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

بررسی دوران فارادی در یک بلور فوتونیک مغناطیسی دارای کاواک نقص

ملیحه حسام الدینی[1] ، تهمینه جلالی[۲] و فاطمه پارسایی[۳]

گروه فیزیک دانشگاه خلیج فارس، بوشهر۷۵۱۶۹

چکیده – در این مقاله بلورهای فوتونیک مغناطیسی،خواص مغناطواپتیکی‌شان به همراه ایجاد نقص در ساختار آن‌ها معرفی می‌گردد. معادلات ریاضی لازم برای کمیت‌های مغناطواپتیکی و معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر آن‌ها بیان می‌شود. شبیه‌سازی یک بره‌ی بلور فوتونیک مغناطیسی بس‌لایه‌ای کاواک گونه که دارای ساختار متناوب به صورت $(MG)^4(M)(GM)^4$ است، بر پایه روش المان متناهی انجام می‌شود که M ماده مغناطیسی فعال و G ماده غیر مغناطیسی است . میدان‌های الکتریکی انتشار یافته در ساختار بس‌لایه‌ای در بازه بسامدی امواج مرئی نشان داده شده است و در نهایت میزان عبور دوران فارادی را نشان می‌دهیم.

کلید واژه- بلور فوتونیک مغناطیسی،روش المان متناهی،دوران فارادی، فیلم بس‌لایه‌ای

Faraday rotation in a Cavity-type Multilayered Magnetic Photonic Crystal

Maliheh Hesamodini[1]; Tahmineh Jalali[2], Fatemeh Parsaee[3]

Abstract-In this paper, magnetic photonic crystals is investigated by their magneto-optical properties and interoducing defects to the structure. Physical relations and electromagnetic equations are proposed. A cavity-type 1-D magnetic photonic crystal which has a structure of $(MG)^4$ (M) $(GM)^4$ is simulated based on a finite element method and M is an active magnetic material and G is dielectric. Electric field profile is shown in optical regim and finally Faraday rotation is calculated and analyzed.

Keywords: Magnetic photonic crystals,finite element method, Faraday rotation, Magnetic thin film.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]

۱- مقدمه

امروزه بلورهای فوتونیک از مباحث علمی مورد توجه بسیاری از محققان است،که کاربردهای وسیعی را در حوزه پژوهش‌های بنیادی و تکنولوژی یافته است. بلورهای فوتونیک، آرایه تناوبی از مواد دی‌الکتریک هستند. این بلورها دارای گاف‌های نواری فوتونیک می‌باشندکه از انتشار نور در جهات مشخص با انرژی‌های معین جلوگیری می‌کنند. این انقلاب فناوری، توانایی ما را برای کنترل انتشار نور به همراه دارد [۱]. مهمترین مشخصه این مواد داشتن گاف‌های نواری فوتونیک است که در این بسامدها، نور قادر به عبور از ماده نیست. این ویژگی سبب می‌شود که با تعریف نقص‌های نقطه‌ای و خطی مناسب بتوان در محدوده بسامدهای ممنوعه امواج الکترومغناطیسی را درون یک ساختار بلور فوتونیکی به دام انداخت و به این ترتیب به روش جدیدی برای کنترل و هدایت نور دست یافت[۲]. با ایجاد نقص‌های نقطه‌ای یا خطی می‌توان مدهای خاصی را در گاف نواری بلور به وجود آورد که قابل کنترل می‌باشند و مبنای کاربرد در بسیاری از ابزارها چون لیزرهای میکروکاواک، دیودهای گسیلنده نور و غیره است[۳]. در این مقاله، نخست بلورهای فوتونیک مغناطیسی به همراه ایجاد نقص در ساختار آن‌ها معرفی می‌گردد و سپس چیدمان شبیه‌سازی ارائه می‌گردد. در نهایت میزان عبور دوران فارادی را نشان می‌دهیم.

