بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی پایداری بلورهای فوتونی مغناطیسی نوع انعکاسی در مقابل خطاهای ضخامت از مرتبه‌ی نانومتر

مهدی زمانی[۱] و مجید قناعت‌شعار[۲]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

[۲] آزمایشگاه نانومغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - با استفاده از یک روش مبتنی بر ماتریس انتقال، ساختارهای بلورهای فوتونی با پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی بالا در مُد انعکاسی معرفی شده‌اند. در ادامه برای یک هدف عملی، تأثیر خطای ضخامت لایه‌های منفرد روی پارامترهای عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که علیرغم تأثیرپذیری نسبتاً شدید پاسخ‌های مگنتواپتیکی از خطاهای نانومتری، میزان انعکاس چنین ساختارهایی در مقابل این چنین خطاهایی پایدار است.

کلید واژه- بلور فوتونی مغناطیسی، انعکاس، چرخش کِر، خطای ضخامت.

Stability of reflection-type magnetophotonic crystals against nanometric thickness errors

Mehdi Zamani[1] and Majid Ghanaatshoar[2]

[1] Faculty of Physics, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

[2] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113 Tehran, Iran

Abstract- We have used a transfer matrix method (TMM) to introduce high performance reflection-type one dimensional magnetophotonic crystals (MPCs). In following, for practical purposes, the influence of the error in the thickness of individual layers on the operational parameters of the high-performance MPCs have also been considered. The results of the error analysis show that although the magneto-optical (MO) response of such high performance reflection-type MPC structures is affected by fabrication errors, their reflectance parameter is stable against nanometric thickness errors.

Keywords: Magnetophotonic crystal, Reflectance, Kerr rotation, Thickness error.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

۱- مقدمه

بلورهای فوتونی مغناطیسی[1] (MPCs) وقتی شکل می‌گیرند که مواد سازنده بلورهای فوتونی، مغناطیسی باشند و یا حتی تنها یک لایه‌ی نقص در ساختارهای بلور فوتونی از نوع مغناطیسی باشد. یک MPC از نوع کاواکی می‌تواند با وارد کردن یک لایه‌ی مغناطیسی به یک ساختار گاف فوتونی[2] (PBG) دی‌الکتریک ساخته شود. به خاطر حضور PBG، طول‌موج‌های خاصی از این ساختارها به شدت منعکس می‌شوند، در حالی که حضور لایه‌ی نقص یک تشدید عبوری در گاف ایجاد کرده و اجازه می‌دهد تا برخی طول‌موج‌ها در داخل ساختار انتشار یابند. PBG می‌تواند برای افزایش اثرات مگنتواپتیکی از قبیل اثر فاراده و کِر بکار برده شود. کارهای نظری و تجربی نشان داده‌اند که الحاق یک لایه‌ی مغناطیسی به یک ساختار PBG به وسیله‌ی تمرکز نور در لایه‌ی مغناطیسی، می‌تواند به طور چشمگیری پاسخ‌های مگنتواپتیکی را افزایش دهد.

اصولاً، هدف اصلی کارهای نظری در زمینه بلورهای فوتونی مغناطیسی دستیابی به ساختارهایی با پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی بالا بوده است [۱-۵]. اما، به دلیل وجود خطای ساخت، معمولاً تفاوت بزرگی بین پیش‌بینی‌های نظری و آنچه در عمل رخ می‌دهد وجود دارد. یکی از موارد بوجود آورنده‌ی این اختلاف، خطای ضخامت لایه‌های منفرد در فرآیند ساخت است که در این مقاله سعی نموده‌ایم تا یک پیش‌بینی از اثر چنین خطاهایی داشته باشیم. بدین منظور، MPCهایی با پاسخ‌های بالا را در مُد انعکاسی معرفی نموده و اثر خطای نانومتری ضخامت را روی پاسخ‌های آنها بررسی کرده‌ایم.

