بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

تأثیر بی‌نظمی در ضخامت لایه بر طول جایگزیدگی اندرسون در بلورهای فوتونی مغناطیسی

مهرناز سرابندی، مجتبی گلشنی، مهدی زمانی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

mehrnazsarabandi74@gmail.com, golshani@uk.ac.ir, m-zamani@uk.ac.ir

در این مقاله جایگزیدگی اندرسون در ساختارهای بلور فوتونی مغناطیسی با ضخامت لایه‌های تصادفی به صورت عددی برای طول موجی واقع در میانه‌ی گاف فوتونی (۱۵۵۰ نانومتر) بررسی شده است. طول جایگزیدگی اندرسون برای مقادیر مختلف بی‌نظمی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که طول جایگزیدگی به عنوان تابعی از پارامتر چرخش مگنتو اپتیکی برای قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد متفاوت بوده و به ترتیب به صورت خطی افزایش و کاهش می‌یابند. همچنین، با افزایش بی‌نظمی طول جایگزیدگی نیز افزایش می‌یابد.

کلید واژه : بلور فوتونی مغناطیسی، بی‌نظمی در ضخامت لایه، جایگزیدگی اندرسون.

Effect of random thickness on Anderson localization in magnetophotonic crystals

Mehrnaz Sarabandi, Mojtaba Golshani, and Mehdi Zamani

Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman

In this paper, the effect of Anderson localization on magnetic photonic crystal structures has been numerically investigated by generating a random error in layer thickness for a wavelength located at the center of photonic band gap. The Anderson localization length has been studied for different disorder strengths. The results show that the localization length, as a function of the magneto-optical rotation parameter, is different for right and left circular polarizations and it is linearly increased or decreased, respectively. In addition, the localization length increases by growth of the disorder strength.

Keywords: Anderson localization, Random thickness, Magnetophotonic crystal.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

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

مقدمه

مسئله جایگزیدگی امواج الکترونی در پتانسیل تناوبی بیش از پنجاه سال پیش توسط فیلیپ اندرسون مطرح گردید[۱]. اندرسون نشان داد که در محیط‌های نامنظم، به دلیل تداخل امواج الکترونی، تابع موج الکترون جایگزیده گردیده، گذار فلز به عایق رخ می‌دهد. از آنجایی‌که اساس جایگزیدگی برمبنای تداخل می‌باشد، این پدیده در امواج دیگر از جمله نور نیز رخ می‌دهد[۲].

بلورهای فوتونی ساختارهای مصنوعی متناوبی هستند که ضریب شکست در آن‌ها به صورت تناوبی تغییر می‌کند. اگر مواد سازنده‌ی بلور فوتونی دارای خاصیت مغناطیسی باشند، یا اینکه یک لایه نقص از نوع مغناطیسی در ساختار بلور فوتونی وجود داشته باشد، ساختار یک بلور فوتونی مغناطیسی نامیده می‌شود. نشان داده شده است که پاسخ مگنتواپتیکی بلورهای فوتونی مغناطیسی وابسته به ضخامت لایه‌های بلور فوتونی مغناطیسی است[۳ و ۴].

به دلیل کاربردهای فراوان ساختارهای تناوبی با ویژگی‌های تراگسیلی خاص، بررسی این ساختارها از اهمیت فروانی برخوردار است. اما یکی از مسائل مهم که در بررسی ساختارهای تناوبی، به ویژه مغناطیسی، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، درنظرگرفتن نقش بی‌نظمی (به دلیل وجود افت و خیز در ضخامت لایه‌ها، ضریب شکست و دیگر پارامترهای محیط در فرایند ساخت)، و تأثیر آن بر خواص تراگسیلی و جایگزیدگی نور در این نوع از بلورهای فوتونی می‌باشد. اصولاً وجود خطای ساخت و بی‌نظمی موجب اختلاف بین نتایج نظری و نتایج تجربی می‌شود. از آنجایی‌که یک پیامد غیرقابل انکار وجود بی‌نظمی در سیستم‌های موجی، پدیده جایگزیدگی اندرسون است[۱]، در این مقاله اثر بی‌نظمی در ضخامت لایه‌ها را بر جایگزیدگی اندرسون در ساختارهای بلور فوتونی مغناطیسی مورد بررسی قرار خواهیم داد.

