

بررسی اثر مغناطوآپتیکی فارادی در بلورهای مغناطوفوتونی یک بعدی با شبیه سازی المان متناهی

تهمینه جلالی^{1*}، محمد رستگار²

1. استادیار رشته فیزیک، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

2. دانشجوی دکتری فیزیک، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: 1397/06/16 تاریخ پذیرش: 1397/08/20

Investigation of Magneto-Optical Faraday Effect in One-dimensional Magneto-photonic Crystals by Finite Element Simulation

T. Jalali^{1*}, M. Rastegar²

1. Assistant Professor, Physics Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

2. PhD Student, Physics Department, Payame Noor University

Received: 2018/09/07 Accepted: 2018/11/11

Abstract

Optical and magneto-optical responses of magneto-photonic crystals (MPCs) with a magnetic defect layer sandwiched between two dielectric Bragg mirrors have been investigated, which have potential application in integrated-optics devices. The Bragg mirrors are periodic multilayered films composed of SiO₂ and Ta₂O₅ coatings. By introducing Ce:YIG magnetic defect layer, the enhancement of rotation angle and transmittance value, have been reported. By using of Finite Element Method (FEM), we have simulated the electric field profile in MPCs and investigated the effect of defect layer thickness on Faraday rotation angles. As a result of localization of light at magnetic defect layer and strong light-matter coupling in MPCs, the magneto-optical responses of these structures, are mostly increased near the PBG edges. The structure with a half wavelength optical thickness of defect layer is most suitable for practical applications.

Keywords

Magneto-Optics, Magnetophotonic Crystals, Transmittance, Faraday Rotation.

چکیده

پاسخ‌های اپتیکی و مغناطوآپتیکی بلورهای مغناطوفوتونی با لایه نقص مغناطیسی که در بین دو آینه براگ دی‌لکتریک احاطه شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختارها دارای پتانسیل بالقوه‌ای برای کاربرد در ابزارهای مغناطوآپتیکی و اپتیک مدارهای مجتمع می‌باشند. آینه‌های براگ، متشکل از ساختارهای چندلایه از مواد SiO₂ و Ta₂O₅ می‌باشد. با معرفی ماده Ce:YIG به عنوان لایه نقص مغناطیسی، افزایش عبور و زاویه دوران فارادی گزارش شده است. با استفاده از روش المان متناهی، توزیع میدان الکتریکی در طول بلورهای مغناطوفوتونی، را شبیه‌سازی کردیم. همچنین اثر ضخامت لایه نقص بر روی زاویه دوران فارادی، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اثر جایگزینی نور در لایه نقص مغناطیسی و برهمکنش شدید بین نور و ماده در بلورهای مغناطوفوتونی، پاسخ‌های مغناطوآپتیکی این ساختارها، در نزدیکی لبه‌های گاف نوری افزایش یافته‌اند. ساختاری با ضخامت اپتیکی نصف طول موج، مناسب‌ترین انتخاب برای کاربردهای عملی می‌باشد.

کلمات کلیدی :

مغناطوآپتیک، بلورهای مغناطوفوتونی، عبور، دوران فارادی.

مقدمه

در دو دهه گذشته، نیاز به دستیابی به سرعت‌های بالاتر در زمینه انتقال اطلاعات در دستگاه‌های مخابراتی و کنترل برهمکنش نور با ماده، منجر به جایگزینی فوتون به جای الکترون در دستگاه‌های مخابراتی شده است. این امر مبدا ایجاد ابزارهای مخابرات نوری است. به صورت ویژه، بلورهای فوتونی که دارای عرض نواری بزرگ می‌باشند، کاندیدهای خوبی برای کاربرد در ابزارهای مخابرات اپتیکی و مدارهای مجتمع نوری می‌باشند. بلورهای فوتونی، ساختارهای متناوب با مدولاسیون ضریب شکست در یک، دو و سه بعد هستند. دوره تناوب این بلورهای فوتونی، قابل مقایسه با طول موج انتشار یافته در ساختار می‌باشد [1]. با تنظیم خواص ساختاری و تغییر مواد به کار رفته در این ساختارها، خواص اپتیکی این ساختارها برای کاربردهای عملی، تنظیم می‌شوند [2-3].

گاف موجود در ساختار نواری بلورهای فوتونی، منشا کاربردهای اپتیکی این ساختارها می‌باشد. گاف نواری فوتونی¹ در این ساختارها، معرف محدوده ای از طول موج ها یا بسامدها می‌باشد که به ازای آنها، امکان انتشار نور در ساختارها وجود ندارد. این گاف، با ایجاد بازتاب قوی، مانع از عبور موج الکترومغناطیسی می‌شود [1]. اثرات اپتیکی بسیاری، وابسته به انتشار نور در ساختارهای بلور فوتونی می‌باشد. از جمله این اثرات می‌توان به جایگزینی فضای نور² [4]، تولید هماهنگ دوم و سوم در اپتیک غیرخطی [6 و 5]³، دوپایایی [7]⁴ و... می‌باشد. مطالعات بیشتر بر روی چگالی حالت‌های فوتونی و کنترل گسیل خودبه خودی در بلورهای فوتونی، توسط یابلونوویچ و جان انجام شده است [8]. اساس ساخت ابزارهایی مانند موجبرها و میکروکاوکها، ایجاد نقص خطی و نقطه‌ای در ساختار فضایی متناوب بلورهای فوتونی است. این ابزارها در

