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

# بهینه‌یابی عامل کیفیت بر پایه تغییر زاویه تابش در بلور مگنتوفوتونی با دو نقص

نرگس انصاری[۱]، طاهره السادات پروینی[۲]، محمدمهدی طهرانچی[۲و۳]

[۱] گروه فیزیک دانشگاه الزهرا، ونک، تهران

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

[۳]پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

**چکیده - طیف عبور، چرخش فارادی و بیضی گونگی بلور مگنتوفوتونی با دو لایه نقص با ساختار $(MN)^5M^2(NM)^2NM^2(NM)^5$، تحت تابش‌های مایل با روش ماتریس انتقال ۴×۴ بررسی شده است. از تقریب دوقطبی الکتریکی برای بررسی اثر اتلاف و پاشندگی فرکانسی المان¬های قطری و غیرقطری تانسور پذیرفتاری دی¬الکتریک لایه¬های مغناطیسی M، استفاده و نشان داده شده که طول موج مدهای نقص با افزایش زاویه تابش کاهش می یابد و بیشینه مقدار عامل کیفیت در نزدیکی زاویه بروستر در قطبش *TM* اتفاق می افتد. از این اثرات می توان برای کوک پذیری بلورهای مگنتواپتیکی جهت فیلتر رنگ و بهینه سازی زاویه‌ی تابش استفاده نمود.**

کلید واژه- اتلاف، بلور مگنتوفوتونی، بیضی گونگی، چرخش فارادی، عامل کیفیت، طیف عبور.

# Quality Factor Optimization Based on Incident Angle Changes in Magnetophotonic Crystal with Two Defects

Narges Ansari[1], Tahereh Sadat Parvini[2] and Mohammad Mahdi Tehranchi[2,3]

[1] Department of Physics, Alzahra University, Tehran

[2] Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran

[3] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- Optical transmittance spectra, Faraday rotation and ellipticity of a magnetophotonic crystals with two defects as $(MN)^5M^2(NM)^2NM^2(NM)^5$ under different incident angles is investigated based on transfer 4x4 matrix method. Effects of absorption and dispersion frequency are implemented in the permittivity tensor elements of magnetic layers based on electric dipole approximation. Results indicate that the defect wavelength decreases with increasing incident angle and the best quality factor is found close to the Brewster angle for TM mode. We suggest to apply these results to design tunable magnetophotonic crystals for color filter and optimization of incident angle.

Keywords: Absorption, Ellipticity, Faraday rotation, Magnetophotonic crystals, Quality Factor, Transmittance spectra.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-13 ]

## ۱- مقدمه

بلورهای مگنتوفوتونی[۱] یک بعدی ،MOPC، ساختارهایی با تناوب در ضریب شکست هستند که از لایه‌های مغناطیسی و یا ترکیبی از لایه های مغناطیسی و دی-الکتریک تشکیل شده‌اند [۱]. ویژگی‌های این ادوات، ابعاد کوچک، دارا بودن گاف نواری، تنظیم پذیر با پارامترهای ساختاری و کوک پذیری با عوامل خارجی مانند میدان مغناطیسی خارجی و زاویه برخورد، است که منجر شده کاندیدای خوبی جهت کاربری در ایزولاتورها[۲]، چرخاننده-های فارادی[۳] و فیلترها باشند [۲]. افزایش عامل کیفیت[۴]، نسبت چرخش فارادی به عبور، این ادوات نیازمند جایگزیدگی بیشتر میدان‌های الکترومغناطیسی و کم کردن سرعت گروه موج در لایه‌های فعال مگنتواپتیکی است که با کمک مد نقص در منطقه باند نواری می‌توان به این مهم دست یافت. ایجاد مد نقص در گاف نواری با به کارگیری لایه یا لایه‌های نقص در ساختار MOPC ممکن است. مکانیزم افزایش عامل کیفیت در MOPC های با یک لایه نقص، پدیده تشدید است اما در این ساختارها با افزایش تعداد لایه‌های مگنتواپتیکی به منظور افزایش چرخش فارادی، عبور کاهش می‌یابد. برای امکان افزایش چرخش فارادی بدون کاهش چرخش عبور و در نتیجه افزایش عامل کیفیت، از MOPC های با دو لایه نقص استفاده می‌شود [۴]. برای ساختارهای بدون اتلاف میزان عبور برای مد نقص اول و دوم یکسان می‌باشد درحالیکه در دستگاه‌های اپتیکی نمی‌توان از جذب اپتیکی لایه‌های مغناطیسی صرف نظر نمود. برای MOPC های با دو لایه نقص برای مواد مگنتواپتیکی گارنت با در نظر گرفتن اتلاف لایه‌های گارنت، میزان عبور مد اول و دوم با یکدیگر برابر نخواهد بود [۵].

