

## تأثیر استفاده از مواد با ضریب شکست منفی بر روی طیف‌های اپتیکی و

### مگنتوآپتیکی بلورهای فوتونی مغناطیسی با مغناطش طولی

مهدی زمانی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

#### چکیده

تمرکز این مقاله روی پتانسیل مواد با ضریب شکست منفی به منظور بهتر نمودن مشخصه‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی بلورهای فوتونی مغناطیسی یک بعدی می‌باشد. ما قابلیت مواد دوگانه-منفی در مقایسه با مواد معمولی در بلورهای فوتونی مغناطیسی را بررسی کرده‌ایم. به عنوان یک نتیجه، دریافتیم که یک پهن‌شدگی در طیف‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی ساختارهای بلور فوتونی مغناطیسی شامل مواد دوگانه-منفی رخ می‌دهد.

**کلیدواژگان:** بلورهای فوتونی مغناطیسی، مواد با ضریب شکست منفی، طیف پهن-باند.

#### مقدمه

مواد با ضریب شکست منفی یا دوگانه-منفی<sup>۱</sup>، که ساخت آنها در عمل نیز محقق شده است، ابتدا به صورت نظری در سال ۱۹۸۶ توسط ویلاگو معرفی شدند [۱]. ویژگی بارز این مواد این است که در آنها هم ضریب گذردهی الکتریکی  $\epsilon$ ، و هم ضریب تراوایی مغناطیسی  $\mu$ ، منفی هستند. منفی بودن این دو پارامتر منجر به جهت‌گیری پادموازی بردار موج  $k$  و بردار پوینتینگ  $S$  نسبت به هم می‌شود. در واقع، وقتی موج الکترومغناطیسی در چنین محیطی منتشر می‌شود، جهت انتشار آن در خلاف جهت شارش انرژی خواهد بود. واضح است که در چنین محیطی بردارهای  $H$ ،  $E$  و  $k$  بر خلاف مواد مثبت معمولی از قاعده دست چپ پیروی می‌کنند. باید توجه داشت که، جهت انتشار موج الکترومغناطیسی با جهت‌گیری بردار پوینتینگ  $S$  تعیین می‌شود، و نه با جهت‌گیری بردار موج  $k$  علامت

مخالف  $k$  تنها بدین معنی است که سرعت فاز موج در داخل یک محیط چپ-دست منفی است.

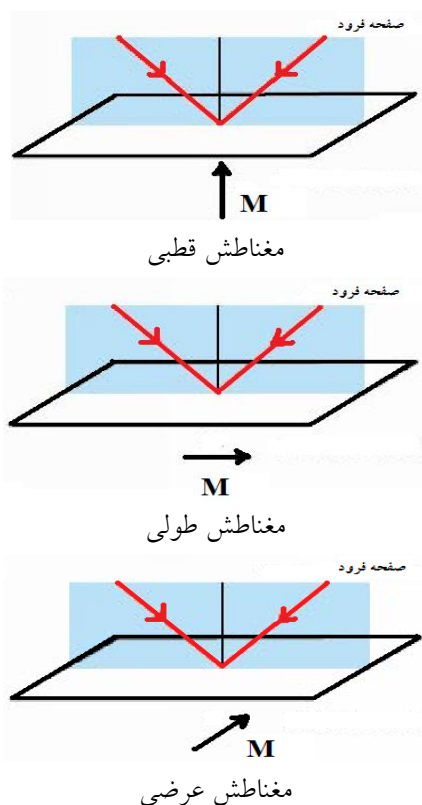
در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از مواد با ضریب شکست منفی در بلورهای فوتونی با اهداف مختلف صورت گرفته است [۲-۴]. به عنوان مثال، بلورهای فوتونی شامل مواد دوگانه-منفی قادرند تا باند عبور باریک غیرمعمول از خود نشان دهند [۳]. از سوی دیگر، بلورهای فوتونی مغناطیسی (MPCs)<sup>۲</sup> به خاطر کاربردشان در وسایل مگنتوآپتیکی توجه زیادی را به خود معطوف ساخته‌اند. یک MPC وقتی شکل می‌گیرد که مواد سازنده بلور فوتونی، مغناطیسی باشند و یا حتی تنها یک لایه نقص در ساختار بلور فوتونی از نوع مغناطیسی باشد. این ساختارهای بلور فوتونی پایه-مغناطیسی با استفاده از ویژگی‌های گاف فوتونی و نقص‌ها قادرند تا مشخصه‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی منحصر به فردی را فراهم کنند [۵ و ۶].