۲- بلورهای فوتونیک مغناطیسی (MPC)

تنظیم‌پذیری خواص اپتیکی بلورهای فوتونیک باعث کاربردهای جدیدی از این مواد در ادوات مدار مجتمع نوری می‌شود. تنظیم‌پذیری در مواد نیم‌رسانا با تغییر دما یا ولتاژ انجام می‌شود. از راه‌های دیگر کاربرد فشار الاستیکی، تزریق بلور مایع، به کار بردن میدان مغناطیسی خارجی یا استفاده از قطعات مغناطیسی است. دو روش آخر بسیار قابل توجه است، زیرا خود باعث پدیده‌های جدید و جالب توجه مغناطواپتیکی نیز می‌شوند. وقتی مواد تشکیل‌دهنده‌ی بلورهای فوتونیک دی‌الکتریک‌هایی دارای خاصیت مغناطیسی باشد یا نقصی که در ساختار بوجود می‌آید خاصیت مغناطیسی داشته باشد، در نتیجه آن ساختار پاسخ‌های اپتیکی و مغناطواپتیکی منحصر بفردی از خود نشان می‌دهد .از این به بعد چنین ساختاری را بلور فوتونیک مغناطیسی می‌نامیم. در چنین حالتی با تابش میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی، اجزای مغناطیسی ماده دچار مغناطش می‌گردند و خواص مغناطواپتیکی منحصربفردی از خود نشان می‌دهند. پژوهش‌های نظری بر روی MPCها از سال ۱۹۹۵ با بررسی آرایه‌های یک بعدی بس‌لایه‌ای که شامل لایه‌های نازکی از sio_2 در کنار ماده مغناطیسی Bi:YIG بودند آغاز شد [۳]. این لایه‌ها به صورت تصادفی در کنار هم قرار گرفته بودند. نتیجه بررسی‌ها نشان می‌دهد که خواص مغناطواپتیکی از جمله دوران فارادی در این ساختار نسبت به مواد مغناطیسی همگن افزایش قابل توجهی دارد[۴]. هم چنین با توجه به ابعاد بسیار کوچک این ساختارها، آن‌ها نوید بخش رده‌ی جدیدی از قطعات مغناطیسی در ابزارهای مدار مجتمع نوری محسوب می‌گردند.

۳- نقص در بلور فوتونیک یک بعدی

نقص در بلور فوتونیک یک بعدی می‌تواند با تغییر در ابعاد و یا جنس ماده‌ی دی‌الکتریک در یکی از لایه‌های نازک به وجود آید. این کار باعث می‌شود که تقارن انتقالی در راستای متناوب شکسته شود. اما در سایر نقاط بلور که از محل نقص دور است، می‌توان انتظار داشت که تقارن انتقالی و ساختار نواری و گاف نواری به شکل قبل باقی بماند، اما در محل نقص این ویژگی‌ها دیگر وجود ندارد. پس این فرض ممکن است که برخی بسامدهای ممنوع گاف نواری حالا بتوانند در محل نقص منتشر شود، در حالی که هم‌چنان در نقاط دیگر بلور دور از محل نقص اجازه انتشار ندارند. این حالت می‌تواند باعث محبوس شدن مد با بسامدی از محدوده گاف نواری در محل نقص شود که اصطلاحا به آن مد جایگزیده می‌گویند. از این روش در ساخت کاواک‌های بلور فوتونیک مغناطیسی یک بعدی استفاده می‌شود.

۴- شبیه سازی در محیط کامسول ۴.۳

کامسول یک بسته نرم‌افزاری است که بر پایه معادلات دیفرانسیل جزئی طراحی گردیده است. در این نرم افزار

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]

مسائل شناخته شده در زمینه‌هایی هم‌چون الکترومغناطیس، ژئوفیزیک، انتقال حرارت، مکانیک کوانتوم و غیره که به روش تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی حل می‌گردند براساس ویژگی هایی هم چون خطی یا غیر خطی بودن یا غیره طبقه بندی شده و توصیف می‌گر دند. با وجود این مدل‌های از خصوصیاتی چون خواص مواد، قیدها، چشمه و شار و تعریف شرایط مرزی توسط کاربر، نرم افزار مسئله را بر پایه روش المان متناهی به صورت داخلی اجرا کرده و حل می کند،که با توجه به شرایط مرزی:

$$n \times E = 0 \qquad (۱)$$

$$S = \frac{\int_{\partial\Omega} E \cdot E_1}{\int_{\partial\Omega} E_1 \cdot E_1} \qquad (۲)$$

این میدان‌های شبیه‌سازی شده از طرف نرم افزار می‌تواند در قالب برنامه‌ای به زبان MATLAB ارائه گردد. این برنامه سپس می تواند در محاسبه‌ی سایر کمیت‌های فیزیکی مورد نظر ما که با شناخت امواج الکترومغناطیسی در سیستم میسر می شود، به کار رود که از جمله آن می-توان به محاسبه طیف عبور امواج یا خواص مغناطیسی و ... اشاره کرد.