برای محاسبه طیف عبور و چرخش فارادی در بلور مگنتوفوتونی که تحت تابش مایل قرار گرفته از روش ماتریس انتقال ۴×۴ استفاده می‌کنیم. این روش اولین بار توسط لیوبچانسکی[۵] و همکارانش برای مطالعه بلورهای مگنتوفوتونی بدون در نظر گرفتن پاشندگی و اتلاف پذیرفتاری دی‌الکتریک، $\hat{\varepsilon}$، مورد مطالعه قرار گرفت [۶]. اما المان‌های تانسور پذیرفتاری دی‌الکتریک $\hat{\varepsilon}$ برای اکثر مواد مغناطیسی در ناحیه اپتیکی و فروسرخ پاشنده هستند. در نتیجه در این تحقیق با در نظر گرفتن پاشندگی و اتلاف در لایه‌های مغناطیسی اثر تغییر زاویه تابش در میزان عبور و چرخش فارادی مدهای نقص و در نتیجه عامل کیفیت در بلور مگنتوفوتونی با دو لایه‌ی نقص را بررسی می‌کنیم.

## ۲- تئوری

ساختار مورد بررسی، بلور مگنتوفوتونی با دو لایه نقص، $(MN)^5M^2(NM)^2NM^2(NM)^5$، می‌باشد که لایه‌های تشکیل دهنده آن، لایه‌های مگنتواپتیکی (M) و دی‌الکتریک (N) به ترتیب گارنت آلاییده به آلومینیوم،گالیوم و اربیوم با ساختار $Bi_{2.97}Er_{0.03}Fe_4Ga_{0.5}Al_{0.5}O_{12}$، (Er,Al,Ga:BIG) و گارنت گادالینیوم گارنت با ساختار $Sm_3Ga_5O_{12}$ (SGG) به ترتیب با ضخامت‌های $d_1$ و $d_2$ هستند و لایه‌های نقص از جنس لایه‌های مگنتواپتیکی با ضخامت دو برابر $d_1$ است که با $M^2$ نمایش داده می‌شوند و ضخامت لایه‌ها برای ساختار براگ با طول موج تشدید ۷۶۰ نانومتر به‌ازای تابش نرمال طراحی شده است.

انتشار امواج الکترومغناطیس در لایه‌های مگنتواپتیکی، تحت تاثیر خواص تانسور پذیرفتاری دی‌الکتریک، $\hat{\varepsilon}$،است که المان‌های تانسور $\hat{\varepsilon}$ برای اکثر مواد مگنتواپتیکی از جمله ماده مورد بررسی، در ناحیه اپتیکی و فروسرخ پاشنده و با اتلاف است. برای محیطی که به‌طور یکنواخت در امتداد محور تناوب لایه‌ها مغناطیده شده این تانسور به‌شکل،

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}, \qquad (۱)$$

می‌باشد که المان‌های آن با تقریب دو قطبی الکتریکی به-دست می‌آیند [۷] که برای یافتن المان‌های ماتریس لایه Er,Al,Ga:BIG از داده‌های مرجع [۸] استفاده شده است و المان‌های ماتریس وابسته به شکافتگی ترازها است که از مهمترین عوامل در شکافتگی ترازها، اثر زیمن می‌باشد که وابسته به میدان مغناطیسی خارجی است. پذیرفتاری لایه

