

جایگزیدگی اندرسون برای قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد در ساختارهای مگنتوآپتیکی با ضرایب دی‌الکتریک کاتوره‌ای

رضا عبدی قلعه

گروه فیزیک و مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده

در هندسه‌ی فارادی و برای ساختارهای مگنتوآپتیکی یک بعدی که لایه‌هایی با ضرایب دی‌الکتریک کاتوره‌ای داشته باشند، خواص تراگسیلی و ویژگی‌های جایگزیدگی قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد امواج الکترومغناطیسی بررسی شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل خاصیت غیربازگشتی اثرات مگنتوآپتیکی، جایگزیدگی اندرسون در چنین ساختارهایی برای دو ویژه مد راستگرد و چپگرد ویژگی‌های متفاوتی دارد. افزون بر با تغییر پارامتر مگنتوآپتیکی، خواص تراگسیلی و جایگزیدگی در طول‌موج‌های مختلف و به ازای میزان بی‌نظمی‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است.

جایگزیدگی اندرسون بر پایه‌ی تداخل امواج ناشی از پراکندگی در محیط‌ها و پتانسیل‌های کاتوره‌ای توصیف می‌شود. محققان به سبب تحقیقات نظری و تجربی که روی جایگزیدگی امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای یک بعدی کاتوره‌ای انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیده‌اند که همواره میزان تراگسیل با افزایش طول ساختار کاتوره‌ای کاهش می‌یابد [۱]. از طرفی دیگر، در چند دهه‌ی گذشته اثرات مگنتوآپتیکی و بررسی آن‌ها در ساختارهای چندلایه‌ای به صورت گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲]. تقویت شدید چرخش فارادی در طول موج‌های تشدیدی از بارزترین ویژگی‌های این ساختارها است. در این مقاله، به بررسی جایگزیدگی امواج الکترومغناطیسی و مشخصات تراگسیلی ساختارهای کاتوره‌ای مگنتوآپتیکی پرداخته می‌شود.

ساختاری متناوب متشکل از لایه‌های مگنتوآپتیکی $Ce:YIG$ و لایه‌های دی‌الکتریک SiO_2 به صورت $air / (Ce:YIG / SiO_2)^{45} / substrate$ در نظر گرفته شده است. در این ساختار ضخامت لایه‌های مگنتوآپتیکی و دی‌الکتریک به ترتیب $d_{SiO_2} = 262 nm$ و $d_{Ce:YIG} = 175 nm$ فرض شده و جهت انتشار نور و نیز جهت میدان مغناطیسی خارجی، عمود بر سطح لایه‌ها در نظر گرفته شده است. در این هندسه تانسور گذردهی الکتريکی لایه مگنتوآپتیکی $\epsilon_{Ce:YIG}$ و تانسور گذردهی الکتريکی لایه دی‌الکتریک ϵ_{SiO_2} به صورت

$$\epsilon_{Ce:YIG} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & iQ & 0 \\ -iQ & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}, \quad \epsilon_{SiO_2} = \begin{pmatrix} \epsilon_{SiO_2} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{SiO_2} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{SiO_2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

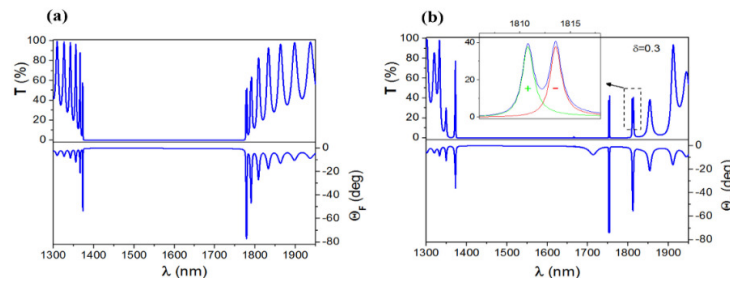
نمایش داده می‌شوند [۳]. برای به دست آوردن مشخصه‌های ساختار نیز از روش ماتریس انتقال 4×4 استفاده شده است [۴]. با استفاده از این روش ضرایب تراگسیل قطبش راستگرد (T_p)، قطبش چپگرد (T_m) و تراگسیل پرتو برآیند (T) به همراه فاز آنها در صفحه‌ی خروجی ساختار به دست می‌آیند. چرخش فارادی (Θ_F) پرتو برآیند نیز از روی رابطه‌ی آن با فاز قطبش‌های راستگرد (φ_p) و چپگرد (φ_m) قابل محاسبه می‌باشد. از طرفی دیگر، بر پایه جایگزیدگی اندرسون، برای موج تحت منتشر شونده در یک ساختار چند لایه‌ای به اندازه‌ی کافی طولانی و کاتوره‌ای، ضریب