فیلترها، دیودهای ساطع کننده نور، لیزرها، جداکننده‌های توان و... کاربرد دارند [9]. زمانی که نقص موجود در ساختارها و یا یکی از مواد تشکیل دهنده ساختار، ماده مغناطیسی باشد، بلور مغناطوفوتونی تشکیل می‌شود [10-12 و 3]. اثرات مغناطوپتیکی مانند چرخش فارادی و کر، ناشی از تاثیر میدان مغناطیسی بر روی خواص اپتیکی بلورهای مغناطوفوتونی است [13]. در سال‌های اخیر، توجه زیادی به اثرات مغناطوفوتونی مانند اثرات دوران فارادی و کر، معطوف شده است [14-16]. کاربردهای جدید بلورهای مغناطوفوتونی ناشی از شکستن تقارن عکس زمان می‌باشد. امروزه ابزارهایی مانند ایزولاتورهای اپتیکی⁵ و چرخنده‌های اپتیکی⁶ در مخابرات اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پاسخ‌های مغناطوپتیکی بلورهای مغناطوفوتونی یک بعدی در مطالعات گذشته به صورت تئوری و آزمایشگاهی انجام شده است [15، 17-23]. همچنین بلورهای مغناطوفوتونی با افزایش اثر چرخش فارادی و کر، قابلیت کاربرد در ابزارهای اسپینترونیک را دارا می‌باشند. یکی از موانع ساخت بلورهای مغناطوفوتونی با آینه براگ مغناطیسی، کنترل ضخامت لایه مغناطیسی برای عملکرد با کیفیت بالا و مناسب بازتاب کننده می‌باشد. به دلیل هزینه بالای ساخت ابزارهای بلور فوتونی، روش‌های محاسباتی را برای مدل سازی دقیق و طراحی این ساختارها به کار می‌گیرند. چندین روش برای تحلیل عددی بلورهای مغناطوفوتونی به کار رفته است. از جمله این روش ها می‌توان روش ماتریس انتقال⁷، تفاوت معین دامنه زمانی⁸ و روش المان متناهی⁹ را نام برد. در این پژوهش از روش المان متناهی جهت شبیه سازی ساختارها و محاسبه پاسخ‌های اپتیکی و مغناطوپتیکی استفاده شده است. تحلیل خواص فیزیکی غیرخطی، از جمله مزایای استفاده از این روش محاسباتی می‌باشد.

5. Optical isolator

6. Optical Circulator

7. Transfer Matrix Method

8. Finite Difference Time Domain

9. Finite Element Method

1. Photonic Band Gap

2. Spatial light localization

3. Second and third harmonic generation

4. Bistability

انتشار موج الکترومغناطیسی و خواص عبوری آنها از طریق روش محاسبه ماتریسی امکان پذیر است. براساس پراش براگ، تداخل ویرانگر بین بازتاب‌های چندگانه از لایه‌های تشکیل دهنده ساختار، منجر به بازتاب نور فرودی به ساختارهای لایه‌ای، در یک محدوده طول موجی خاص می‌شود. این محدوده طول موجی، معرف گاف نواری فوتونی می‌باشد، جایی که مقادیر عبور برای موج الکترومغناطیسی تقریباً صفر است. با ترکیب معادلات ماکسول، می‌توان معادله موج انتشاری در ماده مغناطیسی را به صورت زیر نوشت:

$$\tilde{\mathbf{N}}' (m^{-1} \tilde{\mathbf{N}}' E) - k_0^2 \left(\frac{\mathbf{e} - i\mathbf{s}}{w\mathbf{e}_0} \right) E = 0 \quad (1)$$

که در آن \mathbf{e} و m به ترتیب گذردهی الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی محیط می‌باشند. اثر اصلی اعمال میدان مغناطیسی، ظهور عناصر غیرقطری در تانسور گذردهی محیط مغناطیسی است. لذا تانسور گذردهی برای محیط مغناطیسی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی در راستای محور Z است، به صورت زیر تعریف می‌شود [13، 24-25]:

$$\mathbf{e}_M = \begin{pmatrix} \frac{\epsilon}{\epsilon_0} e_{xx} & -iQe_{xy} & 0 \\ iQe_{xy} & e_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & e_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن

$$\mathbf{e}_{xy} = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{e}_{xx} + \mathbf{e}_{yy}) \quad (3)$$

$$Q = \frac{l}{p\sqrt{e_{xy}}} \cdot B_z V_M \quad (4)$$

Q پارامتر مغناطوپتیکی، V_M ثابت وردت و B_z میدان مغناطیسی می‌باشد. ثابت وردت را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

در این مقاله به بررسی نظری بلورهای مغناطوفوتونی و خواص اپتیکی آنها می‌پردازیم. شبیه سازی ساختارهای مغناطوفوتونی چندلایه را با استفاده از روش المان متناهی انجام می‌دهیم. ساختارهایی با ضخامت‌های متفاوت از لایه نقص، مورد بررسی قرار گرفته و زاویه دوران فارادی برای آنها محاسبه می‌شوند. همچنین به مقایسه خواص مغناطوپتیکی این ساختارها، خواهیم پرداخت.

بلورهای مغناطوفوتونی و دوران فارادی

با اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر ماده‌ای با خواص مغناطیسی، این ماده مغناطیده شده و اثرات مغناطوپتیکی مانند اثر دوران فارادی را نشان می‌دهد. اثر دوشکستی^۱ برای موج قطبیده دایره‌ای راستگرد و چپگرد، منشا ایجاد اثر دوران فارادی می‌باشد. در نتیجه اثر دوشکستی، صفحه قطبیدگی نور اولیه با قطبیدگی خطی، هنگام عبور از ساختار مغناطوپتیکی می‌چرخد. این چرخش را تحت عنوان اثر دوران فارادی می‌شناسند [13]. افزایش خواص مغناطوپتیکی این ساختارها به همراه ابعاد مینیاتوری آنها (میکرومتر و نانومتر)، از جمله خواص ممتاز و قابل توجه آنها جهت کاربردهای عملی از جمله استفاده در مدارهای اپتیکی می‌باشند.

