



لیکن
پژوهشگاه فناوری
مغناطیسی و فوتونیک ایران

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 بر روی خواص مگنتو اپتیکی بلورهای مگنتوفوتونی یک بعدی

عبدالرحمن نامدار^۱، فیروز واحدی^۱، رضا عبدالقلعه^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

^۲گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی

چکیده - در این مقاله با استفاده از روش ماتریس انتقال 4×4 ، خواص مگنتو اپتیکی بلورهای مگنتوفوتونی یک بعدی، تحت تغییرات میدان مغناطیسی خارجی بررسی شده است. بدین منظور خصوصیات مگنتو اپتیکی 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 ابزارهای مگنتو اپتیکی 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 Namdar¹, Firooz Vahedi¹, Reza abdi-ghaleh²

¹Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Department 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

۱- مقدمه

در اینجا n عدد تکرار لایه‌های دیالکتریک (آینه‌های براگ) است. برای ساختار مورد نظر $n=8$ انتخاب شده است. ساختار لایه‌ای نسبت به لایه‌ی نقص مرکزی متقارن می‌باشد. این ساختار، مشابه ساختار فابری-پرو در یک فیلتر اپتیکی می‌باشد. طول موج طراحی برابر با $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ است. برای لایه‌های دیالکتریک SiO_2 و TiO_2 مقادیر ضریب شکست و ضخامت لایه‌ها به ترتیب $d_A = \frac{\lambda_0}{4n_A}$ و $d_B = \sqrt{\varepsilon_B}$ می‌باشد. لایه‌ی مغناطیسی دارای ضریب شکست $d_D = \frac{\lambda_0}{4n_D}$ و ضخامت $d_D = \sqrt{\varepsilon_{xx} \pm i\varepsilon_{xy}}$ می‌باشد. در طول موج مخابراتی $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ماده‌ی مگنتو اپتیکی $\varepsilon_{yy} = 0.009i$ و $\varepsilon_{xx} = 4.884$ دارای تانسور دیالکتریکی با المان‌های Ce:YIG می‌باشد. برای مواد مگنتو اپتیکی در فرکانس‌های اپتیکی مقدار تراوایی برابر SiO_2 یک می‌باشد. هم چنین در این طول موج، لایه‌ی TiO_2 دارای ثابت دیالکتریک $\varepsilon_A = 2.19$ و لایه‌ی Ce:YIG دارای پاسخ مگنتو اپتیکی بالا و نیز جذب اندک در ناحیه فرسخی 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. بامضای بودن پارامترهای اپتیکی مواد، با محاسبه‌ی مستقیم عددی و روش ماتریس انتقال می‌توان طیف تراگسیل و بازتاب را به همراه چرخش قطبش‌های 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 لایه‌ی زاز ساختار با ضخامت z_h و با تانسور گذردهی دیالکتریکی نسبی مشخص می‌شود [5] :

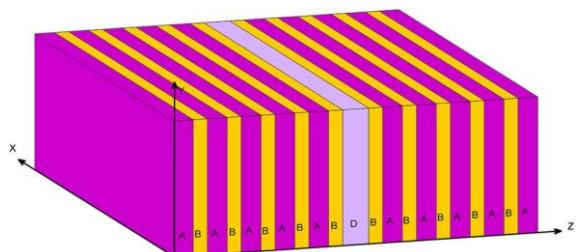
$$\varepsilon^{(j)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(j)} & \varepsilon_{xy}^{(j)} & 0 \\ -\varepsilon_{xy}^{(j)} & \varepsilon_{xx}^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz}^{(j)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

مولفه‌های غیر قطری تانسور گذردهی الکتریکی وقتی ظاهر می‌شود که یک میدان مغناطیسی خارجی (B_{ext}) در جهت محور z یا انتشار نور به کاربرده شود. میدان مغناطیسی خارجی در مولفه‌ی ε_{xy} تانسور مورد نظر تأثیر

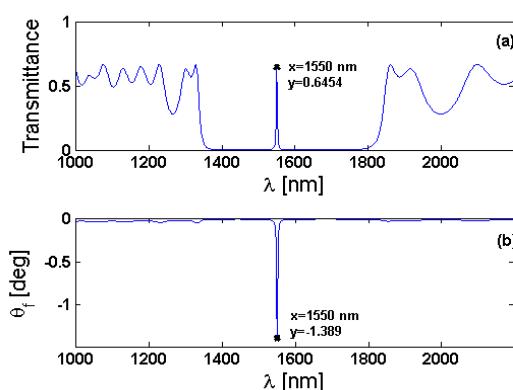
بلورهای فوتونی از لایه‌های متناوب دیالکتریکی یا فلزی تشکیل شده‌اند. نوری که در یک بلور فوتونی منتشر می‌شود، با ضرایب شکست متناوب ساختار اندرکنش می‌کند و بدین صورت نواههای مجاز و غیر مجاز برای طیف طول موجی به وجود می‌آید. با اضافه کردن نقص به ساختار تناوبی، مدهای عبوری در ناحیه‌ی گاف نواری ایجاد می‌شود 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 مگنتو اپتیکی 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 $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)^n/(\text{Ce:YIG})/(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)^n$ می‌باشد. فیلم مورد نظر روی زیرلایه‌ی شیشه تهیه شده است. ضریب دیالکتریک شیشه $\varepsilon_g = 2.25$ است. شکل (1) هندسه‌ی ساختار مورد نظر را نشان داده است:

