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

# بررسی چرخش فارادی در بلورهای فوتونی یک بعدی حاوی لایه نقص

مجتبی کریمی هابیل، حمید پاشایی و صمد روشن انتظار

*دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، خیابان۲۹ بهمن،تبریز*

**چکیده – بلورهای فوتونی حاوی لایه مغناطواپتیکی باعث ایجاد چرخش فارادی می‌شوند، اما این ساختارها دارای میزان تراگسیل کمی می‌باشند. در این مقاله با بکار بردن لایه نقص مغناطواپتیکی و لایه نقص دی الکتریک میزان تراگسیل و چرخش فارادی را مورد بررسی قرار می‌دهیم و مقدار زاویه چرخش فارادی و میزان تراگسیل را در این سیستمها برای زاویه $45^\circ$ که در جدا کننده‌های اپتیکی کاربرد دارد، بهینه می‌کنیم.**

کلید واژه- بلور فوتونی، جداکننده اپتیکی، چرخش فارادی، نقص مغناطواپتیکی.

# Investigation of Faraday Rotation in One-Dimensional Photonic Crystals Containing Defect Layer

Mojtaba Karimi Habil, Hamid Pashaie and Samad Roshan Entezar

*Department of Physics, University of Tabriz, Tabriz*

Abstract- Photonic crystals containing magneto-optical layer produce Faraday rotation, but these structures have low transmission. In this paper we investigate transmission and the Faraday rotation in photonic crystals containing magneto-optical and dielectric defect layer. We optimize such systems for $45^\circ$ rotation which has application in an optical isolator.

Key word- Photonic crystal, Optical isolator, Faraday rotation, Magneto-optical defect.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]



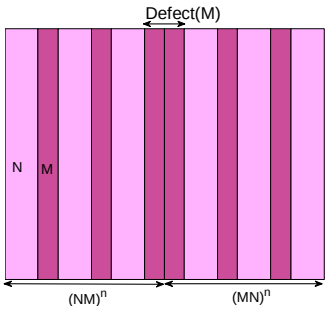
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

## ۱- مقدمه

اثر چرخش فارادی، یعنی چرخش صفحه قطبش یک موج الکترومغناطیس با قطبش خطی که در یک محیط ژیروتروپیک منتشر می‌شود، یکی از اساسی‌ترین برهمکنشهای مغناطواپتیکی می‌باشد، که در بسیاری از وسایل اپتیکی تک سویه از قبیل جداکننده‌های اپتیکی کاربرد دارد [۱و۲]. بسیاری از مواد مغناطواپتیکی که باعث چرخش فارادی می‌شوند دارای ضخامتی به اندازه چند میلی‌متر می‌باشند که این طول باعث افزایش اندازه وسایل اپتیکی می‌شود. در سالهای اخیر با بکار بردن لایه های مغناطیسی در بلورهای فوتونی مشاهده می‌شود که در این بلورها جایگزیدگی میدان در لایه‌های مغناطیسی باعث افزایش زاویه چرخش فارادی می‌شود، به طوری که این ساختارها فقط دارای ضخامتی به اندازه چند میکرومتر هستند [۳و۴]. از آنجا که زاویه چرخش فارادی به اندازه $\theta_F = 45°$ در جداکننده‌های اپتیکی کاربرد دارد بسیاری از این مطالعات به دستیابی به زاویه $\theta_F = 45°$ و میزان تراگسیل بالا می‌پردازند، اما بسیاری از این ساختارها دارای تعداد لایه‌های زیادی هستند که ساخت آنها بسیار مشکل است [۵و۶]. در این مقاله با بکار بردن لایه مغناطواپتیکی و لایه دی‌الکتریک به عنوان نقص در بلور فوتونی به صورت تئوری ساختار را با استفاده از نرم افزار MATLAB شبیه سازی کرده و میزان تراگسیل و زاویه چرخش فارادی را مورد بررسی قرار 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




شکل۱- طرح شماتیک بلور فوتونی حاوی لایه نقص مغناطواپتیک.

جایگاه مد نقص در ساختار باند به خواص اپتیکی لایه نقص و سایر لایه‌ها بستگی دارد [۷]. شکل۱ ساختار مورد استفاده برای ایجاد چرخش فارادی را نشان می‌دهد، که یک بلور فوتونی به صورت $(NM)^n\,(MN)^n$ می‌باشد که در آن $N$،لایه دی‌الکتریک همسانگرد و غیر مغناطیسی $(Sio_2)$ و $M$، لایه مغناتواپتیک $(Bi:YIG)$ که تانسور دی الکتریک آن به صورت زیر می‌باشد [۸]:

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

که در آن g ضریب ژیرومغناطیسی که با میدان مغناطیسی خارجی متناسب است و به مکانیسم برهمکنش میدان مغناطیسی با ماده بستگی دارد. با برازش داده‌های حاصل از اسپکتروسکوپی مغناطواپتیکی می توان مقدار این ضریب را 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 که این تفاوت در ضریب شکست خود باعث ایجاد چرخش فارادی می‌شود[۸] .

