{H}}^{-1} \hat{\mathcal{O}} \hat{S}^{(j)} \hat{\mathcal{E}}D^{(j+1)} \hat{\mathcal{H}} \quad (3)$$

تعریف می‌شود. نمادهای t ، r و i به ترتیب برای بیان تراگسیلی، بازتابی و فرودی استفاده شده‌اند. در ماتریس انتقال کل، D ماتریس دینامیکی و S ماتریس پراکندگی است که برای لایه j -ام به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$S^{(j)} = \begin{pmatrix} \cos b_+^{(j)} & \frac{i}{N_+^{(j)}} \sin b_+^{(j)} & 0 & 0 \\ \frac{i}{N_+^{(j)}} \sin b_+^{(j)} & \cos b_+^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos b_-^{(j)} & \frac{i}{N_-^{(j)}} \sin b_-^{(j)} \\ 0 & 0 & \frac{i}{N_-^{(j)}} \sin b_-^{(j)} & \cos b_-^{(j)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

قطری تانسور گذردهی الکتریکی لایه مورد نظر ارزیابی می‌کنیم.

رهیافت محاسباتی

روش ماتریس انتقال، یک روش ساده و کارا برای محاسبه و بررسی خواص تراگسیلی بلورهای فوتونی یک بعدی است. به طور خلاصه در این روش، وقتی که یک موج الکترومغناطیسی بر یک ساختار متناوبی از لایه‌ها تابیده می‌شود، با استفاده از معادلات ماکسول و پیوستگی مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی و اعمال شرط بلوخ، ضرایب دامنه و امواج بازتابشی در داخل هر لایه به وسیله ماتریس انتقال به دست می‌آید و به ضرایب دامنه تابش و بازتابیده موج در لایه قبلی ارتباط داده می‌شود. در نهایت، دامنه امواج تابشی و بازتابشی ورودی به وسیله ماتریس انتقال کل که متشکل از حاصل ضرب ماتریس انتقال تک تک لایه‌ها است به دامنه میدان خروجی ارتباط پیدا می‌کند.

ما در این کار برای بررسی مشخصات تراگسیلی ساختار از روش ماتریس انتقال 4×4 استفاده کرده‌ایم [23.24]. ساختار لایه‌ای را در نظر بگیرید که از تعداد J لایه تشکیل شده باشد و کل ساختار تحت تاثیر میدان یکنواخت مغناطیسی خارجی در راستای انتشار نور باشد. لایه‌های ساختار می‌توانند مگنتوپتیکی و یا دی‌الکتریکی باشند. تانسور گذردهی الکتریکی نسبی برای لایه j -ام در هندسه فارادی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$e^{(j)} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}^{(j)} & e_{xy}^{(j)} & 0 & 0 \\ \zeta e_{yx}^{(j)} & \epsilon_{xx}^{(j)} & 0 & 0 \\ \zeta & 0 & 0 & e_{zz}^{(j)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

در این تانسور المان‌های قطر اصلی گذردهی الکتریکی ماده را نشان می‌دهند و المان‌های غیرقطری نیز در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی به وجود می‌آیند. به طوری که اگر میدان مغناطیسی خارجی خاموش باشد، این المان‌ها مساوی صفر هستند [7.8]. همچنین برای لایه دی‌الکتریک،

$$D^{(j)} = \begin{pmatrix} \alpha & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\alpha} & N_+^{(j)} & -N_+^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & N_-^{(j)} & -N_-^{(j)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

هندسه ساختار مورد بررسی

ساختار بلور مورد مطالعه را به صورت $(A/B)^N M(B/A)^N$ در نظر می‌گیریم که در آن A و B لایه‌های دی‌الکتریکی و به ترتیب با ضرایب شکست $n_A = 1.5$ و $n_B = 2.5$ و M لایه نقص مگنتوپتیکی با اپسیلون - نزدیک - صفر باشد. ضخامت لایه‌های دی‌الکتریکی برابر $d_A = \frac{1}{4n_A}$ و $d_B = \frac{1}{4n_B}$ است و N مرتبه تکرار لایه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین طول موج نور فرودی $\lambda = 1550 \text{ nm}$ و قطبش آن خطی در نظر گرفته شده است. فرض شده است که راستای انتشار نور عمود بر تناوب لایه‌ها باشد و میدان مغناطیسی خارجی نیز در راستای انتشار نور به کل ساختار اعمال شود. اعمال این میدان مغناطیسی، بر روی لایه‌های دی‌الکتریکی A و B بی‌تاثیر است، ولی باعث مغناطیده شدن لایه مگنتوپتیکی M خواهد شد.