---

[۱] Magneto-Optical Photonic Crystals

[۲] Isolators

[۳] Faraday Circulator

[۴] Quality Factor, $Q = \frac{2|\theta_F|}{\ln(1/T)}$

[۵] I. Lyubchanskii



[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-13 ]

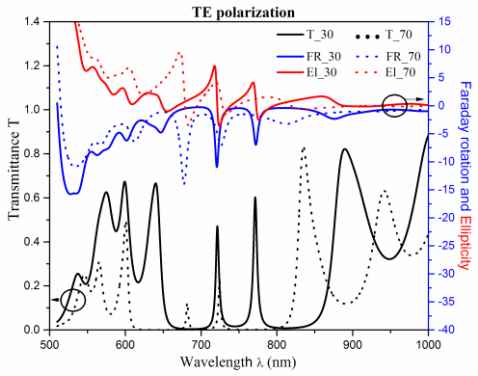
دی‌الکتریک SGG، با معادله سلمیر، $\varepsilon_{SGG} = 1 + \frac{2.75}{1-\left(\frac{128}{\lambda(\mathrm{nm})}\right)^2}$، داده می‌شود.

به‌منظور بررسی ویژگی‌های بلور مگنتوفوتونی تحت تابش مایل از روش ماتریس انتقال ۴×۴ استفاده می‌کنیم [۶]. در این روش ابتدا ماتریس انتقال در لایه‌های مختلف را بدست آورده و با اعمال شرایط مرزی بر روی مؤلفه‌های مماسی E و H به‌طور جداگانه برای امواج با قطبش TE و TM، ماتریس عبور بدست می‌آید و سپس می‌توان طیف عبور،T، چرخش فارادی، $\theta_F$، و بیضی‌گونگی، $e$، را محاسبه کرد.

## ۳- نتایج

در ساختار مورد بررسی به علت فاصله کم بین لایه‌های نقص، در گاف نواری دو مد نقص دیده می‌شود و با افزایش فاصله بین لایه‌های نقص، طول موج مدهای نقص به یکدیگر نزدیک شده و از یک حدی تنها یک مد نقص وجود خواهد داشت اما در این مقاله، با ثابت نگه داشتن فاصله بین لایه‌های نقص، به بررسی چگونگی پاسخ مگنتواپتیکی فارادی و عبور ساختار با تغییر زاویه تابش برای قطبش‌های TE و TM می‌پردازیم.

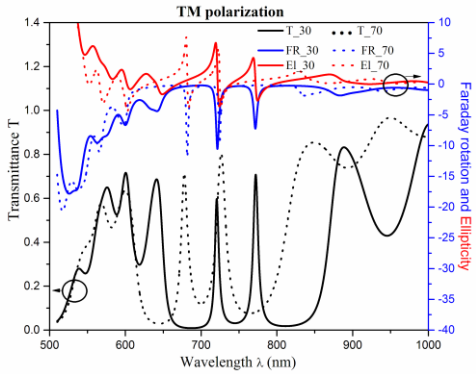
در شکل ۱ عبور، چرخش فارادی و بیضی‌گونگی برای ساختار MOPC با دو لایه نقص، برای قطبش TE، برای دو زاویه‌ی تابش ۳۰ و ۷۰ درجه نمایش داده شده است.




شکل ۱: طیف عبور (مشکی)، چرخش فارادی (آبی) و بیضی‌گونگی (قرمز) برای بلور مگنتوفوتونی با دو لایه نقص برای زاویه تابش ۳۰° (خطوط پیوسته) و ۷۰° (نقطه‌چین) به ازای قطبش فرودی TE.

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود در ناحیه گاف نواری برای هر زاویه‌ی تابش، دو پیک دیده می‌شود که مد نقص اول، $l_{res,1}$، و مد نقص دوم، $l_{res,2}$، به ترتیب برای تابش ۳۰° برابر با مقادیر ۷۲۱/۲ و۷۷۱/۶ نانومتر و برای تابش ۷۰° برابر با مقادیر ۶۸۱/۱ و ۷۲۴/۳ نانومتر است. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه تابش، طول موج و عبور مدهای نقص کاهش و چرخش فارادی آنها افزایش می‌یابد.