با مطالعاتی که در گذشته روی ساختارهای بلورهای فوتونی مغناطیسی داشتیم، ملاحظه کردیم که در زمینه

<sup>۲</sup> Magnetophotonic crystals

<sup>۱</sup> Double-negative materials

بردار مغناطش در صفحه بازتاب و عمود بر صفحه فرود نور می‌باشد. تأثیر مغناطش قطبی و طولی در اثرات مگنتوآپتیکی کِر و فاراده منجر به چرخش صفحه قطبش نور و ظهور بیضی گونگی در نور بازتابیده یا عبوری می‌شود، در حالی که نتیجه مغناطش عرضی تغییر در شدت و فاز نور فرودی خطی است [۹].



شکل ۱. هندسه سه نوع حالت مغناطش در اثرات مگنتوآپتیکی.

اصولاً، ضریب شکست یک محیط توسط تانسور دی‌الکتریک ماده سازنده (تانسور گذردهی) تعیین می‌شود. مواد مغناطیسی تشکیل دهنده یک MPC معمولاً توسط تانسورهای غیرقطری وابسته به مغناطش توصیف می‌شوند. در حالت کلی می‌دانیم که اگر گذردهی ماده به شکل تانسور باشد، پذیرفتاری و ضریب شکست نیز به صورت تانسور خواهند بود. اگر یک موج الکترومغناطیسی در حال انتشار در راستای Z داشته باشیم و جهت میدان مغناطیسی اعمالی و در

طراحی ساختار چندین پارامتر نقش بازی می‌کنند [۷]. از جمله این پارامترها می‌توان به چیدمان ساختار، ضریب شکست مواد به کار رفته در آن و نیز تباین بین ضریب شکست‌ها اشاره کرد. از اینرو در این مقاله، پتانسیل استفاده از مواد با ضریب شکست منفی را در ساختارهای بلور فوتونی مغناطیسی مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌ایم.

در این مقاله، ساختارهای بلور فوتونی مغناطیسی با مغناطش طولی شامل مواد دوگانه-منفی را مطالعه نموده و نشان می‌دهیم که حضور آنها منجر به کشیدگی و یا پهن‌شدگی طیف اپتیکی و مگنتوآپتیکی می‌شود. بدین منظور، یک روش ماتریس انتقال (TMM) معروف [۸] را به کار برده و آنرا برای مطالعه اثرات مگنتوآپتیکی در چند-لایه‌های مغناطیسی شامل مواد دوگانه-منفی بسط داده‌ایم. از اینرو، قادر است به طور هم‌زمان مواد دی‌الکتریک و مغناطیسی دوگانه-مثبت به همراه مواد دوگانه-منفی مغناطیسی و غیرمغناطیسی را پوشش دهد و بلورهای فوتونی شامل این مواد را توصیف کند.

## نتایج شبیه‌سازی و بحث

ناهمسانگردی اپتیکی ماده مغناطیسی می‌تواند خود را در بازتاب نور از سطح ماده و هنگام عبور نور از لایه‌های مغناطیسی نشان دهد. این پدیده‌های مگنتوآپتیکی که به ترتیب تحت عنوان اثرهای مگنتوآپتیکی کِر و فاراده شناخته می‌شوند، بسته به جهت‌گیری بردار مغناطش نسبت به سطح و صفحه فرود نور به سه حالت مغناطش قطبی، طولی و عرضی تقسیم‌بندی می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود در حالت مغناطش قطبی بردار مغناطش عمود بر سطح بازتابنده و موازی با صفحه فرود نور است، در حالت طولی بردار مغناطش در صفحه بازتاب و موازی صفحه فرود نور است، در حالی که در مورد عرضی