اکثر ساختارهای چندلایه مورد کاربرد در مخابرات اپتیکی به گونه ای طراحی شده اند که ضخامت اپتیکی هر یک از لایه‌های آنها برابر نیم طول موج یا ربع طول موج انتشار یافته در ساختار می‌باشند. زمانی که ضخامت اپتیکی یکی از لایه ها برابر طول موج انتشار یافته در ساختار باشد، در آن صورت میزان انعکاس به طرز خارق العاده ای افزایش می‌یابد. این امر مربوط به خواص براگ تداخل‌های اپتیکی می‌باشد. ساختارهای چندلایه دارای کاربردهای وسیعی در ساخت توری‌های براگ^۲، فیلترهای اپتیکی^۳ و آینه‌های دی الکتریک^۴ می‌باشند. تحلیل

1. Birefringence
2. Bragg Gratings
3. Optical filters
4. Dielectric mirrors

المان متناهی شبیه‌سازی کرد [27 و 26]. برای مطالعه ساختارهای مغناطوفوتونی، معادله 1 با استفاده از شرایط مرزی دوره‌ای^۳ حل می‌شود:

$$\hat{n}' (E_1 - E_2) = 0 \quad (7)$$

$$\hat{n}' (H_1 - H_2) = 0 \quad (8)$$

همچنین از شرایط مرزی پراکندگی^۴ به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \hat{n}' (\vec{N}' E) - ik\hat{n}' (E' \hat{n}) = \\ - \hat{n}' (E_0' (ik(\hat{n} - \hat{k}_{dir}))) \cdot \exp(-\hat{k}_{dir} \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (9)$$

در این روابط، \hat{n} بردار نرمال سطح، E_0 میدان الکتریکی اولیه و \hat{k}_{dir} بردار موج اولیه است. اولین مرحله مربوط به ساختار مش^۵ و شرایط آن است. شرایط مش به گونه‌ای باید باشد که دقت محاسبات را تا حد امکان بالا برده و حافظه سیستمی مصرف شده برای ذخیره نتایج محاسبات را کاهش دهد. در واقع تعادلی بین این دو فاکتور باید برقرار شود. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی شبیه‌سازی شده برای محاسبه سایر پارامترهای اپتیکی به کار می‌رود. بدین ترتیب می‌توان خواص مغناطوآپتیکی بلورهای مغناطوفوتونی را به دست آورد.

بلورهای مغناطوفوتونی که در این کار پژوهشی بررسی می‌شوند، متشکل از لایه مغناطیسی $(M)^x Ce: YIG$ هستند که توسط دو آینه براگ دی‌الکتریک احاطه شده است. آینه‌های براگ دی‌الکتریک متشکل از لایه‌های متناوب از مواد $(D1) SiO_2$ و $(D2) Ta_2O_5$ می‌باشند که ضخامت اپتیکی هر یک از این لایه‌ها برابر ربع طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر) است. ماده مغناطیسی

$$V_M = \frac{e}{2mc^2} \left| \frac{dn}{dl} \right| \quad (5)$$

این پارامتر وابسته به دما، شرایط محیطی و طول موج نور می‌باشد. اثر دوران فارادی، نتیجه برهمکنش نور و ماده است، زمانی که ماده تحت تاثیر میدان مغناطیسی در جهت موازی با راستای اعمال موج الکترومغناطیسی است. در ساده ترین حالت، زاویه دوران فارادی متناسب با ثابت وردت، بزرگی میدان مغناطیسی و مسافت طی شده توسط موج در محیط است:

$$q = V_M B_z L \quad (6)$$

روش المان متناهی و مدل‌سازی

شبیه‌سازی و محاسبات در روش المان متناهی براساس 6 مرحله است:

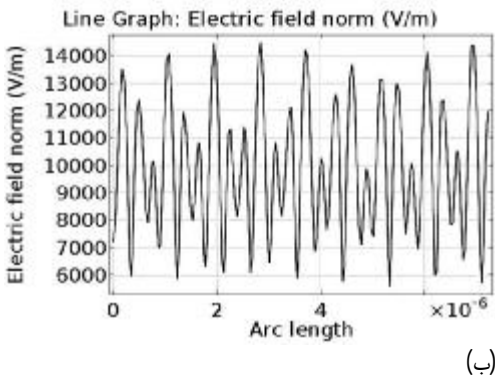
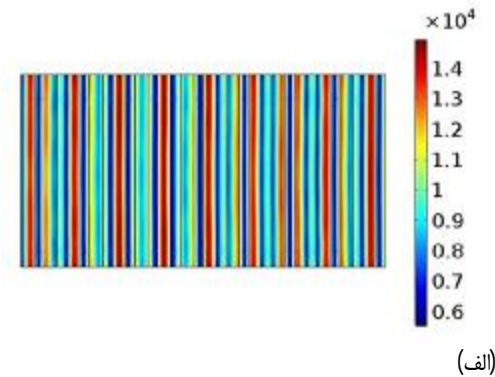
- 1) تقسیم فضای محاسباتی به المان‌های مشخص.
- 2) معرفی تابع تعیین کننده خواص فیزیکی هر المان.
- 3) به دست آوردن معادلات تعیین کننده خواص فیزیکی برای هر المان.
- 4) ترکیب معادلات مربوط به المان‌ها و تشکیل سیستم معادلات.
- 5) به کار بردن شرایط مرزی در هر راس از المان.
- 6) حل سیستم معادلات.

