

بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران. ۱۴-۱۴ بهمن ۱۴۰۰



## بررسی اثر ضخامت نقص روی خواص غیر عادی یک سامانه دارای تقارن پاریته-وارونی زمان

على محمدپور، جمال بروستاني و على سلطاني والا

دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز (<u>a.m.pour@tabrizu.ac.ir</u>)

چکیده – درک مفاهیم مرتبط با تقارن پاریته-زمان، در محیط های اپتیکی مصنوعی، مشتمل بر نواحی بهره و اتلاف امکان پذیر می با شد. در این مقاله اثر ضخامت نقص در یک سامانه بس لایه ای دارای تقارن پاریته-زمان برر سی شده است. سامانه در نظر گرفته شـده متشـکل از دو بلور فوتونی یک بُعدی دارای تقارن پاریته-زمان نسـبت به مبدأ بوده که با تغییر ضـخامت لایه های مرکزی به عنوان نقص، رفتار سامانه مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از روش ماتریس انتقال و بررسی طیف های بازتاب و عبور و اندازه گیری پرش فازی به اندازه π در طیف بازتاب به ازای مقادیر مختلف بسامد و مشاهده تک مقدار بودن ویژه مقادیر ماتریس پراکندگی مربوط به ساختار در نقاط استثنائی، ویژگی های قابل توجهی مانند خا صیت بدون انعکاس تک سویه قابل حصول خواهد بود. با افزایش ضخامت لایه های نقص، نقاط استثنائی از بین رفته و مقدار پرش فازِ بازتاب فراتر از مقدار قبل خواهد بود.

كليد واژه- تقارن پاريته-زمان، خاصيت بدون انعكاس، فرامواد، ماتريس پراكندگي، نقاط استثنائي.

## Investigation of the Effect of Defect Thickness on Anomalous Properties of a Parity-Time Reversal Symmetry System

Ali Mohammadpour, Jamal Barvestani, and Ali Soltani Vala

Faculty of Physics, University of Tabriz, Iran. (<u>a.m.pour@tabrizu.ac.ir</u>)

Abstract- Understanding the concepts related to parity-time symmetry (PT) is possible in artificial optical environments including gain and loss regions. In this paper, the effect of defect thickness in a multilayer system with PT symmetry is investigated. The proposed system consists of two one-dimensional PT photonic crystals with respect to the origin, which by changing the thickness of the central layers as a defect, the behavior of the system has been studied. Using the transfer matrix method (TMM) and investigating the reflection and transmission spectra and measuring the  $\pi$ -phase hopping in the reflection spectrum for different frequency regions and observing the unimodular eigenvalues of the scattering matrix at exceptional points (EPs), significant features such as unidirectional reflectionless will be available. As the thickness of defect layer increases, the EPs disappear and the reflection phase hopping exceeds the previous value.

Keywords: Parity-time symmetry, Reflectionless, Metamaterials, Scattering matrix, Exceptional points.

مقدمه

تحقیق و پژوهش در خصوص انواع محیط های مصنوعی چون فرامواد و بلورهای فوتونی و بررسی کاربردهای آن ها در محدوده بسامد امواج رادیویی تا نور مرئی، تأثیر به سزایی در سامانه های ارتباطی نوین و محاسباتی گذاشته است [۱]. از طرفی دست یابی به محیط هایی با تقارن یاریته-زمان كمك شاياني به طراحي فرامواد جديد نموده است [7]. شرط تقارن پاریته-زمان، در سامانه های اپتیکی، زمانی که برآورده می شود [۳]. با پیشرفت های اخیر بدست آمده در خصوص فرامواد و همچنین با کشف محیط هایی با تقارن پاریته-زمان، درک برهمکنش های نور با ماده، بهتر شده است [۴]. اکثر مطالعاتی که در خصوص سامانه های اپتیکی با تقارن پاریته-زمان صورت گرفته است، مرتبط با لایه ها یا فیلم هایی بوده است که به طور متناوب، تحت عنوان یک سامانه بس لایه، در کنار هم قرار گرفته اند [۵]، که با تغییر یارامترهای مختلف مربوط به ساختار نظیر جنس مواد تشکیل دهنده لایه ها، تغییر زاویه و قطبش نور فرودی، جهت ورود نور فرودی به لایه ها، تغییر ضریب شکست لایه ها، افزودن نقص به ساختار با به کارگیری لایه هایی با جنس های مختلف و غیره می توان ویژگی های متعددی چون گذار فاز پاریته-زمان [۶]، جذب کامل همدوس [۷]، خاصیت بدون انعکاس تک سویه، نامرئی بودن تک سویه [۸]، انتشار ناوردایی موج [۹] و بسیاری از پدیده های دیگر را بررسی نمود. در این مقاله قصد داریم با تغییر ضخامت لایه های مرکزی با تقارن پاریته-زمان موجود در ساختار به عنوان نقص و تأثير افزايش ضخامت و تغيير موقعيت اين لایه ها نسبت به مبدأ، روی مُد های سامانه، طیف مربوط به بازتاب و عبور ساختار را بدست آورده و با تحلیل تغییرات فاز مربوط به بازتاب نور فرودی و مشخص نمودن ویژه

مقادیر ماتریس پراکندگی در محدوده بسامدی معین، ویژگی های سامانه را مطالعه نماییم.