در شکل ۲، بار دیگر طیف عبور، چرخش فارادی و بیضی-گونگی اما برای قطبش TM برای دو زاویه‌ی تابش ۳۰ و ۷۰ درجه را بررسی کرده‌ایم. برای قطبش TM، $l_{res,1}$ و $l_{res,2}$ به ترتیب برای تابش ۳۰° برابر با مقادیر ۷۲۱/۱ و۷۷۱/۹ نانومتر و برای تابش ۷۰° برابر با مقادیر ۶۸۱/۴ و ۷۲۴/۶ نانومتر است که این مقدارها با مقادیر متناظرشان در قطبش TE، اختلاف ناچیزی دارند. از سوی دیگر با افزایش زاویه تابش، طول موج مدهای نقص کاهش، عبور و فارادی آنها افزایش می‌یابد.




شکل ۲: طیف عبور (مشکی)، چرخش فارادی (آبی) و بیضی‌گونگی (قرمز) برای بلور مگنتوفوتونی با دو لایه نقص برای زاویه تابش ۳۰° (خطوط پیوسته) و ۷۰° (نقطه‌چین) به ازای قطبش فرودی TM.

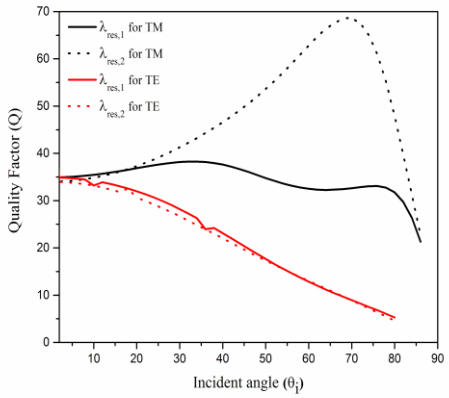
با مقایسه شکل ۱ و ۲ نتیجه می‌شود در هر دو قطبشTE و TM، با افزایش زاویه تابش، طول موج مدهای نقص کاهش و چرخش فارادی آنها افزایش می‌یابد در حالیکه رفتار اندازه‌ی عبور برای دو قطبش متفاوت است؛ با افزایش زاویه تابش، اندازه عبور در قطبش TE کاهش و در قطبش TM افزایش می‌یابد که دلیل آن در وجود زاویه بروستر موج برای قطبش TM نهفته است.

همچنین از منحنی‌های شکل ۱ و۲ برمی‌آید که بیشینه مقدار عامل کیفیت در مدهای نقص اتفاق می افتد زیرا در



[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-13 ]

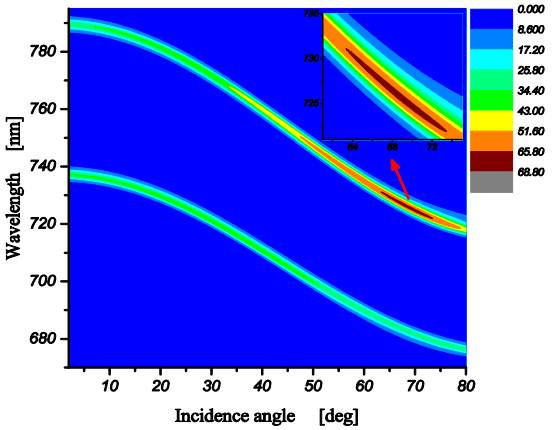
طول موج مد نقص، بیشینه عبور و چرخش فارادی همزمان وجود دارند و در بقیه طول موج‌ها این هماهنگی وجود ندارد. از سوی دیگر اندازه عبور و چرخش فارادی در $l_{res,1}$ و $l_{res,2}$ برای نمونه‌های مگنتواپتیکی پاشنده و بااتلاف، با یکدیگر برابر نیست و دلیل اصلی این تفاوت، وجود اتلاف و تفاوت در ضرایب شکست و خاموشی دو قطبش راستگرد و چپگرد است. به همین جهت عامل کیفیت دو مد نقص با یکدیگر برابر نمی‌باشد. به دلیل اهمیت عامل کیفیت در بازده ساختارهای مگنتواپتیکی، وابستگی عامل کیفیت به زاویه‌تابش برای هر دو قطبش وهر دو مد نقص در شکل ۳رسم شده است.