ساختار و روش‌ها

برای ایجاد بلور فوتونی مغناطیسی از ساختار دولایه $(Ce:YIG/SiO_2)^{45}$ استفاده شده است که Ce:YIG به عنوان ماده‌ی مغناطیسی و SiO_2 به عنوان ماده‌ی دی‌الکتریک در نظرگرفته شده‌است، که در ادامه آنها را به ترتیب با M و D نمایش می‌دهیم. در این مقاله هندسه‌ی فاراده (قطبی) مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، جهت انتشار نور (محورZ) عمود بر سطح لایه‌ها فرض شده و میدان مغناطیسی خارجی نیز در همین جهت اعمال گردیده است. میدان مغناطیسی خارجی تنها روی لایه‌های مغناطیسی تأثیر می‌گذارد و باعث غیرقطری‌شدن تانسور گذردهی الکتریکی Ce:YIG می‌گردد:

$$\varepsilon_{Ce:YIG} = \begin{pmatrix} \varepsilon_M & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon_M & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_M \end{pmatrix}$$

عنصرغیرقطری g که وابسته به مغناطش است، با چرخش مغناطیسی مرتبط است و پارامتر مگنتواپتیکی نامیده می‌شود که برای Ce:YIG بیشینه مقدار آن ۰/۰۰۹ است.

برخلاف لایه‌های مغناطیسی که ناهمسانگرد هستند، لایه‌های دی‌الکتریک SiO_2 محیط‌هایی همسانگرد با تانسور گذردهی الکتریکی قطری هستند.

ضریب شکست لایه‌ها در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر به ترتیب $n_M=2.209$ و $n_D=1.479$ هستند. علاوه بر این، ضخامت متوسط لایه‌ها براساس رابطه‌ی $\lambda/4n$ به صورت $d_M=175nm$ و $d_D=262\ nm$ تنظیم شده است. برای ایجاد ساختار کاتوره‌ای، بی‌نظمی در ضخامت لایه‌ها اعمال شده است، به طوری که، برای قدرت بی‌نظمی δ، ضخامت لایه‌ها اعدادی تصادفی در بازه $[d-\delta, d+\delta]$ هستند. در این مقاله، طول جایگزیدگی به ازای مقادیر مختلف بی‌نظمی ($\delta=1$ nm، $\delta=10$ nm و $\delta=20$ nm) برحسب پارامتر مگنتواپتیکی (g) بررسی شده است. بدین‌منظور، برای محاسبه‌ی ضرایب تراگسیل از روش ماتریس انتقال ۴×۴ استفاده شده است[۵]. در این مقاله، ضرایب تراگسیل بلورفوتونی به صورت مجزا برای دو ویژه حالت قطبش دایروی راستگرد و چپگرد محاسبه شده‌است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

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

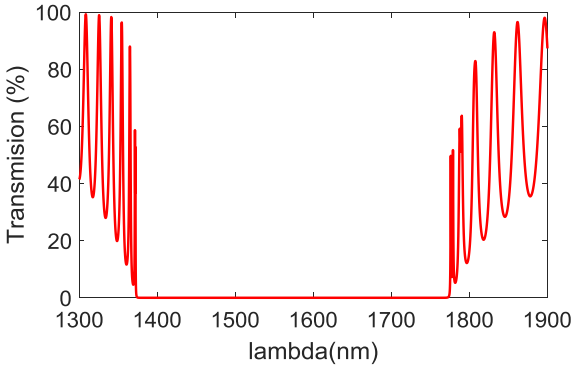
به منظور بررسی جایگزیدگی، طول جایگزیدگی بدون بعد که از رابطه زیر بدست می‌آید، مورد بررسی قرار گرفته است [۶]:

$$L_{loc}^{-1} = \lim_{N\to\infty}\left(-\frac{\langle \ln T\rangle}{N}\right),$$

N تعدادلایه‌ها، T ضریب تراگسیل و نماد < ... > نشان‌دهنده‌ی میانگین‌گیری آنسامبلی است. در این مقاله، کلیه نتایج با میانگین‌گیری بر روی 10^5 نمود مختلف بی‌نظمی بدست آمده است. طول جایگزیدگی چپگرد بر اساس ضریب تراگسیل قطبش دایروی چپگرد (T_{CL}) و طول جایگزیدگی راستگرد بر اساس ضریب تراگسیل قطبش دایروی راستگرد (T_{CR}) تعیین می‌شود.