$$N = \sqrt{\varepsilon_1 \mu} , \quad ۲$$

$$Q = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} . \quad ۳$$

روش ماتریس انتقال مورد استفاده بر مبنای تعریف دو ماتریس  $4 \times 4$  استوار است؛ یکی ماتریس مرزی (A) و دیگری ماتریس انتشار (D) مربوط به هر لایه که با استفاده از آنها می‌توان شرایط مرزی را به‌طور مستقیم بر مسئله اعمال کرد. ماتریس انتقال کل در یک سیستم چندلایه از ضرب ماتریس‌های مربوط به تمام لایه‌ها به‌دست می‌آید. این ماتریس مشخصه‌های اپتیکی (عبور و انعکاس) و مگنتوآپتیکی (چرخش فاراده و کر) یک ساختار را به‌دست می‌دهد. باید اشاره کرد که نتایج این روش دقیق می‌باشند و هیچ‌گونه ساده‌سازی در آن اعمال نمی‌شود. ماتریس مرزی A رابطه‌ای بین مؤلفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با مؤلفه‌های s و p میدان الکتریکی می‌سازد. در حالی که ماتریس انتشار D مؤلفه‌های s و p میدان الکتریکی در دو مرز هر لایه را به‌هم وصل می‌کند [۸]. شکل کلی این ماتریس‌ها برای مواد مغناطیسی دوگانه-منفی در حالت قطبش طولی به‌صورت روابط ۴ و ۵ می‌باشند:

نتیجه مغناطش حاصل از آن در راستای y باشد، حالت مغناطش طولی برقرار بوده و تانسور گذردهی محیط مغناطیسی در این حالت به شکل زیر خواهد بود:

$$\vec{\varepsilon}_{M\pm}(\text{Lon}) = \begin{pmatrix} \pm\varepsilon_1 & 0 & -i\varepsilon_2 \\ 0 & \pm\varepsilon_1 & 0 \\ i\varepsilon_2 & 0 & \pm\varepsilon_1 \end{pmatrix}, \quad ۱$$

که جمله‌های قطری  $\pm\varepsilon_1$  گذردهی الکتریکی محیط است، به‌طوری که علامت + (-) به‌ترتیب بر یک محیط مغناطیسی دوگانه-مثبت (دوگانه-منفی) با  $\mu=+1$  (-۱)  $\mu=$  دلالت دارد. به‌علاوه، جمله‌های غیرقطری  $\varepsilon_2$  مطابق است با چرخش مغناطیسی و یک وابستگی خطی با مغناطش دارد. علامت  $\varepsilon_2$  توسط جهت مغناطش تعیین می‌شود.

به‌طور کلی می‌توان تانسور گذردهی الکتریکی را به‌صورت مجموع یک تانسور قطری و یک تانسور غیرقطری نوشت، به‌طوری که عناصر تانسور قطری به‌همراه ضریب تراوایی مغناطیسی محیط،  $\mu$ ، ضریب شکست را تعریف می‌کنند و ترکیب عناصر تانسورهای قطری و غیر قطری با هم نیز ثابت مگنتوآپتیکی را تعیین می‌کنند. بنابراین، ضریب شکست و ثابت مگنتوآپتیکی یک محیط برحسب پارامترهای ذکر شده عبارتند از:

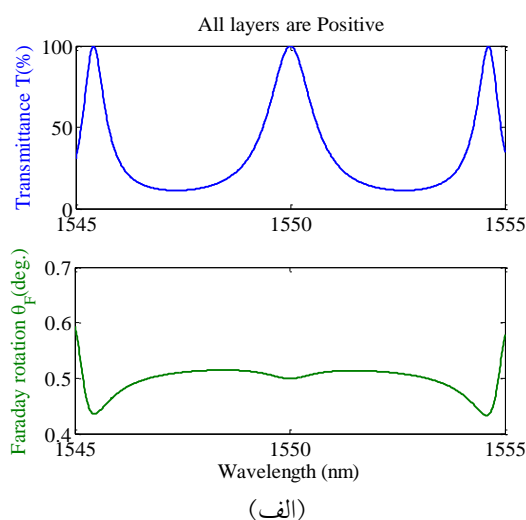
$$A_{\text{DNG}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ (i/2)(\alpha_y/\alpha_z)Q(1-3\alpha_z^2) & \alpha_z & -(i/2)(\alpha_y/\alpha_z)Q(1-3\alpha_z^2) & -\alpha_z \\ (3/2)iNQ\alpha_y(1-2\alpha_z^2) & -N(\alpha_z^2-\alpha_y^2) & (3/2)iNQ\alpha_y(1-2\alpha_z^2) & -N(\alpha_z^2-\alpha_y^2) \\ N\alpha_z & (i/2)(\alpha_y/\alpha_z)NQ & -N\alpha_z & (i/2)(\alpha_y/\alpha_z)NQ \end{pmatrix}, \quad ۴$$

$$D_{\text{DNG}} = \begin{pmatrix} U \cos \sigma_1 & U \sin \sigma_1 & 0 & 0 \\ -U \sin \sigma_1 & U \cos \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U^{-1} \cos \sigma_1 & -U^{-1} \sin \sigma_1 \\ 0 & 0 & U^{-1} \sin \sigma_1 & U^{-1} \cos \sigma_1 \end{pmatrix}, \quad ۵$$