تراگیل T به صورت نمایی با طول کل ساختار کاهش می‌یابد. این کاهش تراگیل با کمیت بدون دیمانسیون طول تراگیل l_T نمایش داده می‌شود [۵]:

$$l_T = -\frac{N}{\langle \ln |T| \rangle} \quad (2)$$

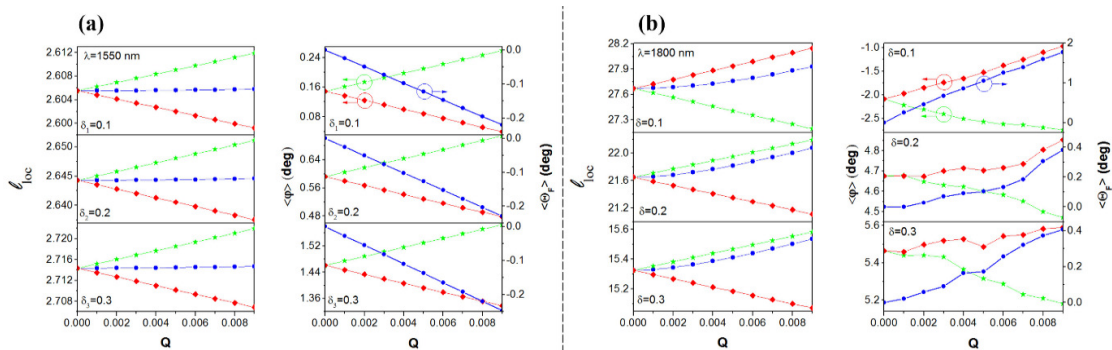
که $\langle \dots \rangle$ نشان دهنده میانگین آنسامبلی و N بیانگر تعداد کل لایه‌های ساختار است. در حد $N \rightarrow \infty$ ، طول تراگیل با طول جایگزیدگی برابر می‌شود، $l_{loc} = \lim_{N \rightarrow \infty} l_T$ [۵]. در این مقاله برای به دست آوردن ساختاری که لایه‌هایی با ضرایب گذردهی الکتریکی کاتوره‌ای داشته باشند، فرض شده است که در هر لایه‌ی مگنتوآپتیکی $\epsilon_{xx} \rightarrow \epsilon_{xx}(1 + \delta)$ تغییر کند. δ را میزان بی‌نظمی ضریب دی‌الکتریکی نامیده و برای میانگین‌گیری آنسامبلی تعداد 10^5 ساختار مستقل در نظر گرفته شده است که در هر ساختار میزان بی‌نظمی در بازه $[-\delta, \delta]$ با توزیع یکنواخت لحاظ شده باشد.

طیف‌های تراگیل و چرخش فارادی ساختار منظم $\text{air} / (\text{Ce:YIG} / \text{SiO}_2)^{45} / \text{substrate}$ که در آن ضرایب دی‌الکتریکی لایه‌ها کاتوره‌ای نمی‌باشند، در شکل ۱(a) نمایش داده شده است.



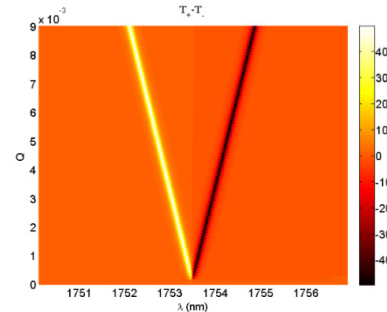
شکل ۱: طیف‌های تراگیل و چرخش فارادی (a) ساختار منظم، (b) ساختار کاتوره‌ای به ازای میزان بی‌نظمی $\delta=0.3$.

مشاهده می‌شود که هیچ مد تشدیددی در داخل گاف وجود ندارد و در طیف چرخش فارادی نیز در لبه‌های گاف چرخش تقویت شده وجود دارد. شکل ۱(b) طیف‌های تراگیل و چرخش فارادی را برای یک ساختار مشخص با میزان بی‌نظمی $\delta=0.3$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدهای تشدیددی در ناحیه‌ی گاف نواری به وجود آمده‌اند. این مدهای تشدیددی همراه با چرخش‌های فارادی تقویت شده می‌باشند. همان‌طور که در شکل داخلی نیز قابل مشاهده است، تشدید مدهای راستگرد و چپگرد در طول موج‌های مختلفی اتفاق می‌افتد.