۵- دوران فارادی

در سال ۱۸۵۴ مایکل فارادی کشف کرد که وقتی یک قطعه شیشه‌ی معمولی در معرض میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد و نور قطبیده‌ی خطی در راستای جهت میدان مغناطیسی به آن تابیده شود، صفحه‌ی قطبش نور عبوریافته نسبت به نور فرودی به اندازه‌ی زاویه‌ی θ چرخیده است؛ فارادی میزان این چرخش را به صورت زیر اندازه‌گیری کرد[۷]:

$$\theta = V_m HL \qquad (۳)$$

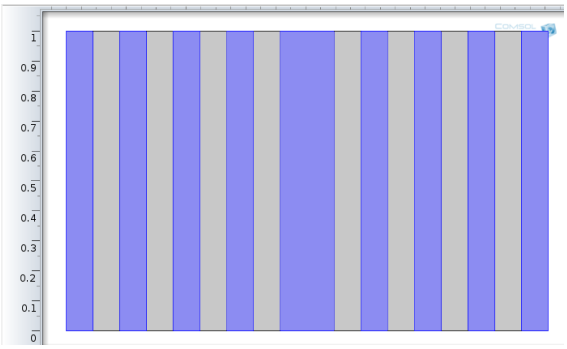
H اندازه‌ی میدان مغناطیسی، L مسافت طی‌شده توسط نور در ماده و V_m ثابت ورده نامیده می‌شود که میزان چرخش صفحه‌ی قطبش نور در واحد طول مسیر طی‌شده توسط نور در ماده در واحد میدان مغناطیسی است. این ثابت به خواص ذاتی محیط، بسامد نور تابشی و دمای محیط بستگی دارد.

۶- چیدمان شبیه‌سازی

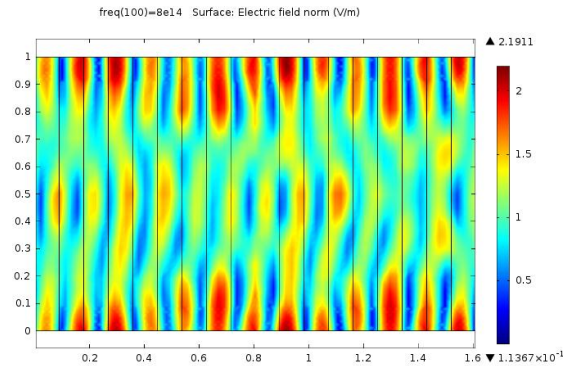
در این مقاله، بلور فوتونیکی که به صورت ساختار لایه نازک بس‌لایه‌ای متشکل از لایه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی است در محیط کامسول شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ساختار آرایه‌ای متناوب به صورت $(MG)^4(M)(GM)^4$ است که در آن G ماده دی-الکتریکی CaF_2 با ضریب‌شکست n= ۱.۴۲ و M ماده فعال مغناطیسی CeF_3 با ضریب‌شکست n=۱.۶۲ می‌باشد. تانسور گذردهی آن به صورت زیر می‌باشد [۸]:

$$\begin{pmatrix} 2.6244 & 0 & 0 \\ 0 & 2.6244 & -1.3122\times10^{-6}i \\ 0 & 1.3122\times10^{-6}i & 2.6244 \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

در این آرایه ضخامت لایه دی‌الکتریکی ۸۹.۴nm و ضخامت لایه‌ی مغناطیسی ۸۹.۵ nm می‌باشد. این آرایه در فضای محاسباتی دوبعدی رسم شده است نمای هندسی ساختار در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



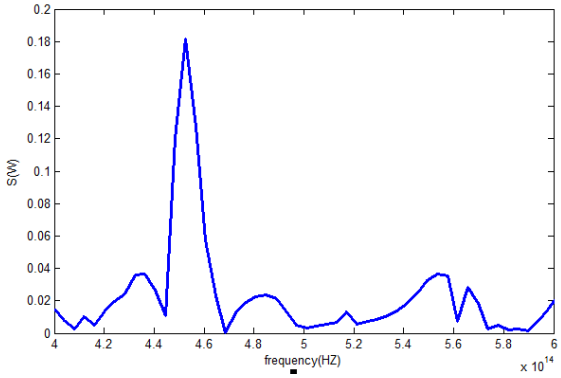
شکل (۱)-ساختار MPC مربوط به نقص در فیلم بس-لایه‌ای در فضای محاسباتی دوبعدی