بحث و نتیجه‌گیری

نوری با قطبش خطی را در نظر می‌گیریم که به صورت قائم بر روی ساختار فرود می‌آید. همان‌طور که اشاره شد، این نور با قطبش خطی را می‌توان برآیند دو پرتو با قطبش‌های دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد با دامنه‌های یکسان در نظر گرفت. در ادامه با استفاده از روش ماتریس انتقال 4×4 ویژگی‌های تراگسیلی هر کدام از این قطبش‌های دایروی را بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و نیز بر حسب تغییر المان قطری e_{xx} مطالعه می‌کنیم.

شکل 1(a)، تغییرات ضریب تراگسیل قطبش راست‌گرد بر حسب ضخامت لایه نقص و تغییر المان قطری تانسور گذردهی الکتریکی e_{xx} برای مرتبه تکرار $N = 3$ را نمایش داده است. مشاهده می‌شود که با افزایش e_{xx} نوارهای باریک تراگسیل در شکل به وجود آمده و به ازای ضخامت‌های مشخصی، ساختار برای قطبش راست‌گرد نور دارای تراگسیل قابل توجهی می‌شود. در شکل 1(b)، رفتار ضریب تراگسیل قطبش راست‌گرد (T_+) به ازای $e_{xx} = 0$ و $e_{xx} = 0.06$ و با تغییر ضخامت لایه نقص نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای ضخامت‌های خاصی، تراگسیل (T_+)

در این روابط $N_{\pm}^{(j)} = \sqrt{e_{xx}^{(j)} \pm i e_{xy}^{(j)}}$ ضریب شکست مختلط لایه را برای قطبش‌های راست‌گرد و چپ‌گرد نمایش می‌دهد. همچنین $b_{\pm}^{(j)} = \frac{2p}{\lambda} N_{\pm}^{(j)} d^{(j)}$ که در آن $d^{(j)}$ ضخامت لایه j-ام و λ طول موج نور فرودی است.

بنابراین با مشخص بودن طول موج نور فرودی، ضخامت و المان‌های تانسور دی‌الکتریکی هر لایه می‌توان ماتریس S را برای آن لایه تشکیل داد. سپس با استفاده از رابطه (3) ماتریس انتقال کل ساختار را به دست آورد. با در دست داشتن المان‌های ماتریس انتقال کل، ضرایب تراگسیل دامنه قطبش‌های دایروی راست‌گرد (t_+) و چپ‌گرد (t_-) از روابط زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$t_+ = \frac{1}{M_{11}}, \quad t_- = \frac{1}{M_{33}} \quad (6)$$

همچنین، تراگسیل کل ساختار و نیز چرخش فارادی آن را می‌توان با استفاده از روابط زیر به دست آورد:

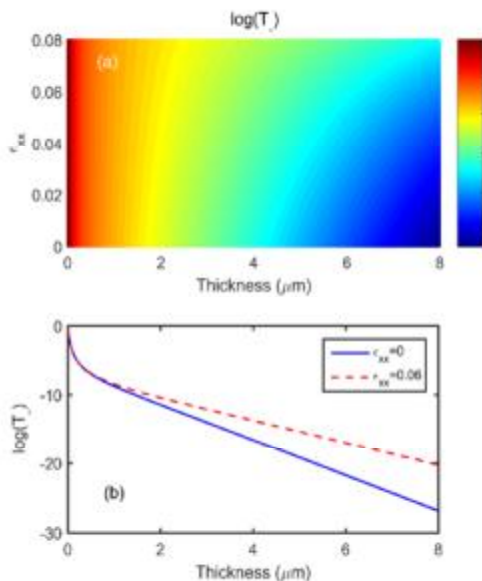
$$T = \frac{1}{2} (|t_+|^2 + |t_-|^2), \quad (7)$$

$$(8)$$

$$Q_F = \frac{1}{2} (j_+ - j_-),$$

در رابطه (8) $j_+ = \arg(t_+)$ و $j_- = \arg(t_-)$ به ترتیب فازهای پرتوهای قطبیده دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد را نمایش می‌دهند.

