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 تأثیر میدان مغناطیسی خارجی برروی خواص مگنتواپتیکی بلورهای مگنتوفوتونی یک بعدی

عبدالرحمن نامدار[1] ، فیروز واحدی[1]، رضا عبدی قلعه[2]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز
[۲]گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی

چکیده – در این مقاله با استفاده از روش ماتریس انتقال۴×۴ ، خواص مگنتو اپتیکی بلور های مگنتو فوتونی یک بعدی، تحت تغییرات میدان مغناطیسی خارجی بررسی شده است. بدین منظور خصوصیات مگنتواپتیکی فیلمی با ساختار میکروکاواک به ازای طول موج های مختلف و نیز طول موج طراحی ۱۵۵۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که چرخش فارادی نسبت به تغییر میدان مغناطیسی خارجی حساسیت زیادی دارد. با بررسی این نتایج می توان ساختاری ایده آل برای کاربرد در ابزار های مگنتواپتیکی به دست آورد.

کلید واژه- بلور مگنتوفوتونی، تراگسیل، ساختار میکروکاواک، چرخش فارادی، روش ماتریس انتقال

Effect of external magnetic field variation on the magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals

Abdolrahman Namdar[1], Firooz Vahedi[1], Reza abdi-ghaleh[2]

[1]Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Abstract- In this paper, we investigate the dependence of magneto-optical properties in 1D MPCs (one-dimensional magneto photonic crystals) by changing the external magnetic field with 4 by 4 transfer matrix method. The film structure of interest, which has symmetric periodicity, is microcavity structure. The magneto-optical properties of this structure are distinguished in telecommunication wave length 1300 nm and 1550 nm. The results demonstrated that Faraday rotation has high sensibility to variation of external magnetic field. This is of intrest from the point of view of actual magneto-optical device fabrication.

Keywords: Faraday rotation, Magnetophotonic crystal, Microcavity structure, Transmittance, Transfer matrix method

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

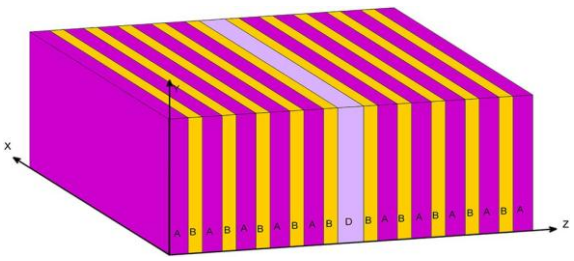
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

بلورهای‌فوتونی از لایه‌های متناوب دی‌الکتریکی یا فلزی تشکیل شده‌اند. نوری که در یک بلور فوتونی منتشر می‌شود، با ضرایب شکست متناوب ساختار اندرکنش می‌کند و بدین صورت نوارهای مجاز و غیر مجاز برای طیف طول موجی به وجود می‌آید. با اضافه کردن نقص به ساختار تناوبی، مدهای عبوری در ناحیه‌ی گاف نواری ایجاد می‌شود که اساس طراحی فیلترهای فرکانسی است. [1]. وقتی که بلورهای فوتونی با مواد مغناطیسی ترکیب شوند، (مثل عناصر کمیاب و نادرلعل آهن) بلورهای مگنتوفوتونی به دست می‌آیند[2]. آغاز مطالعات بر روی بلورهای مگنتوفوتونی به سال ۱۹۹۵ برمی‌گردد[3]. در بلورهای مگنتوفوتونی، از خاصیت محدود شدن شدید فوتون به واسطه‌ی جایگزیدگی قوی نور در اطراف نقص مغناطیسی برای تقویت و بهینه کردن اثرات مگنتواپتیکی استفاده می‌شود. در این مقاله مقادیر تراگسیل و چرخش فارادی برای ساختار پیشنهادی به ازای تغییرات میدان مغناطیسی خارجی بررسی شده است.

۲- بیان مسئله و روش محاسبات

ساختار میکروکاواک پیشنهادی در این مقاله به صورت $(SiO_2/TiO_2)^n/(Ce{:}YIG)/(TiO_2/SiO_2)^n$ می‌باشد. فیلم مورد نظر روی زیرلایه‌ی شیشه تهیه شده است. ضریب دی‌الکتریک شیشه $\varepsilon_g = 2.25$ است. شکل (۱) هندسه‌ی ساختار مورد نظر را نشان داده است:



شکل ۱: هندسه‌ی ساختار میکروکاواک $(A/B)^n/(D)/(B/A)^n$. A و B معرف لایه‌های دی‌الکتریکی و D معرف لایه ی مغناطیسی می‌باشد.

