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

جداسازی اپتیکی با استفاده ازساختارهای لایه‌ای حاوی لایه نقص غیرخطی

مجتبی کریمی هابیل، حمید پاشایی و صمد روشن انتظار

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، خیابان۲۹ بهمن،تبریز

چکیده – در این مقاله نشان می‌دهیم که بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های مواد مغناطواپتیکی، حاوی لایه نقص غیرخطی، می‌توانند موج با قطبش دایروی راستگرد و موج با قطبش دایروی چپگرد را که به سیستم می‌تابد از همدیگر متمایز کنند. طوری که موج دایروی چپگرد با شدت فرودی مشخصی می‌تواند از این ساختار عبور کند و موج دایروی راستگرد نمی تواند در همان جهت از ساختار مورد نظر عبور کند، از این خاصیت می توان در سیستم‌های جداکننده اپتیکی تک سویه وابسته به شدت، استفاده کرد.

کلید واژه- بلور فوتونی، جداکننده اپتیکی تک سویه، قطبش دایروی، لایه نقص غیرخطی.

Optical isolation via layered structures containing nonlinear defect layer

Mojtaba Karimi Habil, Hamid Pashaie and Samad Roshan Entezar

Department of Physics, University of Tabriz, Tabriz

Abstract-In this paper, we show that photonic crystals containing magneto-optical material layers with a nonlinear defect layer can discriminate the right-circularly polarized wave and left-circularly polarized wave impinging to the system. In the other word, the left-circularly polarized wave with particular intensity can transmit from this structure, but the right-circularly polarized wave can't transmit from this structure in the same direction. These properties may be utilized to design intensity dependent unidirectional optical isolator.

Key word- Photonic crystal, unidirectional Optical isolator, circular polarization, nonlinear defect layer.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

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

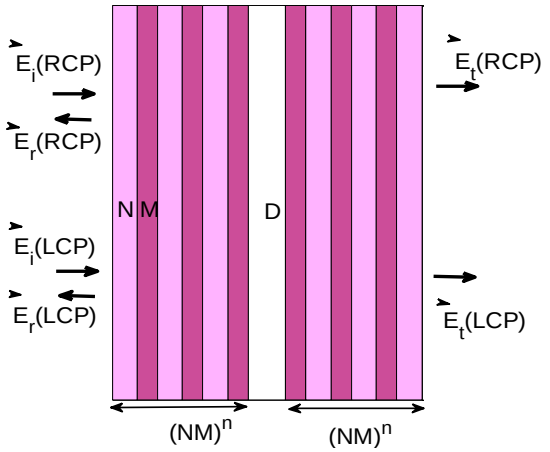
۱- مقدمه

انتشار نور در یک محیط به صورت یک سویه در طراحی وسایل اپتیکی از قبیل جداکننده‌های اپتیکی و انتشار دهنده‌های دایروی، که می‌توانند اثرات ناخواسته موج برگشتی را حذف کنند همواره مورد توجه بوده است. یک راه مرسوم برای دستیابی به این امر استفاده از مواد مغناطواپتیکی می‌باشد، که در حضور میدان مغناطیسی خارجی می توانند باعث جداسازی موج با قطبش دایروی راستگرد و موج با قطبش دایروی چپگرد شوند، اگر چه خاصیت مغناطواپتیکی موادی همچون (*BIG*) در فرکانسهای اپتیکی بسیار کم است و این امر باعث افزایش اندازه وسایل اپتیکی می‌شود [۱و۲]. امروزه با بکار بردن لایه‌های مغناطواپتیکی در بلورهای فوتونی ساختارهایی برای چرخش صفحه قطبش موج خطی و همچنین سیستمهای انعکاسی یک طرفه، پیشنهاد شده است [۳]-[۵].

ضریب شکست برخی از مواد به شدت میدان فرودی به آنها وابسته است و با تغییر شدت موج فرودی ضریب شکست آنها تغییر می‌کند. یکی از آثار ضریب شکست وابسته به شدت، دوپایداری اپتیکی است که در این پدیده وقتی موج به محیط غیرخطی می‌تابد، به ازای یک شدت ورودی دو شدت خروجی پایدار حاصل می‌شود. در دو پایداری اپتیکی میزان انتقال امواج از محیط می‌تواند با افزایش شدت فرودی از یک مقدار پایین به یک مقدار بالا به ناگاه تغییر کند که به آن شدت آستانه گفته می‌شود [۶و۷]. در این مقاله با بکار بردن لایه نقص غیرخطی و با بکار بردن لایه‌های مغناطواپتیکی در بلورهای فوتونی، سیستمی تک سویه برای عبور موج دایروی چپگرد ارائه می‌دهیم.