ساختار پیشنهادی و بررسی نظری

شکل ۱ ساختاری را نشان می دهد که در آن دو بلور فوتونی با تقارن پاریته-زمان نسبت به مبدأ در جهت محور مختصات z قرار گرفته اند. تعداد لایه های در نظر گرفته شده برای بلور فوتونی سمت چپ و سمت راست به تعداد محدود  $\Lambda = 1$  بوده و ضخامت هر لایه برابر nm -1 در نظر گرفته شده است. ضریب شکست لایه های A و B به نظر گرفته شده است. ضریب شکست لایه های A و B به ترتیب برابر ۱۸۰۰+ ۱/۸۰ (ITO) و ۲۰/۰۱ - ۲/۲۰ میاد (Si:InP) و لایه C با لایه B مزدوج مختلط یکدیگر می باشند. فخامت لایه های ا0 و  $\Omega$  و همزمان ضخامت لایه های ۲ و  $\Gamma$  مشخص شده در شکل به عنوان نقص، نسبت به لایه های مجاور متفاوت در نظر گرفته شده است.



نور فرودی با قطبش TE در محدوده بسامدی تراهرتز به طور مایل با زاویه فرود۱۰=θ درجه، طبق رابطه ۱ وارد ساختار می شود که با استفاده از روش ماتریس انتقال [۱۰] و محاسبه ویژه مقادیر این ماتریس، طبق معادله ۲ می توانیم مقادیر مربوط به طیف بازتاب و عبور را بدست آوریم.

$$E_{y}(x,z) = e^{-i\omega t + ik_{x}^{x}} \times \begin{cases} ae^{ik_{z}^{z}} + be^{-ik_{z}^{z}} \\ ce^{ik_{z}^{z}} + de^{-ik_{z}^{z}} \end{cases}$$
(1)

در این رابطه a، b، c و b دامنه های امواج فرودی و خروجی از سامانه بوده و  $k_x$  بردار موج عرضی و  $k_z$  بردار موج طولی

مربوطه و arphi بسامد نور فرودی به سامانه می باشد.

(۲)

$$\begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\lambda k_z}{2\pi n_l^2} & -\frac{\lambda k_z}{2\pi n_l^2} \\ \frac{\lambda k_z}{2\pi n_l^2} & \frac{\lambda k_z}{2\pi n_l^2} \end{pmatrix}^{-1} M \begin{pmatrix} \frac{\lambda k_z}{2\pi n_s^2} & -\frac{\lambda k_z}{2\pi n_s^2} \\ \frac{\lambda k_z}{2\pi n_s^2} & \frac{\lambda k_z}{2\pi n_s^2} \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} n_s n_l n_s \\ m_s m_l n_s \\ m_l n_s \end{pmatrix}^N$$

$$M = (m_s m_l m_s m_l)^N$$

$$m_{j} = \begin{pmatrix} \cos(k_{jz}L_{j}) & i\frac{1}{q_{j}}\sin(k_{jz}L_{j}) \\ iq_{j}\sin(k_{jz}L_{j}) & \cos(k_{jz}L_{j}) \end{pmatrix}$$
(7)

تک لایه طبق رابطه ۳ داده می شود.

در این رابطه  $k_{jz}$  مولفه در جهت z بردار موج مربوط به لایه j ام بوده،  $L_j$  مخامت لایه j ام و پارامتر  $q_j$  با رابطه f داده می شود، که  $n_j$  ضریب شکست لایه j ام می باشد.

$$q_{j} = \sqrt{n_{j}^{2} - n_{0}^{2} (\sin \theta)^{2}}$$
(f)

که ضرایب مربوط به بازتاب  $(r_R \ e \ r_L)$  و عبور  $(t_L = t_R = t)$  از سمت چپ و راست ساختار، توسط مؤلفه های ماتریس انتقال  $Q_{ij}$  داده شده و n ضریب شکست محیط بوده و بدین ترتیب ماتریس پراکندگی توسط رابطه ۵ بیان خواهد شد.

$$s = \begin{pmatrix} t_R & r_L \\ r_R & t_L \end{pmatrix}$$
 ( $\delta$ )

و همان طور که پیش تر گفته شد، محاسبه ویژه مقادیر این ماتریس کمک خواهد کرد که با تغییر پارامتر های مختلفی نظیر تغییر ضخامت لایه های نقص، بتوانیم در بسامد های معینی، موقعیت نقاط استثنائی (EPs) [۱۱و۱۲] را مشخص نماییم و با در نظر گرفتن تأثیر آن روی مُد های سامانه، رفتار مربوط به خاصیت بدون انعکاس را مطالعه نماییم.