فرمولاسیون روش المان متناهی براساس روش‌های وزنی باقیمانده^۱ و کمینه انرژی پتانسیل می‌باشد. با حذف معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات معمولی، مسئله با روش‌های ساده‌تر مانند روش اولیو^۲ حل می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط مرزی و خواص فیزیکی مسئله، معادلات ماکسول حل می‌شود. با استفاده از این شرایط، انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های اپتیکی، شبیه‌سازی می‌شود. ابزارهای اپتیکی مانند موجبرها، کاواک‌ها، فیلترها و... را می‌توان در فضای محاسباتی روش

3. Periodic Boundary Condition
4. Scattering Boundary Condition
5. Mesh
6. Cerium substituted yttrium iron garnet

1. Weighted residual methods
2. Euler method

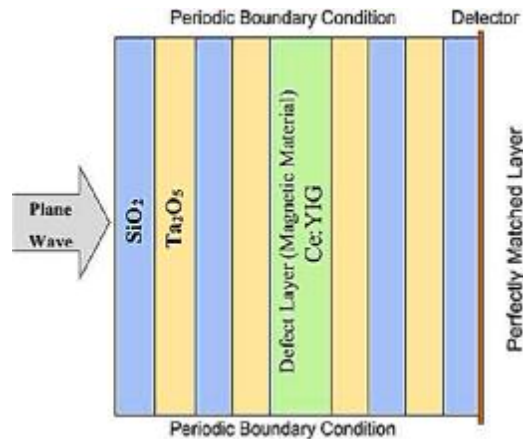
لایه آن SiO_2 و 8 لایه دیگر از جنس Ta_2O_5 می‌باشد. توزیع میدان الکتریکی در ساختار چندلایه فوق، در شکل 2 نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، توزیع میدان الکتریکی در ساختار فوق، به صورت تقریباً یکنواخت می‌باشد. به دلیل عدم وجود لایه نقص در این ساختار، هیچ گونه جایگزینی نور یا افزایش غیرعادی شدت میدان در طول ساختار دیده نمی‌شود. این ساختار در غیاب ماده مغناطیسی، فاقد هر گونه اثرات مغناطوپتیکی می‌باشد. همچنین طیف عبور مربوط به این ساختار، در شکل 3، نشان داده شده است.



شکل 2. الف) توزیع میدان الکتریکی و ب) بزرگی میدان الکتریکی در طول ساختار $(D1/D2)^m$ با عدد دوره تکرار 8.

دارای ضرایب گذردهی $e_{xx} = e_{yy} = 1/88$ و $(0/009)$ $e_{xy} = i$. در طول موج 1550 نانومتر می‌باشد.

به دلیل جذب بسیار کم و پاسخ‌های مغناطوپتیکی بزرگ در ناحیه فروسرخ، این مواد برای کاربردهای اپتیکی بسیار جذاب می‌باشند. شکل 1، معرف ساختار کلی و شرایط مرزی مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد.

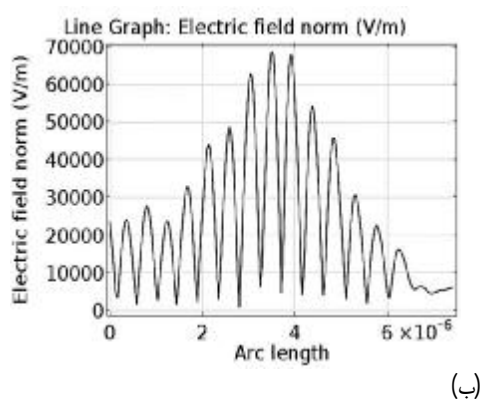
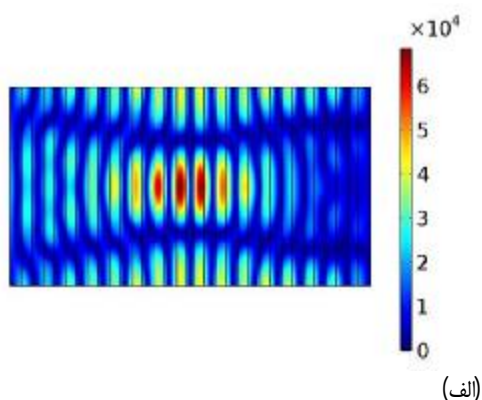


شکل 1. ساختار کلی بلورهای مغناطوفوتونی متشکل از لایه مغناطیسی در وسط و لایه‌های متناوب دی‌الکتریک در دو طرف لایه نقص، به همراه شرایط مرزی مربوط به روش المان متناهی.

بحث و نتیجه‌گیری

ساختارهای مورد مطالعه ما در این پژوهش، متشکل از لایه نقص مغناطیسی در وسط ساختار می‌باشند که در دو طرف آن، دو ساختار بلور فوتونی دی‌الکتریک، قرار دارد که معرف آینه‌های براگ دی‌الکتریک می‌باشند. این امر منجر به وجود تقارن وارونی فضایی برای ساختار می‌شود. ابتدا ساختاری بدون لایه نقص مغناطیسی را در نظر می‌گیریم. این ساختار معرف یک بلور فوتونی دی‌الکتریک با ضابطه ساختاری $(D1/D2)^m$ است که در آن، m عدد دوره تکرار مربوط به ساختار دوتایی مواد دی‌الکتریک است.

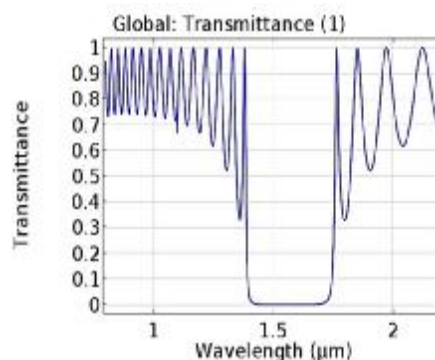
در ساختار یاد شده بالا، عدد دوره تکرار را برابر 8 در نظر می‌گیریم. لذا ساختار فوق دارای 16 لایه می‌باشد که 8



شکل 4. الف) توزیع میدان الکتریکی و ب) بزرگی میدان الکتریکی در طول ساختار $(D1/D2)^8 (M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی به اندازه ربع طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).

گاف نواری فوتونی حول طول موج $1/55$ میکرومتر رخ می‌دهد و محدوده بین طول موج $1/41$ میکرومتر تا $1/74$ میکرومتر را پوشش می‌دهد.