شکل ۲: طول جایگزیدگی و میانگین فاز پرتو خروجی برای قطبش‌های دایروی راستگرد (★) و چپگرد (◆) و تراگیل برآیند (●) بر حسب پارامتر مگنتوآپتیکی Q برای طول موج‌های (a) $\lambda=1550 \text{ nm}$ و (b) $\lambda=1800 \text{ nm}$ به ازای میزان بی‌نظمی‌های مختلف.

در شکل ۲ طول جایگزیدگی برای قطبش‌های راستگرد و چپگرد و تراگسیل برآیند به همراه میانگین آنسامبلی فازهای آنها برای میزان بی‌نظمی‌های مختلف در طول موج‌های $\lambda=1550nm$ و $\lambda=1800nm$ به ازای تغییر پارامتر مگنتوآپتیکی Q نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که جداسدگی بین طول جایگزیدگی قطبش‌های راستگرد و چپگرد در هر دو طول موج به ازای هر سه مقدار بی‌نظمی وجود دارد. هم‌چنین در طول موج $\lambda=1550nm$ با افزایش میزان بی‌نظمی، مقدار طول جایگزیدگی در Qهای نظیر هم افزایش پیدا می‌کند که نشان دهنده‌ی افزایش میزان تراگسیل است. بررسی منحنی‌های مربوط به فازها در شکل ۲(a) نیز نشان می‌دهد که جداسدگی بین فازهای قطبش‌های دایروی در هر سه دسته ساختار روی می‌دهد و به ازای بی‌نظمی‌های متفاوت، روند افزایش یا کاهش خطی با افزایش Q به صورت منظم اتفاق می‌افتد که نتیجه‌ی آن تغییر منظم و خطی چرخش فارادی پرتو برآیند بر حسب Q است. در شکل ۲(b) نیز جداسدگی بین طول‌های جایگزیدگی برای قطبش‌های راستگرد و چپگرد به ازای هر سه مقدار بی‌نظمی قابل مشاهده می‌باشد. علی‌رغم اینکه برای طول موج $\lambda=1550nm$ جایگزیدگی تراگسیل برآیند بر حسب Q ثابت است ولی برای طول موج $\lambda=1800nm$ چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد و با افزایش Q، l_{loc} به سمت شاخه‌ی بالایی انحراف پیدا می‌کند.



شکل ۳: تفاضل تراگسیل قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد ($T_+ - T_-$) در اطراف طول موج $\lambda=1753nm$ بر حسب پارامتر مگنتوآپتیکی Q برای ساختار کاتوره‌ای با میزان بی‌نظمی $\delta=0.3$.

در شکل ۳ تفاضل تراگسیل قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد بر حسب پارامتر مگنتوآپتیکی Q در یک ساختار کاتوره‌ای با میزان بی‌نظمی $\delta=0.3$ نمایش داده شده است. این شکل جداسدگی مدهای تراگسیلی قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد را به وضوح نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش Q، مد تشدید قطبش راستگرد به سمت طول موج‌های کوتاه و مد تشدید قطبش چپگرد به سمت طول موج‌های بلند به صورت خطی جابجا می‌شوند.

نتیجه‌گیری

ویژگی‌های جایگزیدگی و تراگسیلی در ساختارهای مگنتوآپتیکی یک بعدی که لایه‌هایی با ضرایب دی‌الکتریکی کاتوره‌ای داشته باشند، بررسی شد. در اثر بی‌نظمی مدهای تشدید همراه با تقویت چرخش فارادی در گاف نواری این ساختارها ایجاد می‌شوند. هم‌چنین طول جایگزیدگی قطبش‌های راستگرد و چپگرد با هم برابر نبوده و به پارامتر مگنتوآپتیکی، طول موج انتشاری و میزان بی‌نظمی بستگی دارد.

مرجع‌ها

1. E. Abrahams, *50 Years of Anderson Localization*, World Scientific, Singapore, (2010).
2. A. Zvezdin, V. Kotov, *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*, Taylor & Francis (1997).
3. M. Steel, M. Levy, R. Osgood, "Photonic Bandgaps with Defects and the Enhancement of Faraday Rotation", *J. Lightwave Technol.*, **18**, 1297 (2000).
4. H. Kato, et al., "Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals", *J. Appl. Phys.*, **93**, 3906 (2003).
5. S. Gredeksul, et al., "Anderson localization in metamaterials and other complex media", *Low Temp. Phys.*, **38**, 570 (2012).