## نتايج و بحث

ضخامت لایه های تشکیل دهنده دو بلور فوتونی سمت چپ و راست با تقارن پاریته-زمان، برابر ۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده است و لایه های مرکزی که در شکل ۱ با هاشور مشخص شده اند، دارای ضخامتی متفاوت نسبت به لایه های مجاور بوده و به عنوان نقص در نظر گرفته شده و در عین حال شرط تقارن-پاریته زمان را نیز ارضا می نمایند. حضور این لایه ها به عنوان نقص در سامانه، سبب ایجاد خاصیت های منحصر به فردی در سامانه می گردد. با خاصیت های منحصر به فردی در سامانه می گردد. با مطالعه تغییرات طیف بازتاب رفت و برگشت و طیف عبور نسبت به تغییرات بسامد بهنجار شده نور فرودی مطابق شکل ۲ ملاحظه می نماییم که به ازای بسامد بهنجار شکل ۲ ملاحظه می نماییم که به ازای بسامد بهنجار ایف بازتاب برگشت نزدیک به صفر (۳۸۸۱ طیف بازتاب برگشت نزدیک به صفر (۳۸۶۸۳) بوده در حالی که طیف بازتاب رفت از مرتبه بزرگی بوده در حالی که طیف بازتاب رفت از مرتبه بزرگی



در این بسامد بهنجار مشخص، نمودار تغییرات فاز برای حالتی که ضخامت لایه های نقص دو برابر لایه های مجاور است طبق شکل ۳ (الف)، منحنی فاز مربوط به بازتاب برگشت، پرش فازی به اندازه  $\pi$  را تجربه می کند که این دقیقاً معادل نقاط استثنائی (EPs) بوده که خاصیت بدون انعکاس تک سویه در آن رخ می دهد، و در حالتی که ضخامت لایه های نقص برابر ضخامت لایه های مجاور باشد، یعنی لایه های نقصی در سامانه وجود نداشته باشد و  $\pi$  بدون انعکاس تک سویه که معادل با پرش فازی به اندازه  $\pi$  در منحنی مربوط به تغییرات فاز بازتاب برگشت بود، مشاهده شد، که دلیل آن حضور نقاط استثنائی (EPs) در سامانه بود.

## مرجعها

- [1] S. Jahani and Z. Jacob, "All-dielectric metamaterials", NNano. 1. 1. TA/T. ٤, T. 10.
- [Y] W. Cai and V. Shalaev, Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications, Springer, New York, Y.Y.
- [\*] C. E. Ruter, K. G. Makris, R. El-Ganainy, D. N. Christodoulides, M. Segev and D, Kip, "Observation of parity-time symmetric in optics", Nat. Photonics, Vol. 11, P. Vot-V97, 7.1.
- [4] D. Chritodoulides and J. Yang, Parity-time symmetry and its Applications, Springer Nature, Singapore, Y. VA.
- [•] O. V. Shramkova and G. P. Tsironis, "Scattering properties of PT-symmetric layered periodic structures", J. Opt. 14, 100101, 7017.
- [1] M. Silveirinha and N. Engheta, "Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media", Phys. Rev. B Vo., Volla, Y. V.
- [V] H. Alaeian and J. A. Dionne, "Parity-time symmetric plasmonic metamaterials", Phys. Rev. A  $A9, \cdot TTAT9, T \cdot 15$ .
- [<sup>A</sup>] M. Sarisaman, "Unidirectional reflectionless and invisibility in the TE and TM modes of a PTsymmetric slab system", Phys. Rev. A 90, 117417, 7017.
- [9] B. Edwards, A. Alu, M. E. Yang, M. Silveirinha and N. Engheta, "Experimental verification of epsilonnear-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide", Phys. Rev. Lett. 100, 077907, 1000.
- [1] M. Born and E. Wolf, *Principle of Optics*, seventh ed. Cambridge University Press, UK, 1999.
- [11] W. D. Heiss, "Exceptional points of non-Hermitian operators", J. Phys. Math. Gen. TV, YE00-YETE, Y...F.
- [**\`**] A. Mohammadpour, J. Barvestani and A. Soltani Vala, "Extraordinary directional properties of a parity-time symmetric one-dimensional photonic

همچنین در حالتی که ضخامت لایه های نقص، سه برابر لایه های مجاور باشد، در بسامد مذکور، طبق شکل ۳ (ب)، مقدار پرش فازی π از بین رفته و نقاط استثنائی حضور نداشته و خاصیت بدون انعکاس تک سویه رخ نمی دهد.



مطابق شکل ۴ با رسم منحنی تغییرات ویژه مقادیر ماتریس پراکندگی بر حسب تغییرات بسامد بهنجار ملاحظه می کنیم که به ازای نقاط استثنائی با مقدار بسامد بهنجار مشخص شده، ویژه مقادیر ماتریس در این نقاط تک مقدار بوده و مشخصاً مد های مربوط به سامانه را معرفی می نمایند.



نتيجه گيرى

در این مقاله اثر تغییرات ضخامت لایه های مرکزی مشخص به عنوان نقص در سامانه مورد بررسی قرار گرفت. خاصیت بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران، ۱۲– ۱۴ بهمن ۱۴۰۰

lattice", Optics Communications  $\cdots$ ,  $\gamma\gamma\gamma\gamma\xi\gamma$ ,  $\gamma\gamma\gamma\gamma$ .