خصوصیت مهم قسمت‌های (الف) و (ب) شکل 5، وجود دو قله در طول موج‌های منطبق بر لبه گاف نواری فوتونی می‌باشد، یکی از آنها در طول موج $1/41$ میکرومتر و دیگری در طول موج $1/74$ میکرومتر اتفاق افتاده است. در طول موج $1/74$ میکرومتر، عبور نزدیک به 1 و زاویه دوران فارادی به $0/72$ درجه رسیده است. در محدوده گاف نواری، چند قله در طیف زاویه دوران دیده می‌شود که به دلیل مقادیر ناچیز عبور، برای کاربردهای اپتیکی مناسب نمی‌باشند.



شکل 3. نمودار طیف عبور مربوط به ساختار $(D1/D2)^m$ با عدد دوره تکرار 8.

با توجه به شکل 3، گاف نواری فوتونی، محدوده طول موج بین $1/4$ میکرومتر تا $1/75$ میکرومتر را پوشش می‌دهد. در این منطقه، عبور به صفر رسیده است. حالت بعدی که مورد مطالعه قرار گرفته، متشکل از یک لایه نقص مغناطیسی (Ce:YIG) با ضخامت اپتیکی ربع طول موج ساختار $\lambda/4$ است که در آن طول موج برابر 1550 نانومتر است. این لایه نقص مغناطیسی در بین دو بلور فوتونی دی الکتریک با ضابطه $(D1/D2)^8$ قرار گرفته است. توزیع میدان الکتریکی در طول این ساختار را با استفاده از روش المان متناهی مطابق شکل 4، به دست آورده ایم. حضور لایه نقص مغناطیسی در وسط ساختار، منجر به جایگزینی شدید نور در محل لایه نقص و اطراف آن شده است. مطابق شکل 4 (ب)، بزرگی میدان الکتریکی در لایه نقص مغناطیسی حدوداً 3 برابر اندازه میدان در ابتدای ساختار بلور مغناطوفوتونی است. این امر منجر به افزایش برهمکنش نور با لایه مغناطیسی می‌شود. این امر سبب افزایش طول مسیر اپتیکی در محیط مغناطیسی و در پی آن، افزایش خواص مغناطو اپتیکی ساختار خواهد شد. نمودار طیف عبور و زاویه دوران فارادی برای این ساختار را در شکل 5 نشان داده‌ایم.

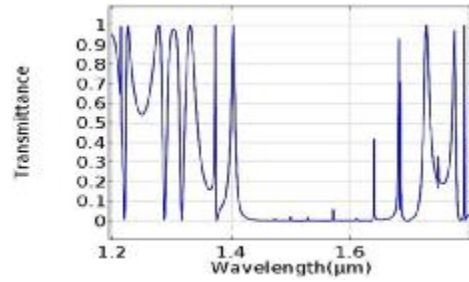
ساختار مورد مطالعه بعدی، دارای نقص مغناطیسی با ضخامت اپتیکی نصف طول موج مشخصه ساختار، 2λ و دو برابر ضخامت اپتیکی ساختار قبلی می‌باشد. ضابطه این ساختار، به صورت می‌باشد. توزیع میدان الکتریکی در طول این ساختار را در شکل 6 نمایش داده‌ایم.

به علت جایگزینی نور، شدت میدان در اطراف لایه نقص به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. شدت میدان در محل لایه نقص، حدوداً 5 برابر لایه اولیه است. لذا میزان جایگزینی میدان نسبت به حالت قبلی افزایش یافته است. انتظار می‌رود که خصوصیات مغناطوایتیکی این ساختار نسبت به ساختار قبلی، افزایش یابد.

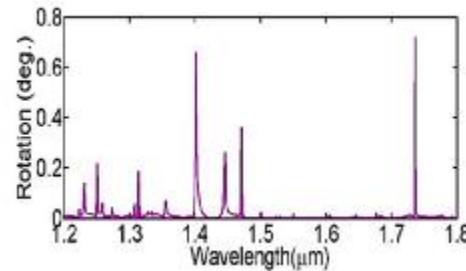
در ادامه نمودار طیف عبور و زاویه دوران فارادی برای این ساختار، را به دست آورده‌ایم. مطابق شکل 7، گاف نواری فاصله بین طول موج‌های $1/36$ میکرومتر تا $1/79$ میکرومتر را پوشش می‌دهد. چندین مد نقص در محدوده گاف نواری مشاهده می‌شود. یکی از آنها منطبق بر طول موج مشخصه ساختار ($1/55$ میکرومتر) می‌باشد. با وجود اینکه میزان عبور در این حالت قابل توجه است، ولی زاویه دوران برای این حالت نسبتاً کوچک است. لذا برای کاربردهای اپتیکی مناسب نیست.

برای طول موج لبه گاف نواری، $1/36$ میکرومتر، عبور و زاویه دوران فارادی به صورت همزمان افزایش می‌یابد. این شرایط برای کاربردهای اپتیکی مناسب است. در محدوده گاف نواری، چند قله برای زاویه دوران وجود دارد، اما میزان عبور برای آنها کم است که یک نقطه ضعف محسوب می‌شود.

ساختار مورد مطالعه بعدی، دارای لایه نقص به ضخامت $3\lambda/4$ می‌باشد. شبیه‌سازی توزیع میدان الکتریکی و دامنه آن در طول ساختار، در شکل 8 مشخص است. جایگزینی نور در محل لایه نقص مغناطیسی اتفاق افتاده است. دامنه میدان الکتریکی در میانه ساختار، بیش از 10^5 ولت بر متر است. نمودار طیف عبور و زاویه دوران فارادی برای این ساختار در شکل 9 نشان داده‌ایم. محدوده طول موج $1/43$ میکرومتر تا $1/7$ میکرومتر معرف گاف نواری فوتونی است. چندین مد نقص در محدوده گاف نواری وجود دارد. در طیف زاویه دوران فارادی، دو قله وجود دارد. این دو قله منطبق بر طول موج‌های $1/24$ میکرومتر و $1/43$ میکرومتر می‌باشند. بیشینه زاویه دوران فارادی در طول موج $1/43$ میکرومتر اتفاق افتاده است.