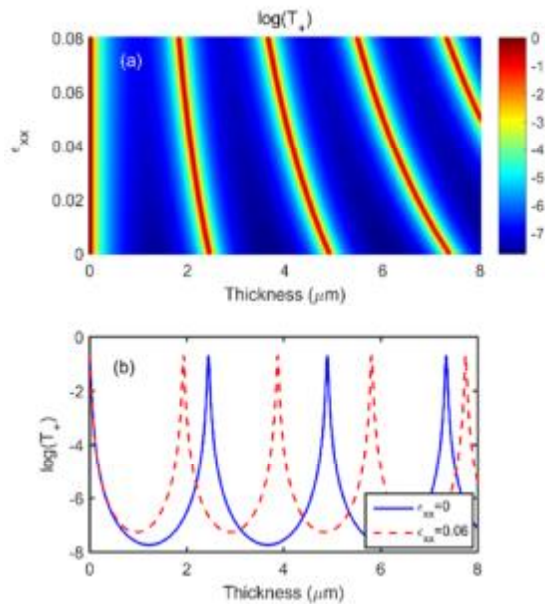
می‌کند. با مقایسه‌های شکل‌های 1 و 2 می‌توان نتیجه گرفت که ساختار بلور فوتونی دارای لایه نقص مگنتوپتیکی با اپسیلون - نزدیک - صفر، برای قطبش راست‌گرد نور می‌تواند دارای ضریب تراگسیل قابل توجه باشد. این شرایط مساعد را می‌توان با انتخاب مناسب ضخامت لایه نقص و نیز تنظیم e_{xx} به دست آورد. اما در مقابل برای قطبش چپ‌گرد ضریب تراگسیل همواره صفر خواهد بود.



شکل 2. (a) تغییرات ضریب تراگسیل قطبش چپ‌گرد بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و تغییر e_{xx} برای ساختاری با $N = 3$ (b) رفتار ضریب تراگسیل قطبش چپ‌گرد بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و برای همین ساختار با دو مقدار $e_{xx} = 0$ (خط ممتد آبی) و $e_{xx} = 0.06$ (خط چین قرمز).

با توجه به اینکه در ضخامت‌های کم، هر دو قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد مقداری تراگسیل دارند؛ بنابراین در این ضخامت‌ها می‌توان چرخش فارادی را تعریف کرد و به صورت محاسباتی به دست آورد. در ادامه این چرخش فارادی برای محدوده ضخامتی $[0 - 1.75] \text{mm}$ لایه M محاسبه شده است. زاویه چرخش فارادی نسبت به امتداد قطبش خطی نور فرودی مد نظر قرار داده شده است. شکل 3(a) تغییرات چرخش فارادی نور خروجی از بلور بر حسب تغییر ضخامت و

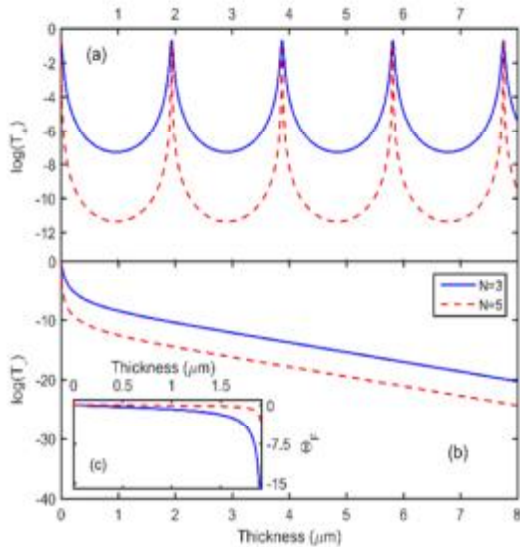
بیشینه شده است و همچنین رفتار (T_{\perp}) بر حسب d نیز خاصیت تناوبی دارد. دوره تناوب این رفتار وابسته به e_{xx} بوده و همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش e_{xx} ، این دوره تناوب کاهش می‌یابد.



شکل 1. (a) تغییرات ضریب تراگسیل قطبش راست‌گرد بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و تغییر e_{xx} برای ساختاری با $N = 3$ (b) رفتار ضریب تراگسیل قطبش راست‌گرد برای همین ساختار بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و برای دو مقدار $e_{xx} = 0$ (خط ممتد آبی) و $e_{xx} = 0.06$ (خط چین قرمز).

شکل 2(a) نیز تغییرات ضریب تراگسیل قطبش چپ‌گرد با تغییر ضخامت لایه نقص و نیز با تغییر المان قطری تانسور گذردهی الکتریکی لایه نقص را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار قطبش چپ‌گرد بسیار متفاوت از رفتار قطبش راست‌گرد است. به طوری که تراگسیل آن بسیار نزدیک صفر است و نوارهای تراگسیلی نیز به وجود نمی‌آیند. در شکل 2(b) تغییرات ضریب تراگسیل قطبش چپ‌گرد بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و به ازای دو مقدار $e_{xx} = 0$ و $e_{xx} = 0.06$ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌ازای ضخامت‌های اندک این ضریب نزدیک صفر است و با افزایش ضخامت، با تقریب بیشتری به صفر میل