۲- نتایج ومحاسبات

روش عددی مورد استفاده بر پایه‌ی روش ماتریس انتقال[3] (TMM) بنا شده است [۶]. اساس این روش بر مبنای تعریف دو ماتریس ۴×۴ استوار است؛ یکی ماتریس مرزی و دیگری ماتریس انتشار مربوط به هر لایه که با استفاده از آنها می‌توان شرایط مرزی را به طور مستقیم بر مسئله اعمال کرد. ماتریس انتقال کل در یک سیستم چندلایه از ضرب ماتریس‌های مربوط به تمام لایه‌ها بدست می‌آید. این ماتریس مشخصه‌های اپتیکی (عبور و انعکاس) و مگنتواپتیکی (چرخش فاراده و کِر) یک ساختار را بدست می‌دهد. باید اشاره کرد که نتایج این روش دقیق هستند و هیچ‌گونه ساده‌سازی در آن اعمال نمی‌شود.

مواد مورد استفاده در طراحی ساختارهای MPC، Si و SiO به عنوان لایه‌های دی‌الکتریک و Ce:YIG به عنوان لایه مغناطیسی در نظر گرفته می‌شوند. بر خلاف لایه‌های غیرمغناطیسی که محیط‌هایی همسانگرد با تانسورهای دی‌الکتریک قطری هستند، لایه‌های مغناطیسی بکار رفته در MPCها به وسیله‌ی تانسورهای غیر قطری وابسته به مغناطش توصیف می‌شوند. به عنوان مثال اگر مغناطش محیط در راستای محور z باشد، تانسور دی‌الکتریک یک محیط مغناطیسی با $\mu=1$ توسط رابطه زیر داده می‌شود:

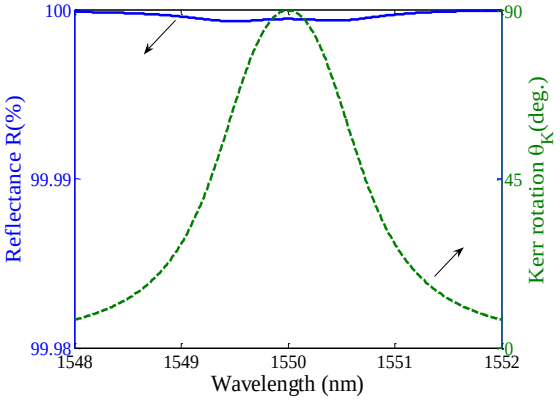
$$\varepsilon_M = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & i\varepsilon_2 & 0 \\ -i\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_1 \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

به طوری که عنصر قطری ε_1، ضریب شکست را تعیین می‌کند و عنصر غیر قطری ε_2، مرتبط است با چرخش مغناطیسی و یک رابطه خطی با بردار مغناطش دارد. عناصر تانسور دی‌الکتریک لایه مغناطیسی Ce:YIG، $\varepsilon_1 = 4/884$ و $\varepsilon_2 = 9\times10^{-3}$ در طول‌موج $\lambda=1550$ نانومتر هستند. در این طول‌موج مخابراتی، ضرایب شکست لایه‌های دی‌الکتریک Si و SiO به ترتیب عبارتند از $n_{Si}=3/48$ و $n_{SiO}=1/85$. ضخامت لایه مغناطیسی به صورت $\lambda/2n_{Ce:YIG}$، و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک به ترتیب به صورت $\lambda/4n_{Si}$ و $\lambda/4n_{SiO}$ تنظیم شده‌اند. از این پس، لایه‌های Ce:YIG، Si و SiO را به ترتیب با M، H و L نشان می‌دهیم.

[1] Magnetophotonic crystals
[2] Photonic band gap
[3] Transfer Matrix Method

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

MPCای انتخاب شده، ساختاری به صورت $(H/L)^4/M/(L/H)^8/H/(H/L)^8/M/(L/H)^4$ دارد و همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی به صورت میزان انعکاس R=۱۰۰% و چرخش کِر θ_K=۸۹/۸۵° را به دست می‌دهد. طول این ساختار که دارای ۵۱ لایه است تنها ۸/۱۶ µm است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ساختار معرفی شده