در اینجا n عدد تکرارلایه‌های دی‌الکتریک (آینه‌های براگ) است. برای ساختار مورد نظر n=8 انتخاب شده است. ساختار لایه ای نسبت به لایه ی نقص مرکزی متقارن می باشد. این ساختار، مشابه ساختار فابری- پرو در یک فیلتر اپتیکی می باشد. طول موج طراحی برابر با $\lambda_0 = 1550\ nm$ است. برای لایه‌های دی‌الکتریک SiO_2 و TiO_2 مقادیر ضریب شکست و ضخامت لایه ها به ترتیب عبارتنداز: $n_A = \sqrt{\varepsilon_A}$، $n_B = \sqrt{\varepsilon_B}$، $d_A = \frac{\lambda_0}{4n_A}$، $d_B = \frac{\lambda_0}{4n_B}$. لایه‌ی‌مغناطیسی دارای ضریب شکست $n_D = \sqrt{\varepsilon_{xx} \pm i\varepsilon_{xy}}$ و ضخامت $d_D = \frac{\lambda_0}{2n_D}$ می‌باشد. در طول موج مخابراتی $\lambda_0 = 1550\ nm$ ماده‌ی مگنتواپتیکی Ce:YIG دارای تانسور دی‌الکتریکی با المان‌های $\varepsilon_{xx} = 4.884$ و $\varepsilon_{xy} = 0.009i$ است [4]. برای مواد مگنتواپتیکی در فرکانس‌های اپتیکی مقدار تراوایی برابر یک می‌باشد. هم چنین در این طول موج، لایه‌ی SiO_2 دارای ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon_A = 2.19$ و لایه‌ی TiO_2 نیز دارای ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon_B = 4.70$ می‌باشد. Ce:YIG دارای پاسخ مگنتواپتیکی بالا و نیز جذب اندک در ناحیه ی فروسرخی می‌باشد. پرتو نور قطبیده‌ی خطی به طول موج‌های مختلف و هم چنین طول موج طراحی را در نظر می‌گیریم که عمود بر سطح لایه‌ها از سمت چپ بر ساختار تابیده می‌شود. بامشخص بودن پارامتر های اپتیکی مواد، با محاسبه‌ی مستقیم عددی و روش ماتریس انتقال می توان طیف تراگسیل و بازتاب را به همراه چرخش قطبش های نور تراگسیلی و بازتابیده به دست آورد. در این مقاله به بررسی طیف تراگسیل و چرخش قطبش نور تراگسیلی (چرخش فارادی)پرداخته شده است.

رهیافت ماتریس انتقال :

هر لایه ی j از ساختار با ضخامت dj و با تانسورگذردهی الکتریکی نسبی مشخص می شود [5] :

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

مولفه‌های غیر قطری تانسورگذردهی الکتریکی وقتی ظاهر می‌شود که یک میدان مغناطیسی خارجی($\vec{B}_{ext}$) در جهت محورz یا انتشار نور به کاربرده شود. میدان مغناطیسی خارجی در مولفه‌ی ε_{xy} تانسور مورد نظر تأثیر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

گذار می‌باشد بنابراین با تغییر مقادیر ε_{xy} ما می‌توانیم تغییرات $\vec{B}_{ext}$ را بررسی کنیم. در حالت اشباع میدان مغناطیسی و در طول موج طراحی ذکر شده مقدار $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{sat} = 0.009i$ می‌باشد. مولفه‌های $\varepsilon^{(j)}$ به طور عمومی به شکل مختلط می‌باشند. برای مشاهده‌ی جزئیات رجوع شود [2,5,6]. ماتریس انتقال کل M را با استفاده از ماتریس مشخصه ی $S^{(j)}$ بدست می آوریم:

(۲)

$$S^{(j)} = \begin{bmatrix} \cos\beta_+^{(j)} & (i/N_+^{(j)})\sin\beta_+^{(j)} & 0 & 0 \\ iN_+^{(j)}\sin\beta_+^{(j)} & \cos\beta_+^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\beta_-^{(j)} & (i/N_-^{(j)})\sin\beta_-^{(j)} \\ 0 & 0 & iN_-^{(j)}\sin\beta_-^{(j)} & \cos\beta_-^{(j)} \end{bmatrix}$$

در رابطه‌ی بالا ماتریس $S^{(j)}$ قطری بلوکی و $N_\pm$ نیز ضریب شکست مختلط لایه ها می باشد:

$$\beta_\pm^{(j)} = \frac{\omega}{c} N_\pm^{(j)} d_j \qquad (۳)$$

با به دست آوردن ماتریس M، می توان ضرایب تراگسیل، مقدار عبوردهی و چرخش فارادی را به دست آورد.