که  $\alpha_y = \sin \theta$ ،  $\alpha_z = \cos \theta$  و  $\theta$  زاویه فرود است. همچنین،  $N$  و  $Q$  به‌ترتیب ضریب شکست محیط و

در نظر بگیریم و یا تنها لایه‌های دی‌الکتریک دوگانه منفی باشند، نه تنها بزرگی پاسخ‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی در طول موج کاری (طول موج مرکزی) وابسته به زاویه فرود نور و جهت‌گیری آن نسبت به مغناطش لایه‌های مغناطیسی خواهند بود، بلکه در طیف آنها نیز تغییراتی رخ خواهد داد. این تغییرات بدین صورت هستند که استفاده از یک نوع ماده دوگانه-منفی (مغناطیسی یا غیرمغناطیسی) منجر به پهن‌شدگی قابل توجه‌ای در طیف‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که در این حالت می‌توان به پاسخ‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی بزرگتری نسبت به حالت تمام مثبت دست یافت [۱۰].

پهن‌شدگی یا کشیدگی طیف طول موجی در ساختارهای با مواد مغناطیسی دارای مغناطش طولی نیز می‌تواند رخ دهد. البته، این نتیجه وابسته به ساختار است و از ساختاری به ساختار دیگر تغییر می‌کند. نکته دیگری که باید متذکر شویم این است که از آنجا که نور فرودی تقریباً به‌ازای تمام زوایای فرود با مغناطش لایه‌های مغناطیسی زاویه خواهد داشت، از اینرو برای حالتی که تمام لایه‌های یک ساختار با لایه‌های دوگانه منفی معادل جایگزین شوند همواره پاسخ‌ها و شکل طیف مگنتوآپتیکی متفاوت خواهند بود.