۲- تئوری و ساختار مورد استفاده

هنگامی که موج الکترومغناطیس به بلور فوتونی که دارای لایه نقص است می‌تابد، طول موج‌های خاصی واقع در گاف باند ساختار موج تقریبا به طور کامل عبور می‌کندکه این طول موجها را مد نقص می نامند. جایگاه مد نقص در ساختار باند به خواص اپتیکی لایه نقص و سایر لایه‌ها بستگی دارد[۸].



شکل۱- طرح شماتیک بلور فوتونی حاوی لایه نقص (D) که موج الکترومغناطیس در جهت عمود بر لایه‌ها به آن می‌تابد.

شکل۱ ساختار بلور فوتونی را نشان می‌دهد که دارای ساختار $(NM)^n D (MN)^n$ می‌باشد، که در آن N لایه دی‌الکتریک همسانگرد و غیر مغناطیسی (SiO_2) و M لایه مغناتواپتیک $(Ce:YIG)$ که تانسور دی‌الکتریک آن به صورت زیر می‌باشد[۹]:

$$\hat{\varepsilon}_M = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

که در آن g ضریب ژیرومغناطیس، که با میدان مغناطیسی خارجی متناسب است. مقدار این ضریب برای مواد مختلف متفاوت است و به مکانیسم برهمکنش میدان مغناطیسی با محیط بستگی دارد. این ضریب را می‌توان با برازش داده‌های تجربی حاصل از اسپکتروسکوپی مغناطو اپتیکی بدست آورد. موج با قطبش خطی را می‌توان به صورت دو موج با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد در نظر گرفت که ضریب شکست لایه مغناتواپتیک برای این دو نوع قطبش

$$n_{\pm} = \sqrt{\varepsilon_1 \pm g} \qquad (2)$$

است (+ برای قطبش دایروی راستگرد و − برای قطبش دایروی چپ گرد). به طوری که از رابطه (2) دیده می‌شود، وجود عناصر غیر قطری باعث تفاوت ضریب شکست برای دو موج دایروی راستگرد و چپگرد می‌شوند[۹]. همچنین در شکل۱ D لایه نقص غیر خطی که ضریب شکست آن به صورت

$$\varepsilon_{NL} = \varepsilon_L + \alpha |E_i|^2 \qquad (3)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

به شدت میدان الکتریکی موج فرودی وابسته است، که در آن ε_L ضریب شکست خطی لایه نقص و α ضریب غیر خطیت این لایه می‌باشد[۶].

فرض می‌کنیم موج الکترومغناطیس با قطبش خطی به طور عمود به بلور فوتونی شکل۱ می‌تابد، این موج را می‌توان به صورت ترکیبی از امواج با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد در نظر گرفت که میدان الکتریکی آنها به صورت زیر است:

$$\vec{E}_i^{RCP}(z) = E_i \exp(i\beta_{(+)} z)(\hat{x}+i\hat{y}) \qquad (4)$$

$$\vec{E}_t^{RCP}(z) = E_t \exp(i\beta_{(+)} z)(\hat{x}+i\hat{y}) \qquad (5)$$

$$\vec{E}_r^{RCP}(z) = E_r \exp(-i\beta_{(-)} z)(\hat{x}-i\hat{y}) \qquad (6)$$

$$\vec{E}_i^{LCP}(z) = E_i \exp(i\beta_{(-)} z)(\hat{x}-i\hat{y}) \qquad (7)$$

$$\vec{E}_t^{LCP}(z) = E_t \exp(i\beta_{(-)} z)(\hat{x}-i\hat{y}) \qquad (8)$$

$$\vec{E}_r^{LCP}(z) = E_r \exp(-i\beta_{(+)} z)(\hat{x}+i\hat{y}) \qquad (9)$$

با استفاده از معادلات ماکسول برای لایه‌های دی‌الکتریک و لایه‌های مغناطواپتیک با تانسور دی‌الکتریک رابطه (1) می‌توان ماتریس انتقال برای لایه‌های بلور فوتونی را محاسبه کرد و با استفاده از ماتریس انتقال، ارتباط بین موج فرودی و موج عبوری را برای قطبش دایروی راستگرد و چپگرد را بدست آورد، از آنجا میزان تراگسیل سیستم را محاسبه کرد [۳و۱۰].