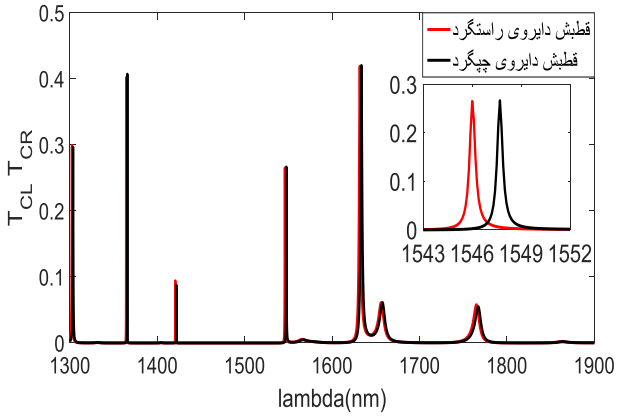
بحث و نتایج

شکل ۱ طیف عبور کل (راستگرد+چپگرد) ساختار منظم (δ=0) برای g =0.009 را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، بازه‌ی گاف نواری [1375-1780] نانومتر است و طول موج 1550 نانومتر در میانه گاف قرار دارد.



شکل۱- طیف عبور (تراگسیل) بلور فوتونی مغناطیسی منظم.

هنگامی که بی‌نظمی اعمال می‌شود، به ازای قدرت‌های بی-نظمی کوچک δ، تغییرات طیف عبور بسیار کم است و ناحیه گاف بسیار شبیه حالت منظم است؛ اما با افزایش بی‌نظمی به مقادیر بسیار بزرگ‌تر مثلاً δ= 150 nm، سیستم در حالت کاملاً جایگزیده قرار می‌گیرد [۴]. در این حالت طیف عبور کاملا تغییر کرده، خطوط تشدیدی در ساختار نواری نمایان می‌شود. هر کدام از این خطوط تشدیدی متناظر با وجود یک مد جایگزیده و تشکیل کاواک موضعی در بلور است (شکل ۲). علاوه بر این، همان‌طور که پنجره داخل شکل ۲ نشان می‌دهد، در حضور g بیشینه، خطوط تشدید قطبش‌های راستگرد و چپگرد کاملاً برهم منطبق نیستند. دلیل این امر، وجود خاصیت غیرمتقابلی (Non-reciprocal) در بلورهای فوتونی مغناطیسی است.



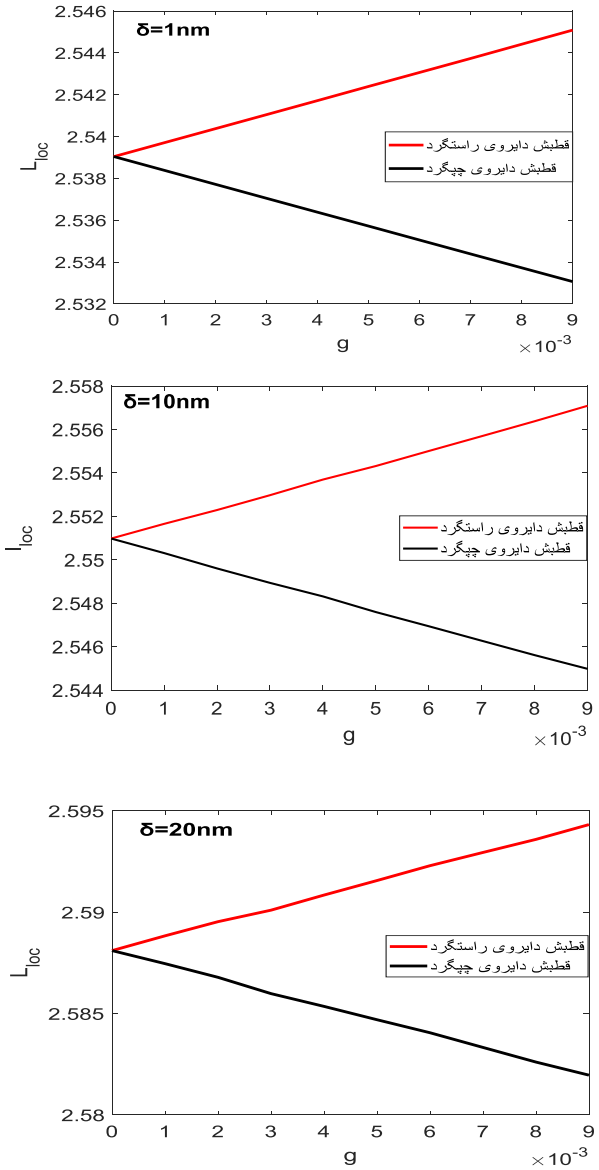
شکل۲- طیف عبور بلور فوتونی مغناطیسی نامنظم، δ= 150 nm.