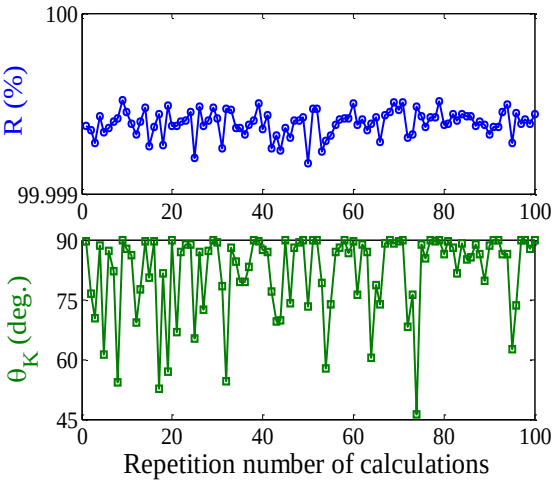
شکل ۱: طیف انعکاس و چرخش کِر مربوط به MPC معرفی شده به عنوان تابعی از طول موج .

با مقادیر همزمان انعکاس بالا و چرخش کِر بزرگ، یک چرخاننده‌ی[۴] کامل قطبش است.

برای اهداف عملی، اثر خطای ضخامت لایه‌های منفرد روی پارامترهای عملیاتی چنین MPCهایی باید مورد بررسی قرار گیرد. در فرآیند ساخت چندلایه‌ها، لایه‌ها کاملاً تیز نیستند و همچنین زبری سطحی آنها ممکن است منجر به انحراف در عملکرد قطعات شود. این انحراف برای یک وسیله‌ی مهندسی شده با یک پاسخ مگنتواپتیکی کوچک ناچیز است [۷]، اما ممکن است برای یک MPC با پاسخ بالا، بزرگ باشد. رویکرد مورد نظر به منظور بررسی چنین انحرافی در پاسخ‌های ساختار معرفی شده این است که برای هر یک از لایه‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار دو نوع خطای ضخامت تصادفی در حدود ۰/۲nm و یا ۱ nm لحاظ می‌کنیم. این کار بوسیله‌ی ایجاد مجموعه‌ای از اعداد تصادفی بین ۰/۲ nm و ۰/۲ nm- (و یا بین ۱ nm و ۱ nm-) انجام می‌شود که به ترتیب به لایه‌های سازنده‌ی ساختار نسبت داده می‌شوند. سپس میانگین‌گیری آماری از پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی به عمل خواهد آمد که نتیجه‌ی تکرار محاسبات به دفعات بسیار است. نتایج چنین محاسباتی تخمین خوبی از مقادیر عملی بدست می‌دهد. باید ذکر کرد که این مقادیر حداقل میزان خطایی هستند که می‌توان در محاسبات در نظر گرفت و مربوط به دستگاه‌های با حداکثر دقت در لایه‌نشانی می‌باشند.

مقادیر میانگین بدست آمده برای پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی ساختار معرفی شده عبارتند از میزان انعکاس R=۱۰۰% و چرخش کِر θ_K=۸۱/۷۷° برای خطای ضخامت ۰/۲ nm، و میزان انعکاس R=۱۰۰% و چرخش کِر θ_K=۳۸/۷۷° برای خطای ضخامت ۱ nm. همان‌گونه که در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) دیده می‌شود، در بدست آوردن این مقادیر ۱۰۰ بار محاسبات تصادفی انجام شده است، اما به آسانی می‌توان دید که نتایج تقریباً یکسانی برای محاسبات تصادفی به دفعات خیلی بیشتر بدست می‌آیند.