$$M = [D^0]^{-1} \prod_{j=1}^{N} S^{(j)} D^{(N+1)} \qquad (۴)$$

ضرایب تراگسیل ، چرخش فارادی و مقدار عبوردهی از روابط زیر تبعیت می کنند:

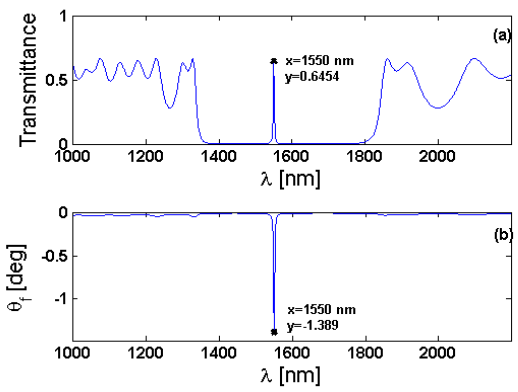
$$t_+ = \frac{1}{M_{11}} \quad , \quad t_- = \frac{1}{M_{33}} \qquad (۵)$$

$$\Theta_F = \theta_t = -\frac{1}{2} arg\left(\frac{M_{33}}{M_{11}}\right) \qquad (۶)$$

$$T = \frac{1}{2}(|t_+|^2 + |t_-|^2) \qquad (۷)$$

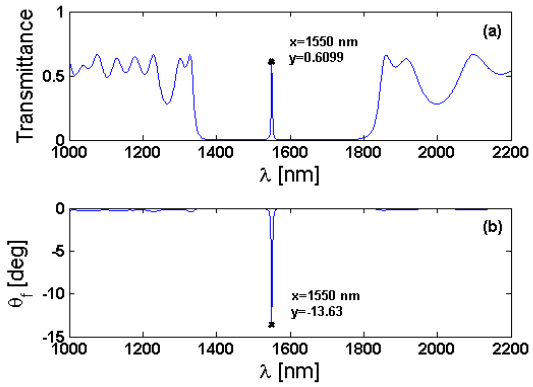
۳- نتایج و بحث

ابتدا طیف های تراگسیل وچرخش فارادی برای ساختار مورد نظر بررسی شد. همان طوری که ازشکل (۲) مشاهده می‌شود:



شکل۲: طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی با $0.1\varepsilon_{sat}$ برای بلور مگنتوفوتونی یک بعدی با ساختارمیکروکاواک پیشنهاد ی .

مد تشدیدی در طیف تراگسیل و همچنین در طیف چرخش فارادی در طول موج طراحی مشاهده می‌شود. مقدار تراگسیل برابر با T=0.6454 و مقدار چرخش فارادی برابر با $\theta_F = -1.389$ به دست می‌آید. با کاهش میدان مغناطیسی خارجی نسبت به حالت اشباعی از طریق کاهش مولفه‌ی ε_{xy} نشان داده شده است که مقدار تراگسیل بالا و چرخش فارادی اندکی به دست می‌آید.

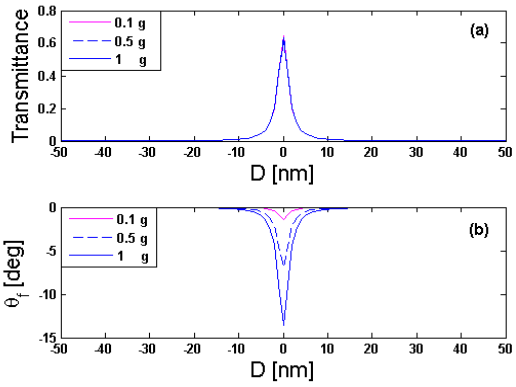


شکل۳: طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی با ε_{sat} (حالت اشباع میدان مغناطیسی خارجی) برای بلور مگنتوفوتونی با ساختارمیکروکاواک پیشنهادی .

در این حالت، میدان مغناطیسی اعمالی به اندازه‌ی کافی قوی بوده و لایه‌های مگنتواپتیکی را به حد اشباع مغناطیسی می‌رساند. با افزایش $\vec{B}_{ext}$ مشاهده می‌شود که مقدار تراگسیل کاهش می‌یابد اما این کاهش در مقدار تراگسیل، مقدار چشم‌گیری نیست.چرخش فارادی نیز با افزایش $\vec{B}_{ext}$ به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

مقدار چرخش فارادی($\theta_F = -13.63$) در مقایسه با ویژه چرخش فارادی فیلم نازک مغناطیسی (که از مرتبه‌ی چند درجه بر میکرون است) بسیار بزرگتر می‌باشد. نکته‌ی جالب توجه این است که برای مثال وقتی مقدار ε_{sat} نصف می‌شود و ضخامت لایه‌ی نقص دقیقا دوبرابر ضخامت اولیه می‌شود مقدار تراگسیل و چرخش فارادی ثابت مانده و شکل حاصل، همان شکل ۳ به دست می‌آید بنابراین تغییرات حاصل از کاهش میدان مغناطیسی توسط افزایش ضخامت لایه‌ی نقص و برعکس می‌تواند تصحیح و کنترل شود.