در ادامه، به برررسی و مقایسه طول جایگزیدگی L_{loc} در قدرت‌های بی‌نظمی کوچک‌تر δ=1 nm، δ =10 nm و δ =20 nm، برای طول موج λ =1550 nm که در ناحیه گاف فوتونی قرار دارد، خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که دلیل عدم مقایسه حالت با قدرت بی‌نظمی بزرگ δ=150 nm با حالت‌های تقریباً منظم (دارای بی‌نظمی کوچک) این است که در δهای خیلی بزرگ، ساختار نواری سیستم کاملاً عوض شده و بسته به تشدیدی بودن یا نبودن طول‌موج مورد بررسی، ضریب عبور و درنتیجه طول جایگزیدگی می‌توانند بزرگ یا کوچک باشند (شکل ۳). شکل ۳ طول جایگزیدگی مربوط به طول موج میانه گاف λ=1550 nm را به ازای سه مقدار مختلف بی نظمی δ، برحسب پارامتر مگنتواپتیکی نشان می‌دهد. طول جایگزیدگی L_{loc} تعیین‌کننده میزان عبور نور از بلور فوتونی مغناطیسی است و رابطه‌ی مستقیمی با ضریب عبور دارد. از این‌رو، هرچه طول جایگزیدگی افزایش یابد، نشان‌دهنده افزایش ضریب عبور است.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش قدرت بی‌نظمی δ طول جایگزیدگی در gهای متناظر افزایش یافته است. ازطرف دیگر، در یک قدرت بی‌نظمی مشخص، زمانی که g=0 باشد (میدان مغناطیسی خارجی صفر است)، طول جایگزیگی قطبش چپگرد و راستگرد با هم برابر هستند. اما، با افزایش میزان پارامتر مگنتواپتیکی g، طول جایگزیدگی قطبش چپگرد به صورت خطی کاهش و طول جایگزیدگی قطبش راستگرد به صورت خطی افزایش می‌یابد. دلیل این امر ظهور خاصیت غیرمتقابلی در بلورهای فوتونی مغناطیسی در حضور میدان خارجی است.



شکل۳- طول جایگزیدگی مربوط به قطبش‌های چپگرد و راستگرد برای طول موج ۱۵۵۰ نانومتر و قدرت‌های بی‌نظمی δ=1 nm، δ =10 nm و δ =20 nm.

خلاصه و نتیجه‌گیری

جایگزیدگی اندرسون یک پیامد ناشی از وجود بی‌نظمی در پدیده‌های موجی است. از آنجایی‌که ساختارهای تجربی به دلیل وجود خطای ساخت، همواره دارای بی‌نظمی هستند، در این مقاله، تأثیر بی‌نظمی در ضخامت لایه‌ها بر طول جایگزیدگی اندرسون، برای طول موجی در میانه گاف فوتونی یک بلور فوتونی مغناطیسی یک‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی نشان می‌دهد که با افزایش بی‌نظمی (در مقادیر بی‌نظمی نسبتاً کوچک)، طول جایگزیدگی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده گردید که مقدار طول جایگزیدگی برای قطبش‌های راستگرد و چپگرد متفاوت بوده، همواره این کمیت برای قطبش دایروی راستگرد بیشتر از قطبش دایروی چپگرد است. این به معنای تفاوت بین ضرایب عبور قطبش چپگرد و راستگرد است که ناشی از خاصیت غیرمتقابلی ساختارهای بلورفوتونی مغناطیسی می‌باشد. همچنین، محاسبه طیف عبور در قدرت بی‌نظمی بسیار بزرگ نشان می‌دهد که در این شرایط طیف عبور کاملاً متفاوت از حالت سیستم منظم است و در آن خطوط تشدیدی متناظر با مدهای جایگزیده بلور فوتونی مغناطیسی نمایان می‌شود.

مراجع

[1] Ad. Lagendijk, B.V. Tiggelen, and D. S. Wiersma, "Fifty years of Anderson localization," Physics Today, 62(8), 24 (2009).

[2] M. Segev, Y. Silberberg, and D. N. Christodoulidis,"Anderson localization of light", Nat. Photonics, 7, 197 (2013).

[۳] مهدی زمانی و مجید قناعت شعار، "تأثیر خطای ضخامت روی پاسخ‌های اپتیکی و مگنتواپتیکی در بلورهای فوتونی مغناطیسی"، نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، زاهدان (۱۳۹۱).

[4] M.Sharifian, H. Ghadiri, M. Zamani and M. Ghanaatshoar, "Influence of thickness error on the operation of adjustable magneto-optical isolators," Appl. Opt. **51**, 4873 (2012).

[5] J. ZAK, E.R. MOOG, C. LIU and S.D. BADER,"Universal Approach to Magneto-Optics," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 89, 107 (1990).

[6] K. Y. Bliokh, S. A. Gredeskul, P. Rajan, I. V. Shadrivov and Y. S. Kivshar, "Nonreciprocal Anderson localization in magneto-optical random structures," Phys. Rev .B, **85**, 014205 (2012).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]