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

اثر اتلاف و پاشندگی در مشخصه‌های مدهای نقص 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 تابش نرمال با روش ماتریس انتقال ۴×۴ بررسی شده است. اثر اتلاف و پاشندگی فرکانسی المان¬های قطری و غیرقطری تانسور پذیرفتاری دی¬الکتریک لایه¬های مغناطیسی M، از تقریب دوقطبی الکتریکی بر روی مدهای نقص بررسی شده است و نشان داده شده که دلیل اصلی تفاوت در اندازه عبور و چرخش فارادی مد نقص اول و دوم، وجود اتلاف و تفاوت در ضرایب شکست و خاموشی برای دو قطبش راستگرد و چپگرد است.

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

Effects of Absorption and Dispersion in Defect Mode Characteristics of Magnetophotonic Crystals with Two Defects

N. Ansari[1], T. S. Parvini[2] and M. M. 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 magnetophotonic crystals with two defects as $(MN)^5M^2(NM)^2NM^2(NM)^5$ under normal incident 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 major difference between transmittance and Faraday rotation of first and second defect modes are attributed to the absorption and difference in refractive and extinction coefficients of two right and left handed circular polarizations.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-22]

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

۱- مقدمه

بلورهای مگنتوفوتونی[1] 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[2]، چرخاننده-های فارادی[3] و فیلترها باشند [۲]. افزایش عامل کیفیت[4]، 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. دلیل این امر، تفاوت ضریب شکست قطبش راستگرد و چپگرد در لایه مگنتواپتیکی است که منجر به جدایی پیک‌های عبور برای قطبش راستگرد و چپگرد شده و در نتیجه عبور کاهش می‌یابد [۳]. برای امکان افزایش چرخش فارادی بدون کاهش چرخش عبور و در نتیجه افزایش عامل کیفیت، از MOPC های با دو لایه نقص استفاده می‌شود. مکانیزم افزایش عامل کیفیت در این ساختار، جهت‌مند شدن دو مد نقص ساختار تک نقص با لایه تنظیم فاز[5] می‌باشد [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. در سال ۲۰۱۲ عامل کیفیت برای MOPC های با دو لایه نقص برای مواد مگنتواپتیکی گارنت با در نظر گرفتن اتلاف لایه‌های گارنت به صورت تجربی انجام شد که در آن میزان عبور مد اول و دوم با یکدیگر برابر نبود [۵]. در این مقاله به یافتن دلیل این پدیده با بررسی ضریب شکست قطبش راستگرد و چپگرد با در نظرگرفتن اتلاف وپاشندگی می‌پردازیم.

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. در این ساختار براگ، طول موج تشدید ۷۶۰ نانومتر به‌ازای تابش نرمال می-باشد.

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، برابر با

$$\varepsilon_{xx} = 1 + \omega_{p\pm}^2 f_\pm \frac{\omega_{0\pm}^2 - \omega^2 + \Gamma^2 - i2\omega\Gamma}{(\omega_{0\pm}^2 - \omega^2 + \Gamma^2)^2 + (2\omega\Gamma)^2}, \qquad (۲)$$

$$\varepsilon_{xy} = i\frac{\omega_p^2}{2}\sum_{\pm}(\pm 1)\frac{f_\pm}{\omega_{0\pm}}\frac{\omega(\omega_{0\pm}^2 - \omega^2 - \Gamma^2) - i\Gamma(\omega_{0\pm}^2 + \omega^2 + \Gamma^2)}{(\omega_{0\pm}^2 - \omega^2 + \Gamma^2)^2 + (2\omega\Gamma)^2}, \qquad (۳)$$

است که از تقریب دو قطبی الکتریکی به‌دست می‌آیند و

[1] Magneto-Optical Photonic Crystals
[2] Isolators
[3] Faraday Circulator
[4] Quality Factor, $Q = \frac{2|\theta_F|}{\ln(1/T)}$
[5] Phase adjustment layer

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-22]

ω_p فرکانس پلاسما، $\omega_{0\pm} = \omega_0 \pm \Delta$ فرکانس‌های تشدید برای نور قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد، $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_{res}$ فرکانس گذار تشدیدی الکترون، $\omega = 2\pi c/\lambda$ فرکانس نور، Γ پهنای خط گذار بین حالت پایه و حالت برانگیخته، ۲Δ فاصله بین ترازهای شکافته شده و $f \approx (f/2)(1 \pm \Delta/\omega)$ شدت نوسان برای قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد هستند که این داده‌ها برای لایه Er,Al,Ga:BIG از مرجع [۶] استفاده شده است. شکافتگی ترازها از برهم کنش های الکترون-الکترون، جفت شدگی اسپین-مدار، شکافتگی میدان کریستالی و اثر زیمن که وابسته به میدان مغناطیسی خارجی است، ناشی می شوند. پذیرفتاری لایه دی-الکتریک SGG، با معادله سلمیر، $\varepsilon_{SGG} = 1 + \frac{2.75}{1-\left(\frac{128}{\lambda(\mathrm{nm})}\right)^2}$، داده می‌شود.