۳- بحث و نتایج

به طور کلی طول موج در ناحیه مادون قرمز نزدیک، در زمینه ارتباطات نوری کاربرد بسیاری دارد، در این مقاله طول موج $\lambda_0 = 850\,nm$ برای بررسی نتایج انتخاب کرده‌ایم. فرض می‌کنیم که موج الکترومغناطیس با طول موج λ_0 به طور عمود بر لایه‌ها، به بلور فوتونی شکل۱ می‌تابد. حالتی را در نظر می‌گیریم که در ساختار شکل۱ $n=7$است و خواص اپتیکی لایه دی‌الکتریک N به صورت زیر است[۱۱]:

$$\varepsilon_N = 2.24\ ,\ \mu_N = 1,\ d_N = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_N}} \qquad (3)$$

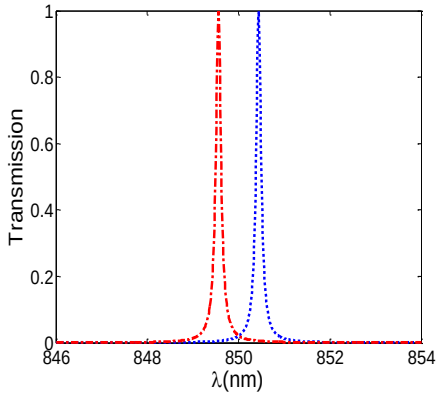
و برای لایه مغناتواپتیک عناصر تانسور دی الکتریک (2) به صورت زیر می‌باشد[۱۰]:

$$\varepsilon_M = 4.88\ ,\ \mu_M = 1\ ,\ d_M = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_1}} \qquad (4)$$

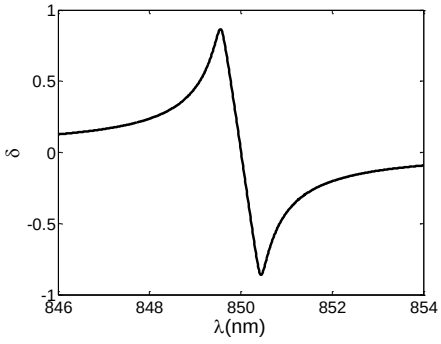
$g = 0.05$

ضخامت لایه D چنان انتخاب شده که راه نوری برای این لایه برابر با $\frac{\lambda_0}{2}$است. ابتدا فرض می‌کنیم که ضریب شکست لایه D به شدت میدان الکتریکی وابسته نیست و مقدار $\varepsilon_L = 3$ انتخاب می‌کنیم.

شکل۲ میزان تراگسیل بر حسب طول موج برای ساختار شکل۱ را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که در نزدیکی طول موج λ_0 دو قله دیده می‌شود.



شکل۲: میزان تراگسیل بر حسب طول موج برای ساختار شکل۱ به ازای $n=7$. موج عبوری با قطبش دایروی چپ گرد(منحنی خط-نقطه)، قطبش دایروی راست گرد (منحنی نقطه چین).



شکل ۳: مقدا پارامتر δ بر حسب طول موج برای ساختار شکل۲.

برا ی تحلیل این دو مد، پارامتر δرا به صورت

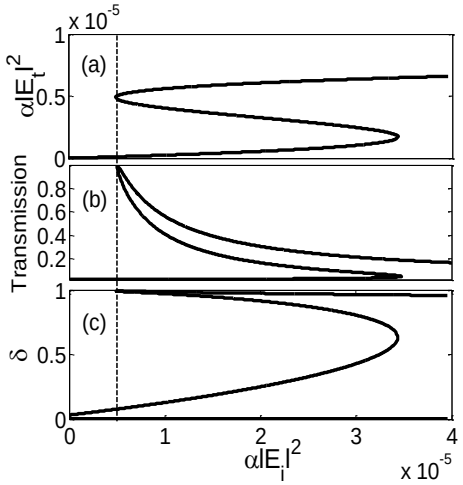
$$\delta = \frac{T_L - T_R}{T_L + T_R} \qquad (10)$$

تعریف می‌کنیم که بیانگر قطبش موج عبوری است. شکل۳ مقدار پارامتر δ را برای موج عبوری نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که به ازای طول موج $\lambda_L = 849.6\,nm$ مقدار $\delta = 0.88$ می‌رسد، و این

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

بیانگر این است که در این طول موج، موج عبوری تقریبا قطبش دایروی چپگرد دارد، همچنین در طول موج $\lambda_R = 850.4\,nm$ مقدار $\delta = -0.86$ که نشان می‌دهد که موج عبوری در این طول موج تا حد زیادی قطبش دایروی راستگرد دارد. در طول موج λ_0 مقدار $\delta = 0$ است که نشان می‌دهد موج عبوری دارای قطبش خطی است، اگرچه میزان تراگسیل بسیار ناچیز است.