شکل 4(b) تغییرات ضریب تراگیسل قطبش چپ‌گرد بر حسب ضخامت و تعداد لایه‌های تکرار $N=3,5$ را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که به ازای هر دو مقدار N ، ضریب تراگیسل قطبش چپ‌گرد به سمت صفر میل می‌کند ولی شیب‌های این فرایندها با هم برابر نیست. شکل 4(c) نحوه تغییرات زاویه چرخش فارادی بر حسب ضخامت و تعداد لایه‌های تکرار است. این شکل نیز نشان می‌دهد که به ازای اعداد تکرار بزرگ‌تر، اندازه زاویه چرخش فارادی رشد سریع‌تری دارد.

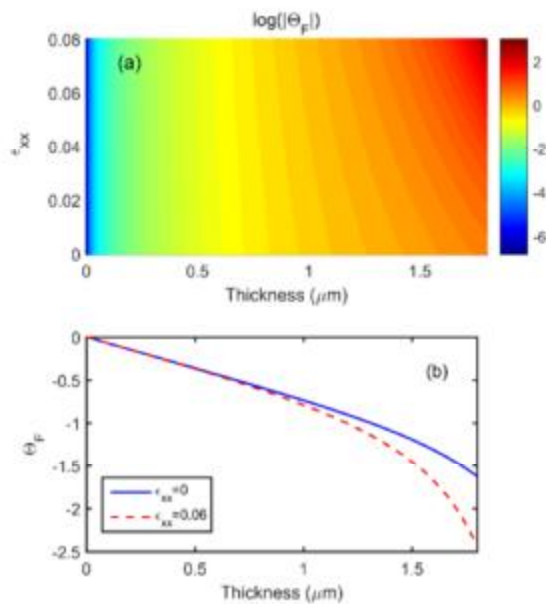


شکل 4. (a) رفتار ضریب تراگیسل قطبش راست‌گرد بر حسب تغییر ضخامت تعداد لایه‌های تکرار $N=3$ با (خط آبی ممتد) و $N=5$ با (خط چین قرمز)، (b) رفتار ضریب تراگیسل قطبش چپ‌گرد بر حسب ضخامت و تعداد لایه‌های تکرار $N=3$ با (خط آبی ممتد) و $N=5$ با (خط چین قرمز)، (c) رفتار چرخش فارادی بر حسب ضخامت و تعداد لایه‌های تکرار $N=3$ با (خط آبی ممتد) و $N=5$ با (خط چین قرمز).

نتیجه‌گیری

ضرایب تراگیسل قطبش‌های دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد و نیز زاویه چرخش فارادی بلور فوتونی یک بعدی حاوی لایه نقص مگنتوپتیکی با اپسیلون نزدیک صفر مطالعه و بررسی شد.

تغییر e_{xx} نمایش داده شده است. همچنین در شکل 3(b) نیز این تغییرات به ازای دو مقدار $e_{xx}=0$ و $e_{xx}=0.06$ نشان داده شده است. بدیهی است که به‌ازای ضخامت‌های بیشتر از 1.75 mm ، چون تراگیسل قطبش چپ‌گرد با تقریب بسیار خوبی صفر می‌شود؛ بنابراین زاویه چرخش فارادی نمی‌تواند تعریف شود. در شکل 3 ملاحظه می‌گردد که با تغییر ضخامت به ازای هر e_{xx} مشخص اندازه زاویه چرخش فارادی افزایش می‌یابد و میزان این افزایش با بیشتر شدن e_{xx} نیز افزون‌تر می‌گردد. شکل 4(a) تغییرات ضریب تراگیسل قطبش راست‌گرد بر حسب ضخامت و تعداد لایه‌های تکرار ($N=3$) با خط ممتد آبی) و ($N=5$ با خط چین قرمز) را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که رفتار ضریب تراگیسل راست‌گرد به صورت تناوبی است و با افزایش تعداد لایه‌ها صفر شدن این ضریب با شیب تندی صورت می‌پذیرد؛ همچنین مشاهده می‌شود که تغییر تعداد لایه‌های ساختار، نقشی در جابه‌جایی نقاط بیشینه T_+ ندارد.



شکل 3. (a) تغییرات چرخش فارادی بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص و تغییر e_{xx} برای ساختاری با $N=3$ ، (b) رفتار چرخش فارادی بر حسب تغییر ضخامت لایه نقص با همین ساختار و با دو مقدار $e_{xx}=0$ (خط ممتد آبی) و $e_{xx}=0.06$ (خط چین قرمز).