حال به‌منظور محاسبه طیف عبور،T، چرخش فارادی، θ_F، و بیضی‌گونگی، e، بلور مگنتوفوتونی تحت تابش نرمال از روش ماتریس انتقال ۴×۴ استفاده می‌کنیم [۷] و می‌توان این کمیت‌ها را با دامنه و فاز قطبش دایروی راستگرد و چپگرد به صورت:

$$T = \frac{1}{2}(|t^+|^2 + |t^-|^2), \qquad (۴)$$

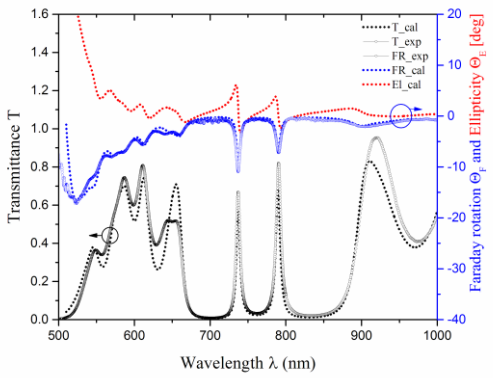
$$\theta_F = -\frac{1}{2}(\phi_+ - \phi_-), \qquad (۵)$$

$$e = \frac{|t^+| - |t^-|}{|t^+| + |t^-|}, \qquad (۶)$$

بیان کرد که t^+ (t^-) دامنه عبور قطبش دایروی راستگرد (چپگرد) و $\phi_\pm = \arg(t_\pm)$ است.

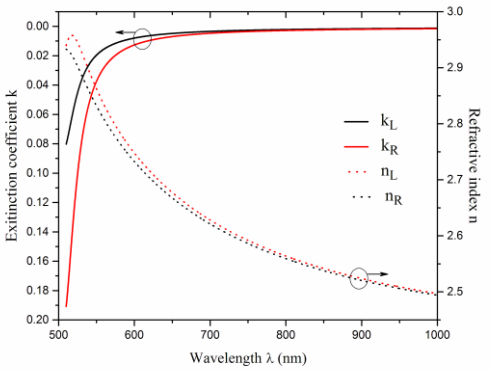
۳- نتایج

در شکل ۱ طیف عبور، چرخش فارادی و بیضی‌گونگی برای ساختار MOPC با دو لایه نقص است که مقادیر محاسبه شده با تئوری با نقطه‌چین و مقادیر تجربی با دایره‌های توخالی نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در ناحیه گاف نواری دو پیک دیده می‌شود که مد نقص اول، $\lambda_{res,1}$، و مد نقص دوم، $\lambda_{res,2}$، به ترتیب برابر با مقادیر ۷۳۹ و۷۹۰ نانومتر است و اندازه عبور و چرخش فارادی در $\lambda_{res,1}$ و $\lambda_{res,2}$ برای نمونه‌های مگنتواپتیکی پاشنده و بااتلاف، با یکدیگر برابر نیست.



شکل ۱: طیف عبور تئوری (خطوط مشکی نقطه‌چین) و تجربی (دایره‌های مشکی توخالی)، چرخش فارادی تئوری (خطوط آبی نقطه‌چین) و تجربی (دایره‌های آبی توخالی)، بیضی‌گونگی (خطوط قرمز نقطه‌چین) برای زاویه تابش نرمال برای بلور مگنتوفوتونی با دو نقص.

برای بیان دلیل تفاوت اندازه عبور و چرخش فارادی دو مد نقص، وابستگی ضرایب شکست و خاموشی برای دو قطبش دایروی راستگرد و چپگرد بر حسب طول موج برای لایه مگنتواپتیکی در شکل ۲ نشان داده شده است و دیده می‌شود که ضرایب شکست و خاموشی برای دو قطبش دایروی راستگرد و چپگرد متفاوت بوده و این تفاوت با افزایش طول موج کاهش می‌یابد.

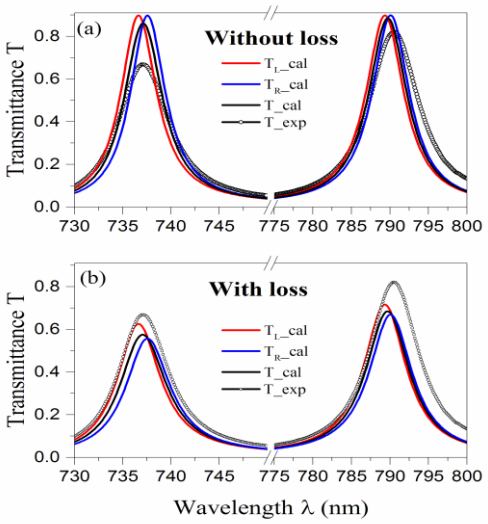


شکل ۲: وابستگی ضریب شکست (خط‌چین) و ضریب خاموشی (خط) به طول موج برای قطبش دایروی راستگرد (قرمز و با اندیس R) و چپگرد (مشکی و با اندیس L) برای لایه مگنتواپتیکی.