اکنون حالتی را در نظر می‌گیریم که لایه نقص دارای خاصیت غیرخطی است، بنابراین ضریب شکست آن مطابق رابطه (3) به شدت میدان فرودی وابسته است.



شکل ۴: (a)- مقدار شدت خروجی بدون بعد، (b)- میزان تراگسیل، (c)- مقدار پارامتر δ، برحسب شدت موج فرودی بی بعد. در طول موج λ_0. پارامترها همانند پارامترهای شکل۲ می باشند. خط چین عمود، مقدار شدت آستانه پایین را نشان می دهد.

شکل۴(a)- رفتار دوپایداری اپتیکی سیستم را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که سیستم به ازای شدتهای خاصی سوئیچ می‌شود که در شکل شدت آستانه پایین به صورت نقطه چین نشان داده شده است. شکل۴(b)- میزان تراگسیل بر حسب شدت فرودی نشان می‌دهد ملاحظه می‌شود که به ازای شدت آستانه پایین مقدار تراگسیل تقریبا یک است. شکل۴(c)- مقدار پارامتر δ را برحسب شدت موج تابشی نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که مقدار δ به ازای طول موج λ_0 تقریبا برابر یک است که این مقدار بیانگر این است که موج عبوری دارای قطبش دایروی چپگرد است. بنابراین سیستم موج قطبیده دایروی چپگرد را تقریبا به طور کامل عبور می‌دهد و شدت موج انعکاسی تقریبا صفر است یعنی موج قطبیده دایروی چپگرد در بازگشت نمی‌تواند از سیستم عبور کند، بنابراین سیستم به عنوان یک سیستم تک سویه عمل می‌کند که فقط موج با قطبش خاص را در یک جهت عبور می دهد.

۴- نتیجه‌گیری

با بکار بردن لایه نقص غیر خطی در بلورهای فوتونی حاوی لایه‌های مغناطواپتیک، می‌توان سیستمی طراحی کرد که موج با قطبش دایروی خاص را در طول موج مشخصی با شدت معین عبور دهد به طوری که سیستم می‌تواند به عنوان یک سیستم تک سویه عمل کند، این خاصیت می تواند در سیستم های جداکننده اپتیکی تک سویه وابسته به شدت، استفاده شود.

مراجع

[1] N. Adachi, V. P. Denysenkov, S. I. Khartsev, A. M. Grishin, and T. Okuda, "*Epitaxial Bi3Fe5O12(001) films grown by pulsed laser deposition and reactive ion beam sputtering techniques*," **J. Appl. Phys**. 88(2000)2734–2739

[2] T. Tepper and C. Ross, "*Pulsed laser deposition and refractive index measurement of fully substituted bismuth iron garnet films,*" **J. Cryst. Growth** 255(2003) 324–331.

[3] S. Sakaguchi and N. Sugimoto, "*Transmission properties of multilayer films composed of magneto-optical and dielectric materials*" **J.Lightwave Technol**, 17(1999) 1087–1092.

[4] M. Inoue, K. I. Arai, T. Fujii, and M. Abe, "*Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers*" **J. Appl. Phys**,83(1998) 6768–6770.

[5] M. J. Steel, M. Levy, and R. M. Osgood, "*High transmission enhanced Faraday rotation in one-dimensional photonic crystals with defects,*" **IEEE Photon. Technol. Lett**,12(2000)1171–1173.

[6] R. W. Boyd "*Nonlinear Optics*" **Rochester University, Second Edition** (2003).

[7] Xia Li, Kang Xie, Hai-Ming Jiang "*properties of defect mode in one-dimensional photonoc crystal containing tow nonlinear defects*" , **Optocs Communications,** 282 (2009) 4292-4295.

[8] S. Ya. Vetrov and A. V. Shabanov **"***Localized Electeromagnetic Modes and Transmission Spectrum of a One-Dimensional Photonic Crystal With Lattice Defects*", **J.Exp. and Theo. Phy**, 93(2001)977-984.

[9] M. Levy, A. A. Jalali, X.Huang"*Magnetophotonic crystals:nonreciprocity, birefringence and confinement*', **J Master sci:Master Electron**, 20(2009) S43-S47.

[10] Ruihua Zhu, SinianFu, HongyanPeng "*Far infrared Faraday rotation effect in one dimensional microcavity type magnetic photonic crystals*". **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 323 (2011) 145–149

[11] Mikhail Vasiliev, Kamal E. Alameh, *Senior Member, IEEE*, Vladimir I. Belotelov, Vyacheslav A. Kotov, and Anatoly K. Zvezdin "*Magnetic Photonic Crystals: 1-D Optimization and Applications for the Integrated Optics Devices*", **JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY**, 24(2006)2156-2162.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]