شکل (۲)- شبیه سازی میدان الکترومغناطیسی در محیط کامسول

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]

با شبیه‌سازی این مدل می‌توان در نتیجه آن برهم‌کنش ماده با موج الکترومغناطیسی فرودی را بدست آورد. هدف از این کار تعیین میزان چرخش صفحه قطبش امواج الکترومغناطیسی است که از محیط عبور کرده‌اند و بیانگر چرخش فارادی مغناطواپتیکی می‌باشد. ما برای این کار روی مرز عبوری و خروجی شکل (۱) مقدار میدان الکتریکی و مغناطیسی را برای هر سه مولفه x,y,z بدست می‌آوریم و با برنامه نویسی در محیط مطلب می‌توان چرخش فارادی را به دست آورد.



شکل(۳) -میزان دوران فارادی در ساختار MPC دو بعدی

شکل (۳) نمودار دوران فارادی در این ساختار را در محدوده اپتیکی با بسامدهای $۴/۵ \times ۱۰^{۱۴}$-۶×۱۰^{۱۴} نشان می‌دهد. ویژگی بارز این نمودار وجود یک قله تیز در بسامد ۶.۴×۱۰^{۱۴} است در حالی که در بقیه طیف بسامدی مقدار چرخش فارادی نزدیک به صفر است. چون این ساختار دارای کاواک مرکزی است یعنی نقصی در میان دو ساختار بس‌لایه‌ای قرار گرفته است، طبق پیش-بینی‌های تئوری انتظار می‌رود یکی از بسامدهای گاف نواری را برانگیخته کند که در نتیجه آن خواص اپتیکی یا مغناطواپتیکی در آن بسامد نسبت به بسامدهای دیگر افزایش چند برابر از خود نشان می‌دهد. در این جا نیز میزان چرخش فارادی در بسامد ۶.۴×۱۰^{۱۴} که در محدوده گاف نواری قرار گرفته است نسبت به بسامدهای دیگر تقریبا ۹ برابر افزایش یافته است و به مقدار ۰/۱۸ درجه رسیده است. می‌توان گفت این ساختار برای چرخاندن صفحه قطبش امواج الکترومغناطیسی با بسامد ۶.۴×۱۰^{۱۴} کارآیی دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی بلور فوتونیک مغناطیسی یک بعدی با ایجاد نقص در ساختار مغناطیسی آن می‌پردازیم. شبیه‌سازی با روش المان متناهی استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است. برای پیدا کردن نتایج شبیه-سازی از خواص فیزیکی ساختار استفاده شده است و شرایط مرزی مناسب را برای اعمال موج تخت به ساختار قرار داده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی و محاسبه دوران فارادی نشان می‌دهد که ایجاد نقص باعث افزایش دوران فارادی تا چند برابر در گاف نواری ساختار می‌شود.

مراجع

[۱] جان جوناپلوس، رابرت مید، د. وین، ن. جوشا، بلورهای فوتونیک قالبی برای شارش نور، موسسه انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۶.

[۲] 28. Fan, S., Yanik, M. F., Wang, Z., Sandhu, S., Povinell, M. L. "Advances in theory of photonic crystals." Journal of Lightwave Technology., vol. 24,2006.

[۳] Krauss, T. F., DeLaRue, R. M. "Two-dimensional photonic bandgap structure." Nature, vol. 383,۱۹۹۶.

[4] Inoue, M., Fujii, T"A theorical analysis of magneto-optical Faraday effect of YIG films with random multilayer structure." J. Appl. Phys., vol. 81,۱۹۹۷.

[5] Sakoda, K. Optical Properties of Photonic Crystals. Berlin: Springer , 2001.

[6] Levy, M., Jalali, A. A. "Band structure and Bloch states in Birefringent one-dimensional magneto-photonic crystals: An analytical approach." J. Opt. Soc. Am. B., vol. 24. 2007.

[7] Zvezdin. A.K, Kotov. V. A, Modern Magnetooptics and Magnetooptical Materials, IOP Publishing, 1997.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]