شکل ۴: نمودار تراگسیل و چرخش فارادی نسبت به ضخامت لایه نقص به ازای میدان‌های مغناطیسی متفاوت در طول موج nm ۱۵۵۰. در حالت اشباع میدان مغناطیسی $\varepsilon_{sat} = g = 0.009i$ می‌باشد. منظور از مقادیر مثبت و منفی برای ضخامت لایه‌ی نقص یعنی مقادیری که بیش‌تر و کمتر از ضخامت اولیه‌ی لایه‌ی نقص می‌باشند.

در شکل ۴ پیک تشدیدی در مقدارتراگسیل و چرخش فارادی به ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف در ضخامت اولیه‌ی لایه‌ی نقص ($d_{D_0} = \frac{\lambda_0}{2n_D}$) و در طول موج nm ۱۵۵۰ اتفاق افتاده است. در شکل ((4(a)) با افزایش میدان مغناطیسی خارجی، مقدار تراگسیل کاهش می‌یابد اما این کاهش به طور چشم گیر نمی‌باشد و تقریبا سه پیک تشدیدی بر روی هم می‌افتد. ازنمودار، مشخص است که وابستگی T به تغییرات میدان مغناطیسی خارجی، جزئی و ناچیز است.

در شکل ((4(b)) به ازای سه مرحله افزایش در میدان مغناطیسی خارجی مقدارچرخش فارادی دچار افزایش شدیدی شده است. تقویت مقدار θ_F با افزایش ε_{xy} رابطه‌ی مستقیم دارد. برای مثال زمانی که ثابت دی‌الکتریک از 0.1g به g می‌رسد مقدار چرخش فارادی نیز با تقریب بسیار خوبی ۱۰ برابر می‌شود. باید به این نکته توجه کرد که در تک لایه‌ی مغناطیسی چرخش فارادی با افزایش ضخامت، افزایش می‌یابد ولی در بلور مگنتوفوتونی در طول موج طراحی پیک تشدیدی حاصل می‌شود.

۴- نتیجه گیری

برای بلور مگنتوفوتونی با ساختار میکروکاواک پیشنهاد شده طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی بر حسب تغییر میدان مغناطیسی خارجی مطالعه شد. مشاهده شد که افزایش میدان مغناطیسی خارجی تاثیر به سزایی در تقویت مقدار چرخش فارادی دارد. وابستگی T به تغییرات میدان مغناطیسی خارجی بسیار کمتر از وابستگی θ_F به این تغییرات است. از شکل‌های 2 و 3 دریافت می‌شود که پهنای گاف باند و موضع پیک تشدیدی در روی محور افقی مستقل از $\vec{B}_{ext}$ می‌باشد.

نکته‌ی حائز اهمیت این است که افزایش ضخامت لایه‌ی نقص یا افزایش میدان مغناطیسی خارجی، هردو باعث تقویت شدید θ_F می‌شوند اما در کارهای تجربی مورد اول مانع کوچک‌سازی ابزارآلات مگنتواپتیکی می‌شود پس در مرحله‌ی نخست افزایش $\vec{B}_{ext}$ بهترین گزینه برای افزایش چرخش فارادی است.

مراجع

[1] S. John, "*Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*", **Phys. Rev. Lett**. 58, 2486 (1987).

[2] I. L. Lyubchanskii, N. N. Dadoenkova, M. I. Lyubchanskii, E. A. shapovalov, Th. Rasing, "*Magnetic photonic crystals*", **J. Phys. D: Appl. Phys**. 36, R277 (2003).

[3] M. Inoue, K. Isamoto, T. Yamamoto, T. Fujii, "*Magneto-optical faraday effect of discontinuous magnetic media with a one – dimensional array structure* ", **J. Appl. Phys**. 79, 1611 (1996)

[4] M. Levy, H. C. Yang, M. J. Steel, J., "*Flat-top response in one-dimensional magnetic photonic bandgap structures with faraday rotation enhancement* ", **J. Lightw. Technol**. 19, 1964 (2001).

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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]