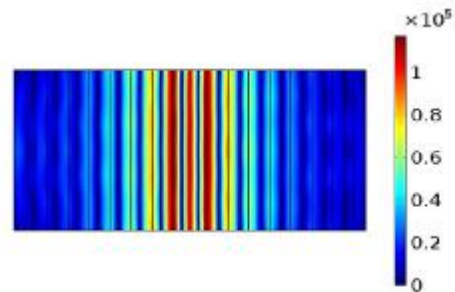


(الف)

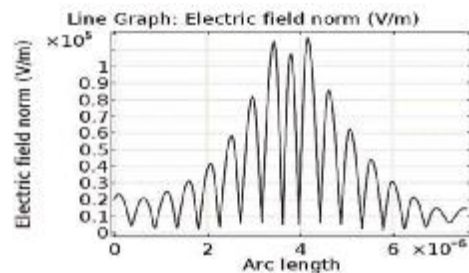


(ب)

شکل 5. نمودار (الف) طیف عبور و (ب) زاویه دوران فارادی برای ساختار $(D1/D2)^8(M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی به اندازه ربع طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).



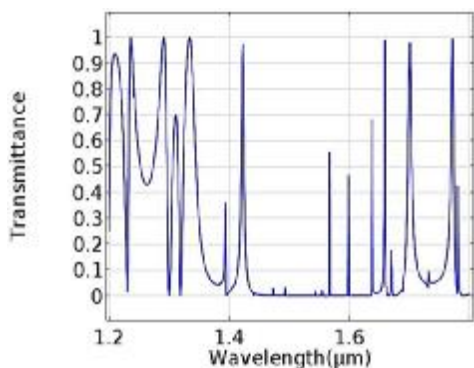
(الف)



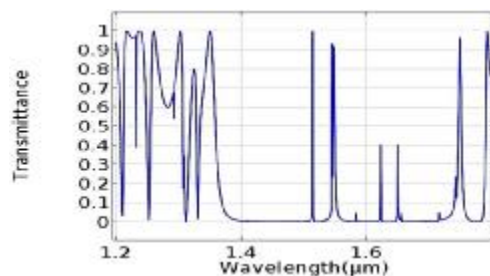
(ب)

شکل 6. (الف) توزیع میدان الکتریکی و (ب) بزرگی میدان الکتریکی در طول ساختار $(D1/D2)^8(M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی به اندازه نصف طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).

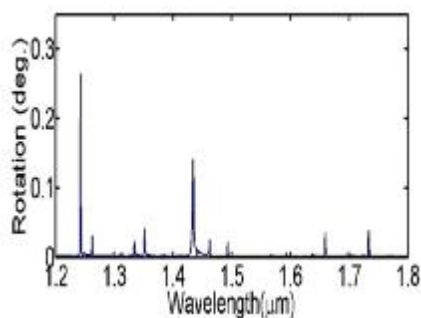
آخرین ساختاری که در این پژوهش به بررسی آن پرداخته‌ایم، ساختاری با لایه نقص مغناطیسی به ضخامت اپتیکی مساوی با طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر) می‌باشد. ضخامت لایه مغناطیسی در این حالت، 4 برابر نمونه اولیه می‌باشد.



(الف)



(الف)



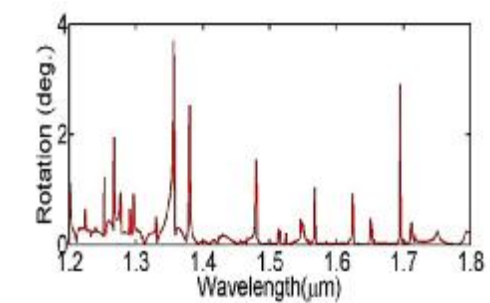
(ب)

شکل 9. نمودار (الف) طیف عبور و (ب) زاویه دوران فارادی برای ساختار $(D1/D2)^8(M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی به اندازه 0/75 برابر طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).

نمودار شکل 10، معرف بزرگی میدان الکتریکی در طول ساختار است. موج الکترومغناطیسی اولیه، در اطراف لایه نقص به صورت جایگزیده درآمدن است. دامنه میدان در لایه نقص، تقریباً 3 برابر اندازه میدان در لایه اولیه ساختار است.

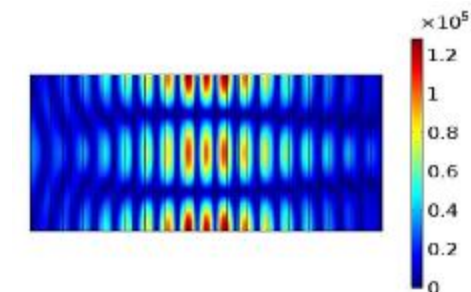
نمودار طیف عبور و زاویه دوران فارادی را برای این ساختار در شکل 11 نشان داده‌ایم.

میزان بازتاب برای این ساختار به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. همچنین زاویه دوران فارادی

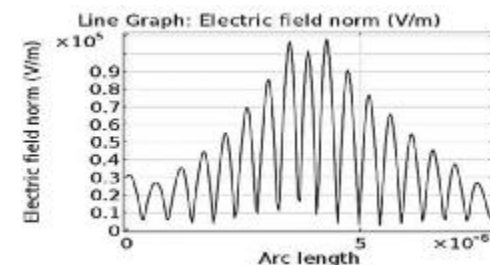


(ب)

شکل 7. نمودار (الف) طیف عبور و (ب) زاویه دوران فارادی برای ساختار $(D1/D2)^8(M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی به اندازه نصف طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).