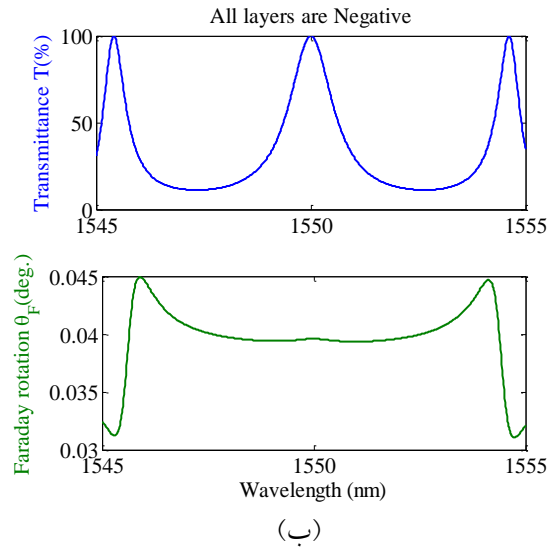


ثابت مگنتوآپتیکی محیط هستند که با روابط ۲ و ۳ بیان می‌شوند. علاوه بر اینها، در یک محیط مغناطیسی به ضخامت  $d$ ،  $U = \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}Nd\alpha_z\right)$  و  $\sigma_1 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} NdQ$  هستند که در آنها  $\lambda$  طول موج می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد که ماتریس‌های مرزی و انتشار یک محیط دوگانه-منفی غیرمغناطیسی با برابر صفر قرار دادن ثابت مگنتوآپتیکی به دست می‌آیند. همچنین، معادلات مشابه برای مواد مغناطیسی و غیرمغناطیسی معمولی (دوگانه-مثبت) را می‌توان در مرجع ۸ پیدا کرد. با داشتن ماتریس‌های مرزی و انتشار مربوط به محیط‌های دوگانه-منفی می‌توان از آنها در سیستم‌های چند لایه استفاده کرد. بدین منظور قصد داریم مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از بلورهای فوتونی مغناطیسی شامل مواد دوگانه-منفی و ساختارهای شامل مواد معمولی با ضریب شکست مثبت داشته باشیم. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که اگر یک ساختار نوعی با مواد مثبت داشته باشیم و تمام پارامترهای آنها را ثابت نگه داریم و تنها ضریب شکست آنها را با مواد دوگانه-منفی به همان بزرگی جایگزین کنیم (یعنی فقط علامت  $\epsilon$  و  $\mu$  را منفی کنیم)، در این صورت نتایجی که به دست خواهند آمد وابسته به زاویه فرود نور و جهت‌گیری آن نسبت به مغناطش لایه‌های مغناطیسی هستند. به‌عنوان مثال، اگر محیط مغناطیسی دارای مغناطش قطبی باشد و نور به‌طور عمود بر ساختار تابانده شود، در این صورت نتایج کاملاً یکسانی به دست می‌آیند و طیف‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی نیز تغییری نخواهند کرد، دلیل آن هم این است که در این حالت نور با مغناطش هم راستا خواهد بود. ولی با تاباندن نور به‌صورت مایل نتایج متفاوت خواهند شد و هر چه زاویه فرود مایل بیشتر شود اختلاف در نتایج بیشتر خواهد شد، هر چند که در این حالت نیز شکل کلی طیف‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی نسبت به حالت تمام مثبت تقریباً یکسان خواهد بود. اما اگر تنها لایه‌های مغناطیسی را به‌صورت دوگانه منفی

طول موج مرکزی در ۱۵۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. شکل ۲ طیف اپتیکی و مگنتوآپتیکی این ساختار به ازای زاویه فرود نور ۱۰ درجه در حالت‌هایی که تمام لایه‌ها مثبت باشند و یا تمام لایه‌ها مواد دوگانه منفی معادل باشند را نشان می‌دهد و از آن ملاحظه می‌شود که طیف و پاسخ مگنتوآپتیکی کاملاً با هم متفاوت هستند. برای بررسی پهن شدگی طیفی در این ساختار کفایت مواد دی‌الکتریک و یا مغناطیسی را با مواد دوگانه-منفی معادل جایگزین کنیم. چنین تغییراتی را می‌توان در شکل ۳ ملاحظه کرد که یک پهن شدگی و یا به عبارت بهتر یک کشیدگی در طیف‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی را نشان می‌دهد.

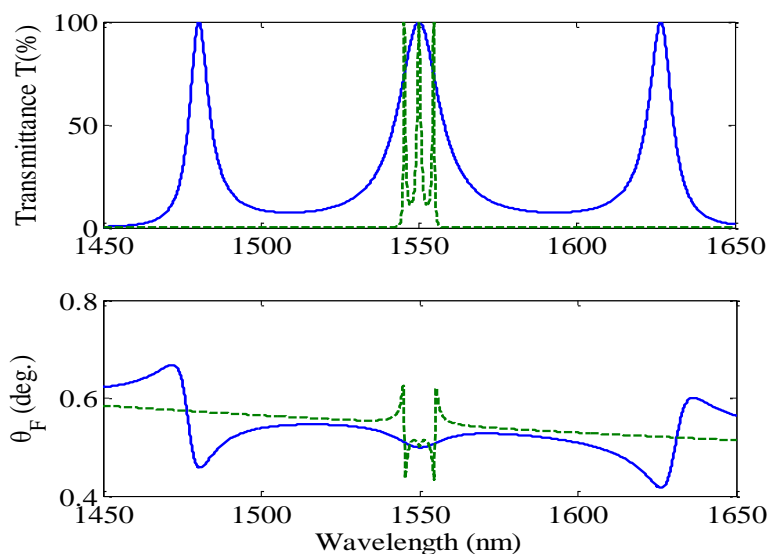
### نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهند که استفاده از مواد دوگانه-منفی در ساختارهای بلور فوتونی مغناطیسی همواره منجر به یک کشیدگی کلی در طیف‌های اپتیکی و مگنتوآپتیکی می‌شود، اما اینکه آیا این کشیدگی طیفی می‌تواند به یک پهن شدگی مفید منجر شود و نیز میزان این پهن شدگی طیفی، وابسته به ساختار و ضریب شکست مواد به کار رفته در آن می‌باشد. دستیابی به ساختارهای با طیف طول موجی پهن به نوبه خود می‌تواند وسایل مگنتوآپتیکی پهن-باند را نوید دهند.