با مقایسه طیف عبور قطبش راستگرد و چپگرد و طیف عبور تجربی و تئوری محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴)

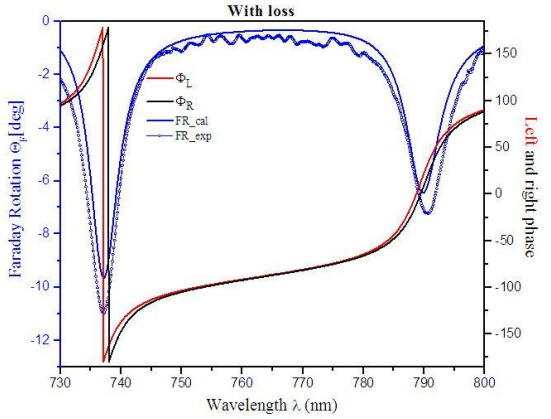
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-22]

برای ساختار با اتلاف، $\Gamma \neq 0$ و بدون اتلاف، $\Gamma = 0$، که در شکل ۳ نشان داده شده است، در می‌یابیم که برای حالت بدون اتلاف، بیشینه مقدار $|t^+|^2$ و $|t^-|^2$ در نزدیکی $\lambda_{res,1}$ و $\lambda_{res,2}$ با یکدیگر برابر است اما در نزدیکی مد نقص اول میزان جداشدگی $|t^+|^2$ و $|t^-|^2$ نسبت به مد نقص دوم بیشتر است که در اثر این امر اندازه‌ی عبور تئوری در $\lambda_{res,1}$ به میزان بسیار کمی نسبت به $\lambda_{res,2}$ کاهش می‌یابد در حالیکه نتایج تجربی تفاوت قابل توجهی برای عبور دو مد نقص نشان می‌دهد. برای حالت با اتلاف، بیشینه مقدار $|t^+|^2$ و $|t^-|^2$ در نزدیکی $\lambda_{res,1}$ و $\lambda_{res,2}$ با یکدیگر برابر نبوده و در اطراف طول موج‌های تشدید متقارن نیستند و در نزدیکی مد نقص اول میزان جداشدگی $|t^+|^2$ و $|t^-|^2$ بیشتر از مد نقص دوم است. از سوی دیگر با توجه به بیشتر بودن اندازه ضریب خاموشی قطبش راستگرد نسبت به چپگرد، اندازه عبور راستگرد، همواره از اندازه عبور چپگرد، برای حالت با اتلاف کمتر می باشد. بعلاوه با افزایش طول موج، ضریب خاموشی هر دو قطبش کاهش می‌یابد در نتیجه میزان کاهش عبور راستگرد و چپگرد در $\lambda_{res,1}$ نسبت به $\lambda_{res,2}$ بیشتر است. در حالت با اتلاف عبور تئوری و تجربی با یکدیگر همخوانی بیشتری نسبت به حالت بدون اتلاف دارد.



شکل ۳: طیف عبور تجربی،T_exp، تئوری، T_cal، قطبش راستگرد، T_R_cal، و چپگرد، T_L_cal، برای دو حالت بدون اتلاف (a) و با اتلاف (b). طیف عبور تجربی با دایره‌های مشکی توخالی، تئوری با خطوط مشکی، قطبش راستگرد تئوری با خطوط آبی و قطبش چپگرد با خطوط قرمز نشان داده شده است.

چرخش فارادی تجربی و تئوری، فاز قطبش راستگرد و چپگرد، برای حالت با اتلاف در شکل ۴ نشان داده شده است که می‌توان دید چرخش فارادی مد اول از مد دوم بیشتر است.



شکل ۴: چرخش فارادی تجربی،FR_exp، تئوری، FR_cal، فاز قطبش راستگرد، Φ_+ ، و چپگرد، Φ_- ، برای حالت با اتلاف.

نتیجه‌گیری

دراین تحقیق دریافتیم که با در نظر گرفتن پاشندگی بدون اتلاف برای المان‌های تانسور پذیرفتاری، در میزان عبور دو مد نقص تفاوت بسیار کمی ایجاد می‌شود و دلیل اصلی تفاوت در اندازه عبور و چرخش فارادی مد نقص اول و دوم، وجود اتلاف و تفاوت در ضرایب شکست و خاموشی دو قطبش راستگرد و چپگرد است.

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*", Optics Letters **37**, 3552 (2012).

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

[7] Š. Višňovský, K. Postava, and T. Yamaguchi, "*Magneto-optic polar Kerr and Faraday effects in magnetic superlattices*", Czech. J. Phys. **51**, 917 (2001).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-22]