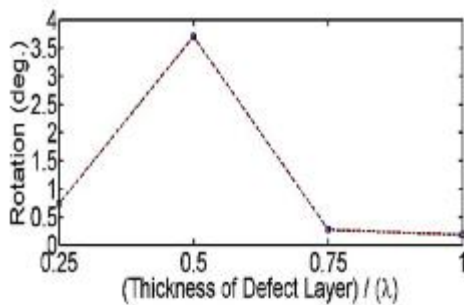
(الف)



(ب)

شکل 8. (الف) توزیع میدان الکتریکی و (ب) بزرگی میدان الکتریکی در طول ساختار $(D1/D2)^8(M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی به اندازه 0/75 برابر طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).

برای مقایسه خواص مغناطواینتیکی مربوط به ساختارهای مطالعه شده، بزرگی زاویه دوران فارادی را برای ساختارهایی با ضخامت‌های متفاوت از لایه نقص، در نمودار شکل 12، نمایش داده‌ایم. برای ضخامت اپتیکی به اندازه نصف طول موج مشخصه از لایه مغناطیسی (Ce:YIG)، زاویه دوران فارادی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. تغییرات طول موج با بیشینه زاویه دوران فارادی نسبت به ضخامت‌های متفاوت از لایه نقص، در نمودار شکل 13 نشان داده شده است. با افزایش ضخامت لایه نقص، بیشینه زاویه دوران فارادی به سمت طول موج‌های کوچکتر (بسامدهای بالاتر)، حرکت می‌کند.

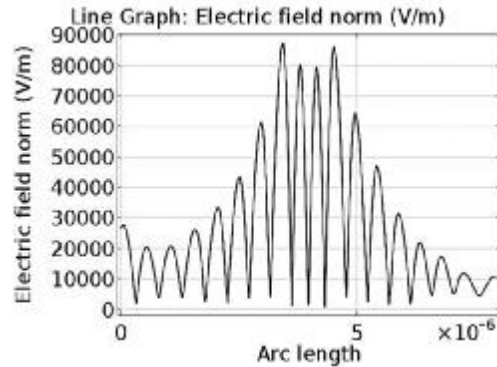


شکل 12. مقایسه بزرگی زاویه دوران فارادی برای ضخامت‌های مختلف لایه نقص مغناطیسی.

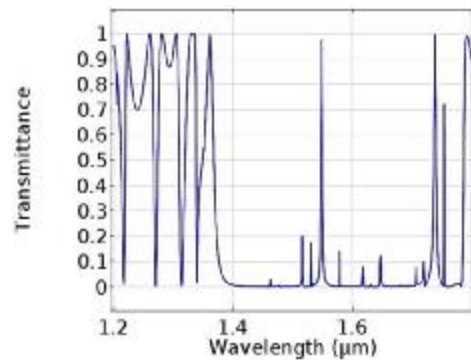
بحث و نتیجه‌گیری

دوران صفحه قطبیدگی موج عبوری از محیط مغناطیسی، نتیجه مستقیم تفاوت ضریب شکست بین امواج قطبیده دایره ای راستگرد و چپگرد در محیط مغناطیسی است. ضخامت لایه مغناطیسی، پارامتری مهم در تعیین خواص مغناطواینتیکی ساختارهای مغناطوفوتونی است. برای حالت‌های مورد مطالعه در این کار پژوهشی که ضخامت نقص، ضرایب صحیحی از ربع طول موج مشخصه ساختار بود، ساختاری با ضخامت اپتیکی کاواک به اندازه نصف طول موج، دارای بهینگی بالاتری از حیث میزان عبور و زاویه دوران فارادی می‌باشد.

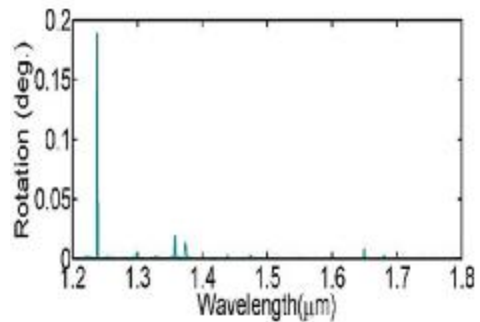
در محدوده گاف نواری فوتونی، قابل صرفنظر کردن است. زاویه دوران فارادی در طول موج لبه گاف نواری (1/36 میکرومتر)، بسیار کوچک است.



شکل 10. نمودار بزرگی میدان الکتریکی در طول ساختار مغناطوفوتونی با لایه نقص مغناطیسی به ضخامت اپتیکی برابر با طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).



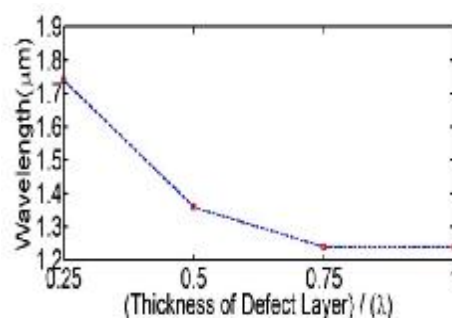
(الف)



(ب)

شکل 11. نمودار (الف) طیف عبور و (ب) زاویه دوران فارادی برای ساختار $(D1/D2)^8(M)(D2/D1)^8$ و ضخامت اپتیکی لایه نقص مغناطیسی برابر با طول موج مشخصه ساختار (1550 نانومتر).

میزان عبور و زاویه دوران فارادی در این حالت، به صورت همزمان افزایش یافته است. عمده حالت‌های بهینه جهت کاربردهای اپتیکی در طول موج‌های لبه گاف نواری اتفاق افتاد. بیشینه زاویه دوران فارادی، با افزایش ضخامت لایه نقص مغناطیسی به سمت طول موج‌های کوچکتر حرکت می‌کند. شبیه سازی روش المان متناهی می‌تواند زمینه را برای درک بهتر جایگزیدگی موج الکترومغناطیسی در لایه نقص و بالارفتن پاسخ‌های مغناطیویپتیکی بلورهای مغناطوفوتونی فراهم کند.