شکل ۲. طیف عبور و چرخش فاراده ساختار معرفی شده تحت زاویه فرود نور ۱۰ درجه به عنوان تابعی از طول موج برای حالتی که (الف) تمام لایه‌های تشکیل دهنده مثبت باشند و (ب) تمام لایه‌های تشکیل دهنده مواد دوگانه منفی معادل باشند.

برای نشان دادن این پهن شدگی طیفی در MPC‌های با لایه‌های مغناطیسی با مغناطش طولی در حضور مواد دوگانه-منفی، به عنوان مثال ساختار  $(H/L)^3/M/(L/H)^5/M/(H/L)^5/M/(L/H)^3$  که جهت تناوب آن در راستای محور Z، یعنی در راستای انتشار موج الکترومغناطیسی، است را معرفی می‌کنیم. این MPC متشکل از مواد دوگانه-مثبت (H) Si، (L)  $SiO_2$  و (M) Ce:YIG است به گونه‌ای که لایه‌های دی‌الکتریک (Si و  $SiO_2$ ) ضخامت ربع موج دارند و لایه مغناطیسی (Ce:YIG) ضخامت نیم موج دارد و



شکل ۳. مقایسه ساختار معرفی شده (نمودار خط چین) با ساختار معادل آن که در آن جای لایه‌های دی‌الکتریک مثبت با لایه‌های دوگانه-منفی عوض شده‌اند (نمودار خط پُر). ملاحظه می‌شود که استفاده از مواد دوگانه-منفی در این ساختار تنها منجر به یک کشیدگی در طیف‌های عبور و چرخش فاراده شده است. زاویه فرود نور ۱۰ درجه بوده است.

and high transmittance, *Journal of Modern Optics* 59 (2012) 126-130.

[7] م. زمانی، بلورهای فوتونی مغناطیسی یک بعدی با ساختارهای مناسب برای بهبود عملکرد مگنتوآپتیکی جهت استفاده در ایزولانورهای نوری، رساله دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، (۱۳۹۲).

[8] J. Zack, E.R. Moog, C. Liu, S.D. Bader, Universal approach to magnet-optics *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 89 (1990) 107-123.

[9] A.K. Zvezdin, V.A. Kotov, *Modern magneto-optics and magneto-optical materials*. CRC Press, (1997).

[10] M. Zamani, M. Ghanaatshoar, Broadband flat-top spectra of transmittance and Faraday rotation in 1D magnetophotonic crystals containing double-negative materials, *The Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 28 (2015) 2613-2619.

## منابع

[1] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ , *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* 92 (1967) 517-526.

[2] Y. Chen, X. Wang, F. Ye, P.F. Lee, B. Hu, Multichannel and omnidirectional transparency in periodic metamaterial layers, *Applied Physics B Lasers Optics* 107 (2012) 771-778.

[3] L. Wu, S. He, L. Chen, On unusual narrow transmission bands for a multi-layered periodic structure containing left-handed materials, *Optics Express* 11 (2003) 1283-1290.

[4] L. Zhang, Y. Zhang, L. He, H. Li, H. Chen, Experimental study of photonic crystals consisting of  $\epsilon$ -negative and  $\mu$ -negative materials, *Physical Review E* 74 (2006) 056615.

[5] M. Ghanaatshoar, M. Zamani, H. Alisafaei, Compact 1-D magnetophotonic crystals with simultaneous large magneto-optical Kerr rotation and high reflectance, *Optics Communications* 284 (2011) 3635-3638.

[6] M. Zamani, M. Ghanaatshoar, H. Alisafaei, Compact one-dimensional magnetophotonic crystals with simultaneous large Faraday rotation

# **Influence of using negative refractive index materials on optical and magneto-optical properties of magnetophotonic crystals with longitudinal magnetization**

**Mehdi Zamani\***

Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

## **Abstract**

This paper has focused on the potential of negative refractive index materials in order to improve the optical and magneto-optical (MO) characteristics of one-dimensional magnetophotonic crystals (MPCs). We have investigated the capability of such double-negative materials (DNGs) in comparison with conventional materials in MPCs. As a result, we found that a broadening can be occurred in optical and MO spectrum of MPCs comprising DNGs.

**Keywords:** Magnetophotonic crystals, Negative refractive index materials, Wide-band spectra.

---

\* Corresponding Author: m-zamani@uk.ac.ir