چنانکه در شکل۱ دیده می‌شود ساختار دارای یک لایه نقص مغناطواپتیکی که ضخامت آن دو برابر ضخامت سایر لایه‌های مغناطواپتیکی است. هنگامی که موج الکترومغناطیس به بلور فوتونی می‌تابد قسمتی از موج منعکس و قسمتی عبور می‌کند، با استفاده معادلات ماکسول برای لایه‌های دی‌الکتریک و لایه‌های مغناطواپتیکی 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 بدست آورد، از آنجا میزان تراگسیل و زاویه چرخش فارادی را محاسبه کرد[۳و۹].



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

## ۳- بحث و نتایج

به طور کلی طول موج در ناحیه مادون قرمز نزدیک در زمینه ارتباطات اپتیکی کاربرد دارد، در این مقاله طول موج $\lambda_0 = 1550\ nm$ برای بررسی نتایج انتخاب کرده‌ایم. فرض می‌کنیم که موج الکترومغناطیس با طول موج $\lambda_0$ به طور عمود بر لایه‌ها، به بلور فوتونی شکل۱ می‌تابد. حالتی را در نظر می گیریم که در ساختار شکل۱ $n = 6$ است و مشخصات اپتیکی لایه دی‌الکتریک $N\ (Sio_2)$ به صورت زیر است[۱۰]:

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

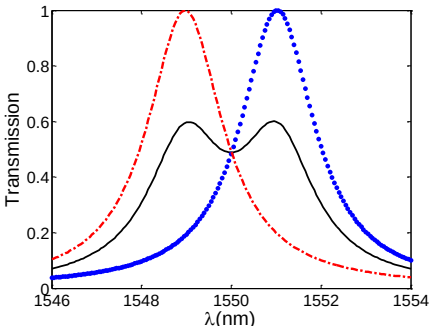
و برای لایه مغناطواپتیکی عناصر تانسور دی الکتریک (2) به صورت زیر است [۱۰]:

$$\varepsilon_M = 7.29\ ,\ \mu_M = 1\ ,\ d_M = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_1}} \qquad (4)$$

$g = 0.015$

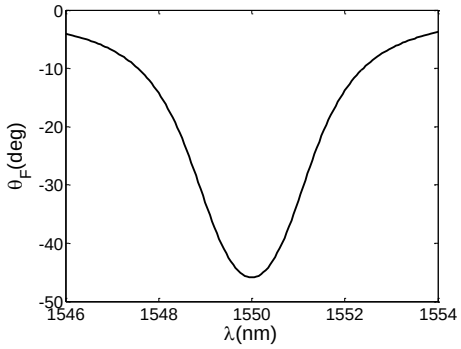
ضخامت لایه‌ها چنان انتخاب شده‌اند که راه نوری برای هر لایه برابر با $\frac{\lambda_0}{4}$ است.

شکل۲ میزان تراگسیل را بر حسب طول موج برای ساختار شکل۱ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در نزدیکی طول موج $\lambda_0$ دو پیک دیده می‌شود که یکی مربوط به موج دایروی راستگرد و دیگری مربوط به موج دایروی چپگرد است. در طول موج $\lambda_0$ این دو موج با هم ترکیب می‌شوند و موج قطبیده خطی را به وجود می‌آورند که مقدار تراگسیل آن برابر با 0.5 می باشد.



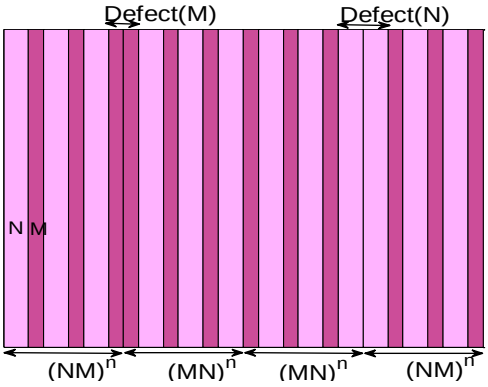

شکل۲: میزان تراگسیل بر حسب طول موج برای ساختار شکل۱ به ازای $n = 6$ و $g = 0.015$. موج عبوری با قطبش دایروی چپ گرد(منحنی خط-نقطه)، قطبش دایروی راست گرد (منحنی نقطه چین)، موج عبوری کل(منحنی پر).

شکل۳ زاویه چرخش فارادی بر حسب طول موج را نشان می‌دهد، ملاحظه می شود که برای طول موج $\lambda_0$ مقدار $\theta_F = 45°$ می‌باشد، که این زاویه برای ساخت جدا کننده های اپتیکی بسیار مناسب است.