شکل 13. مقایسه طول موج‌های با بیشینه زاویه دوران فارادی در ساختارهایی با ضخامت‌های مختلف لایه نقص مغناطیسی.

References

- [1] Fedyanin AA, Aktsipetrov OA, Kobayashi D, Nishimura K, Uchida H, Inoue M. Enhanced Faraday and nonlinear magneto-optical Kerr effects in magnetophotonic crystals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004; 282: 256-259.
- [2] Debendetti PG, Stanley EH. Supercooled and Glassy Water. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003; 15(45): 40-46.
- [3] Inoue M, Arai K, Fujii T, Abe M. One-dimensional magnetophotonic crystals. *Journal of Applied Physics*. 1999; 85(8): 5768-5770.
- [4] Aguanno GD, Centini M, Scalora M, Sibilia C, Bloemer MJ, Bowden CM, Haus JW, Bertolotti M. Simultaneously phase-matched enhanced second and third harmonic generation. *Physical Review E*. 2001; 64(4): 046606.
- [5] Dumeige Y, Sagnes I, Monnier P, Vidakovic P, Abram I, Meriadec C, Levenson A. Phase-matched frequency doubling at photonic band edges: efficiency scaling as the fifth power of the length. *Physical Review Letters*. 2002; 89(4): 043901.
- [6] Dolgova TV, Maidikovskiy AI, Martemyanov MG, Fedyanin AA, Aktsipetrov OA. Giant third-harmonic in porous silicon photonic crystals and microcavities. *JETP Letters*. 2002; 75(1): 15-19.
- [7] Cowan AR, Young JF. Optical bistability involving photonic crystal microcavities and Fano line shapes. *Physical Review E*. 2003; 68(4): 046606.
- [8] J. D. Joannopoulos JD, Johnson SG, Winn JN, Meade RD, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press: 2008.
- [9] Fan S, Yanik MF, Wang Z, Sandhu S, Povinell ML. *Advances in Theory of Photonic Crystals*. *Journal of Lightwave Technology*. 2006; 24(12): 4493-4501.
- [10] Abdi-Ghale R, Asad M. Transmittance Magneto-Optical Responses of One-dimensional Magnetophotonic Heterostructures. *Acta Physica Polonica A*. 2014; 126(3): 705-712.
- [11] Kato H, Matsushita T, Takayama A, Nishimura K, Inoue M. Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals. *Journal of Applied Physics*. 2003; 93(7): 3906-3911.
- [12] Takagi H, Tsuzuki A, Iwasaki K, Suzuki Y, Imura T, Umezawa H, Uchida H, Shin KH, Inoue M. Multiferroic magneto optic spatial light modulator with sputtered PZT film. *Journal of Magnetism*. 2006; 30: 581-583.

- [13] Zvezdin AK, Kotov VA. Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials. CRC Press: 1997.
- [14] Lyubchanskii IL, Dadoenkova NN, Lyubchanskii ML, Shapovalov EA, Rasing T, Magnetic photonic crystals. Journal of Physics D: Applied Physics. 2003; 36(18): 277-287.
- [15] Inoue M, Fujikawa R, Baryshev A, Khanikaev A, Lim PB, Uchida H, Aktsipetrov O, Fedyanin A, Murzina T, Granovsky A. Magnetophotonic crystals, Journal of Physics D: Applied Physics. 2006; 39(8): 151-161.
- [16] Zhang HF, Liu SB, Kong XK, Li BX. The characteristics of photonic band gaps for three-dimensional unmagnetized dielectric plasma photonic crystals with simple-cubic lattice. Optics Communications. 2013; 288: 82-90.
- [17] Kumar M, Nautiyal T, Auluck S. Optical and magneto-optical properties of Fe_{4-x}Cox (x = 1-3). The European Physical Journal B. 2010; 73(3): 423-432.
- [18] Dissanayake N, Levy M, Chakravarty A, Heiden PA, Chen N, Fratello V. Magneto-photonic crystal optical sensors with sensitive covers. Applied Physics Letters. 2011; 99(9): 091112.
- [19] Wang Z, Fan S. Magneto-optical defects in two-dimensional photonic crystals. Applied Physics B. 2005; 81(2): 369-375.
- [20] Belotelov VI, Akimov IA, Pohl M, Kotov VA, Kasture S, Vengurlekar AS, Gopal AV, Yakovlev DR, Zvezdin AK, Bayer M. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals. Nature Nanotechnology. 2011; 6: 370-376.
- [21] Keller N, Mistrik J, Visnovsky S, Schmool DS, Dumont Y, Renaudin P, Guyot M, Krishnan R. Magneto-optical Faraday and Kerr effect of orthoferrite thin films at high temperatures. The European Physical Journal B. 2001; 21(1): 67-73.
- [22] Mansuripour M. The Faraday Effect. OSA Publishing: Optics and Photonics News. 1999; 10(11): 32-36.
- [23] Levy M, Jalali AA. Band structure and Bloch states in birefringent one-dimensional magnetophotonic crystals: an analytical approach. JOSA B. 2007; 24(7): 1603-1609.
- [24] Lyubchanskii I, Dadoenkova N, Zabolotin A, Shyshmakov A, Boucher Y, Bentivegna F, et al., editors. One-Dimensional Photonic Crystal With Realistic Interfaces: Effects of Misfit Strain. AIP Conference Proceedings; 2009: AIP.
- [25] Koerdt C, Magneto-Spatial Dispersion Phenomena: Photonic Band Gaps and Chirality in Magneto-Optics. Konstanz: University Konstanz Fachbereich Physics: 2004.
- [26] Volakis JL, A. Chatterjee A, Kempel LC. Finite element method electromagnetics: antennas, microwave circuits, and scattering applications. Wiley-IEEE Press: 1998.
- [27] Humphries S. Finite Element Methods For Electromagnetics. NEW MEXICO: USA: 2010.