تراگسیل قطبش چپ گرد همواره برای این ساختار صفر خواهد بود. هم چنین پاسخهای ساختار به ازای تعداد لایه های مختلف نیز بررسی و با هم مقایسه شد.

نتایج نشان می دهد که در صورت انتخاب مناسب ضخامت لایه نقص و نیز تغییر المان قطری تانسور گذردهی الکتریکی این لایه، می توان تراگسیل کامل ($T=1$) را برای قطبش راست گرد دایروی به دست آورد. در صورتی که ضریب

منابع

- [1] L. Maigyte & K. Staliunas, Spatial filtering with photonic crystals. *Appl. Phys. Rev.* 2 (2015) 011102.
- [2] E. Yablonovitch, Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2059 – 2062.
- [3] S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2486–2489.
- [4] D.W. Prater, SH. Shi, A. Sharkawy, J. Murakowski and G.J. Schneiderf, Photonic Crystal: Theory, Applications, and Fabrication. J. Wiley & Sons Publication (2009).
- [5] M. Inoue, R. Fujikawa, A. Baryshev, A. Khanikaev, P.B. Lim, H. Uchida, O. Aktsipetrov, A. Fedyanin, T. Murzina, & A. Granovsky, Magnetophotonic crystals. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39, (2006) R151-R161.
- [6] I. L. Lyubchanskii, N.N. Dadoenkova, M.I. Lyubchanskii, E. A. Shapovalov, and Th. Rasing, Magnetic photonic crystals. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003) R277-R287.
- [7] P.S. Pershan, Magneto-optical effects. *J. Appl. Phys.* 38 (1967) 1482-1490.
- [8] R. M.A. Azzam, and N.M. Bashara, Ellipsometry and polarized light. North Holland, 3rd reprint (1999).
- [9] M. Faraday, Diary entry on first observation of rotation of plane of polarization (1845), Faraday's Diary, G. Bell & Sons, Ltd. (1932).
- [10] H. Kato & M. Inoue. Reflection-mode operation of one-dimensional magneto-photonic crystals for use in film-based magneto-optical isolator devices. *J. Appl. Phys.* 91 (2002) 7017-7019.
- [11] H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, and M. Inoue. Properties of one-dimensional magneto-photonic crystals for use in optical isolator devices. *IEEE Trans. Magnetics* 38 (2002) 3246-3248.
- [12] Q. Wang, Zh. Ouyang & Q.Liu. Multiport photonic crystal circulators created by cascading magneto-optical cavities. *J. Opt. Soc. Am. B* 28 (2011) 703-708.
- [13] D.R. Smith, J.B. Pendry & M.C. Wiltshire. Metamaterials and negative refractive index. *Science* 305 (2004) 788-792.
- [14] R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science* 292 (2001) 77-79.
- [15] D. Lu, and Zh. Liu. Hyperlenses and metalenses for far-field super-resolution imaging. *Nat. Commun.* 3 (2012) 1205.
- [16] J. Valentine, J.Li, Th. Zentgraf, G. Bartal, and X. Zhang. An optical cloak made of dielectrics. *Nat. Mater.* 8 (2009) 568-571.
- [17] A. Alú, M.G. Silveirinha, and N. Engheta, Transmission-line analysis of ϵ -near-zero-filled narrow channels. *Phys. Rev. E* 78 (2008) 016604-016614.
- [18] M. Silveirinha & N. Engheta, Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials. *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 157403.
- [19] B. Edwards, A. Alù, M.E. Young, M. Silveirinha, and N. Engheta. Experimental verification of epsilon – near - zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide. *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 033903.
- [20] A. Davoyan, A.M. Mahmoud, and N. Engheta. Optical isolation with epsilon-near-zero metamaterials. *Opt. Exp.* 21 (2013) 3279-3286.
- [21] A. Davoyan, & N. Engheta. Wave propagation in magnetized epsilon-near-zero

- metamaterials. In CLEO: QELS _ Fundamental Science, pp. FM1C-1. Optical Society of America, (2014).
- [22] R. Abdi - Ghaleh, and R. Suldozi. Magneto - optical characteristics of layered Epsilon – Near - Zero metamaterials. Superlattices and Microstructures 97 (2016) 242-249.
- [23] S. Višňovský, K. Postava, T. Yamaguchi, Magneto - optic polar Kerr & Faraday effects in magnetic superlattices. Czech. J. Phys. 51, (2001) 917-949.
- [24] R. Abdi - Ghaleh, and A. Namdar, Circular polarization bandpass filters based on one - dimensional magnetophotonic crystals. J. Mod. Optics 60, (2013) 1619-1626.