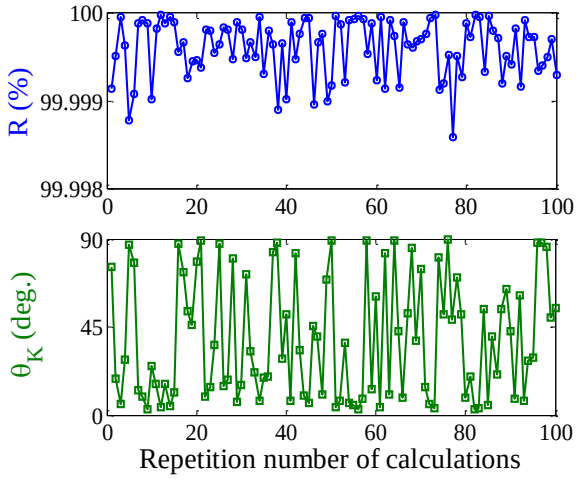
نتایج بدست آمده از آنالیز خطای ضخامت نشان می‌دهند که به طور کلی انعکاس از MPC نوع انعکاسی معرفی شده



(الف)

[4] Rotators

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



(ب)

شکل ۲: افت و خیز نوعی در انعکاس و چرخش کِر ساختار معرفی-شده با خطای ضخامت تصادفی (الف) ۰/۲ nm و (ب) ۱ nm برای هر لایه منفرد.

در مقابل چنین خطاهایی پایدار بوده است. به ازای هر دو مقدار خطای لحاظ شده، میزان انعکاس در تمام دفعات تکرار محاسبات تقریباً یکسان بوده است و انحراف قابل ملاحظه‌ای با حالت بدون اعمال خطا نداشته است. این در حالی است که میزان تغییرات در چرخش کِر برای خطای ضخامت ۱ nm قابل توجه است. به هر حال، پایدار بودن انعکاس در مقابل خطاهای ضخامت نشان می‌دهد که بلورهای فوتونی مغناطیسی انتخاب مناسبی جهت استفاده به عنوان آینه‌های وابسته به قطبش با بازتاب کامل هستند.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان دستیابی به بلورهای فوتونی مغناطیسی با پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی بالا را در مُد انعکاسی مورد بررسی قرار داده‌ایم. همچنین، یک ارزیابی از اثر خطای ضخامت لایه‌های تشکیل-دهنده‌ی ساختار معرفی شده روی پاسخ‌های مربوطه داشته‌ایم. نتایج نشان می‌دهند که تنها پاسخ‌های مگنتواپتیکی (چرخش کِر) چنین ساختارهایی بطور قابل توجهی تحت تأثیر خطاهای نانومتری ضخامت لایه‌ها قرار می‌گیرند، و میزان انعکاس در مقابل این چنین خطاهایی پایدار است. با توجه به این نتایج درمی‌یابیم که به منظور عملیاتی کردن وسایل مبتنی بر بلورهای فوتونی مغناطیسی، روش‌ها و دستگاه‌های ساخت با دقت لایه‌نشانی بالا باید مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

[1] M. Zamani, M. Ghanaatshoar, H. Alisafaee, "Compact one-dimensional magnetophotonic crystals with simultaneous large Faraday rotation and high transmittance," **J. Mod. Opt.** 59 (2012) 126-130.

[2] T. Sun, J. Luo, P. Xu, L. Gao, "Independently tunable transmission-type magneto-optical isolators based on multilayers containing magnetic materials," **Phys. Lett. A** 375 (2011) 2185-2188.

[3] Y. H. Lu, Y. P. Lee, J. Y. Rhee, "Enhanced Kerr Effect with High Reflectance for Normal and Oblique Incidence in One-dimensional Three-defect Asymmetric Magneto-photonic Crystals," **J. Korean Phys. Soc.** 55 (2009) 1223-1226.

[4] H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, M. Inoue, "*Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals*," **J. Appl. Phys.** 93 (2003) 3906-3911.

[5] M. J. Steel, M. Levy, R. M. Osgood, "Large magnetooptical Kerr rotation with high reflectivity from photonic band gap structures with defects," **J. Lightwave Technol.** 18 (2000) 1289-1296.

[6] J. Zak, E. R. Moog, C. Liu, S. D. Bader, "*Fundamental magneto-optics*," **J. Appl. Phys.** 68 (1990) 4203-4207.

[7] M. Moradi, M. Ghanaatshoar, "Cavity enhancement of the magneto-optic Kerr effect in glass/Al/SnO_2/PtMnSb/SnO_2 structure," **Opt. Commun.** 283 (2010) 5053-5057.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]