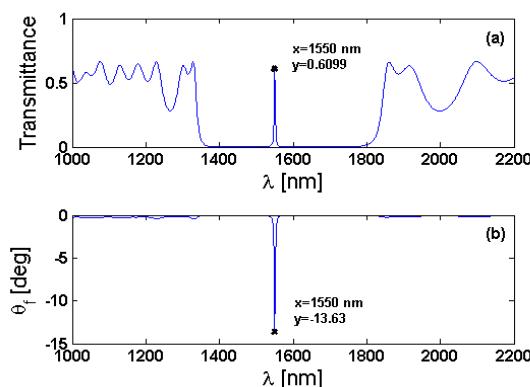


شکل ۱: هندسه‌ی ساختار میکروکاواک $(A/B)^n/(D)/(B/A)^n$ معرف لایه‌ی مغناطیسی می‌باشد.



شکل ۲: طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی با $\mu_{ext} = 0.1$ برای بلور مگنتوفوتونی یک بعدی با ساختار میکروکاواک پیشنهادی.

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.



شکل ۳: طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی با μ_{ext} (حالت اشباع میدان مغناطیسی خارجی) برای بلور مگنتوفوتونی با ساختار میکروکاواک پیشنهادی.

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

گذار می‌باشد بنابراین با تغییر مقادیر ϵ_{xy} ما می‌توانیم تغییرات \bar{B}_{ext} را بررسی کنیم. در حالت اشباع میدان مغناطیسی و در طول موج طراحی ذکر شده مقدار $\epsilon_{xy} = \epsilon_{sat} = 0.009i$ به طور عمومی به شکل مختلط می‌باشد. برای مشاهده‌ی جزئیات رجوع شود [۲,۵,۶]. ماتریس انتقال کل M را با استفاده از ماتریس مشخصه‌ی $S^{(j)}$ بدست می‌آوریم:

$$S^{(j)} =$$

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

در رابطه‌ی بالا ماتریس $S^{(j)}$ قطری بلوکی و $N_{\pm}^{(j)}$ نیز ضربی شکست مختلط لایه‌ها می‌باشد:

$$\beta_{\pm}^{(j)} = \frac{\omega}{c} N_{\pm}^{(j)} d_j \quad (3)$$

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

$$M = [D^0]^{-1} \prod_{j=1}^N S^{(j)} D^{(N+1)} \quad (4)$$

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

$$t_+ = \frac{1}{M_{11}}, \quad t_- = \frac{1}{M_{33}} \quad (5)$$

$$\theta_F = \theta_t = -\frac{1}{2} \arg \left(\frac{M_{33}}{M_{11}} \right) \quad (6)$$

$$T = \frac{1}{2} (|t_+|^2 + |t_-|^2) \quad (7)$$

۳- نتایج و بحث

ابتدا طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی برای ساختار مورد نظر بررسی شد. همان طوری که از شکل (۲) مشاهده می‌شود:

رابطه‌ی مستقیم دارد. برای مثال زمانی که ثابت دی-الکتریک از 0.1 g به g می‌رسد مقدار چرخش فارادی نیز با تقریب بسیار خوبی 10 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 تشديدي حاصل می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

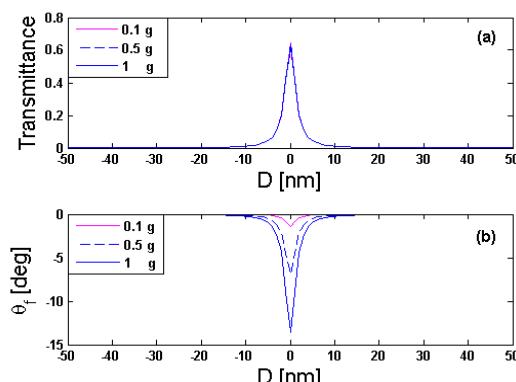
برای بلور مگنتوفوتونی با ساختار میکروکاواک پیشنهاد شده طیف‌های تراگسیل و چرخش فارادی بر حسب تغییر میدان مغناطیسی خارجی مطالعه شد. مشاهده شد که افزایش میدان مغناطیسی خارجی تاثیر به سزایی در تقویت مقدار چرخش فارادی دارد. وابستگی T به تغییرات میدان مغناطیسی خارجی بسیار کمتر از وابستگی θ_F به این تغییرات است. از شکل‌های ۲ و ۳ دریافت می‌شود که پهنه‌ی گاف باند و موضع پیک تشديدي در روی محور افقی مستقل از \bar{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 مگنتوپاتیکی می‌شود پس در مرحله‌ی نخست افزایش \bar{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).

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 دقیقاً دوباره 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 لایه‌ی نقص به ازای میدان‌های مغناطیسی متفاوت در طول موج 1550 nm . در حالت اشعاع 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 تشديدي در مقدار تراگسیل 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 1550 nm 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 تقریباً سه پیک تشديidi 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 مقدار چرخش فارادی دچار افزایش شدیدی شده است. تقویت مقدار θ_F با افزایش ε_{xy}