شکل۳: زاویه چرخش فارادی برحسب طول موج برای ساختار بررسی شده در شکل۲.

همانطور که از شکل۲ آشکار است میزان تراگسیل به ازای طول موج $\lambda_0$ کم است (0.5) و این عامل باعث پایین بودن کارایی سیستم می‌شود زیرا بیشتر انرژی موج فرودی منعکس می شود. با کاهش تعداد لایه‌ها میزان تراگسیل افزایش، اما میزان $\theta_F$ کاهش می‌یابد، بنابراین با کاهش یا افزایش تعداد لایه‌ها، همزمان نمی‌توان هم به تراگسیل بالا و هم به $\theta_F$ زیاد دست یافت [۱۱].



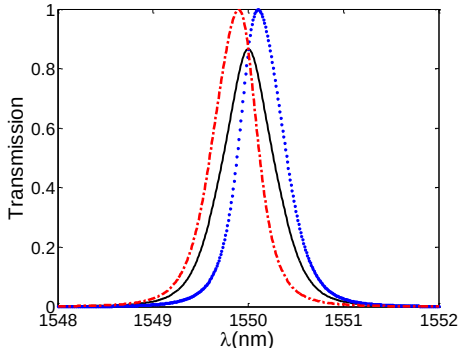

شکل۴: طرح شماتیک بلور فوتونی حاوی لایه نقص مغناطواپتیک و لایه نقص دی الکتریک.

برای افزایش میزان تراگسیل ساختاری به صورت $(NM)^n(MN)^n(MN)^n(NM)^n$ (شکل۴) در نظر می‌گیریم، که دارای یک لایه نقص مغناطواپتیکی و یک لایه نقص دی‌الکتریک است. شکل۵ میزان تراگسیل بر حسب طول موج را برای این ساختار نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که میزان تراگسیل به مقدار (0.88)

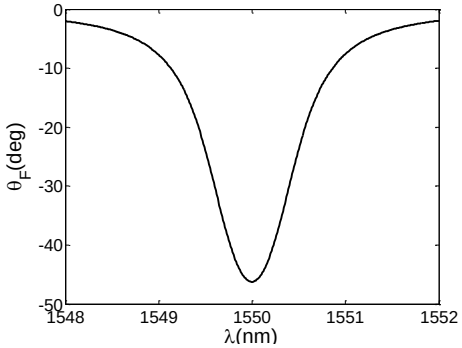


[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

افزایش می‌یابد، این در حالی است که مطابق شکل۶ مقدار زاویه چرخش فارادی $\theta_F = 45°$ به ازای $g = 0.0035$ می‌باشد که از مقدار $g$ در حالت ساختار شکل۱ بسیار کمتر است، بنابراین با مقدار میدان مغناطیسی کمتر تراگسیل بالاتری بدست می‌آید.




شکل ۵: میزان تراگسیل بر حسب طول موج برای ساختار شکل۴ به ازای $n = 6$ و $g = 0.0035$. سایر پارامترها مشابه ساختار بررسی شده در شکل ۲ می‌باشند. موج عبوری با قطبش دایروی چپ گرد(منحنی خط-نقطه)، قطبش دایروی راست گرد (منحنی نقطه چین)، موج عبوری کل(منحنی پر).




شکل ۶: زاویه چرخش فارادی برای ساختار بررسی شده در شکل۵. ازای $n = 6$ و $g = 0.0035$. سایر پارامترها مشابه ساختار بررسی شده در شکل۲ می‌باشند.

## ۴- نتیجه گیری

با بکار بردن مواد مغناطواپتیکی در بلورهای فوتونی می توان صفحه قطبش موج قطبیده خطی تابشی به ساختار را به اندازه $\theta_F$ درجه چرخاند و با بکار بردن لایه نقص از جنس مواد مغناطواپتیک و یک لایه نقص دی‌الکتریک و با اعمال میدان مغناطیسی نسبتا کم می‌توان زاویه چرخش فارادی 45° با میزان تراگسیل نسبتا بالا بدست آورد.

## مراجع


[1] M. Inoue and T. Fujii, "*A theoretical analysis of magneto-optical Faraday effect of YIG films with random multilayer structures*" **J. Appl. Phys**, 81(1997) 5659–5661.

[2] R.Wolfe, R. A. Lieberman, V. J. Fratello, R. E. Scottie, and N. Kopylov,"*Etch-tuned ridged waveguide magneto-optic isolator*" **Appl. Phys.Lett**, 56(1990)426–428

[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. Levy, H. C. Yang, M. J. Steel, and J. Fujita, "*Flat-top response in one-dimensional magnetic photonic bandgap structures with Faraday rotation enhancement,*" **J. Lightw. Technol.**, vol. 19(2001)1964–1969.

[6] 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.

[7] 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

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

[9] 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.

[10] 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.

[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 TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, VOL. 38(2002)3246-3248.




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]