شکل ۳: عامل کیفیت به ازای زوایای تابش مختلف برای قطبش فرودی TE (قرمز)و TM (مشکی) برای مد نقص اول (خطوط پیوسته) و دوم (نقطه‌چین).

در شکل ۳ دیده می شود که عامل کیفیت برای قطبش TE، با افزایش زاویه تابش، کاهش می‌یابد و اندازه‌ی عامل کیفیت برای هر دو مد نقص برای قطبش TE تقریبا برابر است. در حالیکه عامل کیفیت برای $l_{res,2}$ در قطبش TM، با افزایش زاویه تابش از صفر تا زاویه بروستر ساختار، افزایش و از زاویه بروستر تا ۸۵ درجه کاهش می‌یابد. عامل کیفیت برای $l_{res,1}$، به دلیل بیشتر بودن اتلاف در طول موج‌های کمتر پیچیدگی بیشتری دارد.

به‌منظور نشان دادن بیشتر وابستگی طول موج مدهای نقص به زاویه تابش، طول موج مدهای نقص اول و دوم تحت تابش‌های متفاوت برای قطبش TM در شکل ۴ به صورت منحنی ۲/۵ بعدی آورده شده است که رنگ های متفاوت، اندازه‌های متفاوت عامل کیفیت را نشان می‌دهد.




شکل ۴: وابستگی طول موج مد نقص اول و دوم به ازای زوایای تابش مختلف برای قطبش فرودی TM. رنگ های متفاوت، اندازه¬های متفاوت عامل کیفیت را نشان می¬دهد.

## ۴- نتیجه‌گیری

دراین تحقیق وابستگی پاسخ مگنتواپتیکی فارادی، بیضی-گونگی و عبور در بلور مگنتوفوتونی با دو لایه نقص به زاویه تابش نور فرودی برای هر دو قطبش مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شده که با افزایش زاویه تابش طول موج نقص به سمت طول موج‌های پایین‌تر میل می-کند. از این ویژگی می‌توان به سادگی در فیلترهای رنگی استفاده نمود. همچنین بیشینه مقدار عامل کیفیت در نزدیکی زاویه بروستر در قطبش TM اتفاق می افتد.

## مراجع


[1] M. Inoue, "*Magnetophotonic crystals*," **Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 834**, J.1.1.1(2005).

[2] N. Ansari and M. M. Tehranchi, "*Design of Omnidirectional Band Gap Independent of Refractive Indices of Ambient Media Using a Heterostructure Magnetic Photonic Crystal*," **Appl. Phys. B: Laser and Optics 99**, 191-195 (2010).

[3] M. J. Steel, M. Levy and R. M. Osgood, "*High transmission enhanced Faraday rotation in one-dimensional photonic crystals with defects*", **IEEE Photonics Technology Letters, 12** (9), 1171-1173 (2000).

[4] Kato, T. Matsushita, and A. Takayama, M. Egawa, , K. Nishimura, M. Inoue, "*Effect of optical losses on optical and magneto-optical properties of of one-dimensional magnetophotonic crystals for use in optical isolator devices*", **Opt. Commun. 219** (1), 271 (2003).

[5] N. Ansari, S. I. Khartzev, A. M. Grishin, "*Multicolor filter all-garnet magneto-optical photonic crystals*", **Opt. Lett. 37**, 3552 (2012).

[6] I. L. Lyubchanskii, et. al, " *Response of two-defect magnetic photonic crystals to oblique incidence of light: Effect of defect layer variation* ", **J. Appl. Phys. 100**, 096110 (2006).

[7] D. O. Dzibrou and A. M. Grishin, "*Fitting transmission and Faraday rotation spectra of [Bi3Fe5O12/Sm3Ga5O12]m magneto-optical photonic crystals*", **J. Appl. Phys. 106**, 043901 (2009).

[8] S. I. Khartsev and A. M. Grishin, "*High performance latching-type luminescent magneto-optical photonic crystals*", **Opt. Lett. 36**, 2806 (2011).




[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-13 ]