بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

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

علی محمدپور، جمال بروستانی و علی سلطانی والا

دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز (a.m.pour@tabrizu.ac.ir)

چکیده – درک مفاهیم مرتبط با تقارن پاریته-زمان، در محیط های اپتیکی مصنوعی، مشتمل بر نواحی بهره و اتلاف امکان پذیر می باشد. در این مقاله اثر ضخامت نقص در یک سامانه بس لایه ای دارای تقارن پاریته-زمان بررسی شده است. سامانه در نظر گرفته شده متشکل از دو بلور فوتونی یک بُعدی دارای تقارن پاریته-زمان نسبت به مبدأ بوده که با تغییر ضخامت 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 خاصیت 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.

کلید واژه- تقارن پاریته-زمان، خاصیت بدون انعکاس، فراماده، ماتریس پراکندگی، نقاط استثنائی.

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. (a.m.pour@tabrizu.ac.ir)

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 π-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.

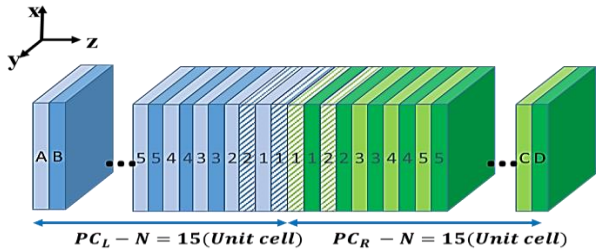
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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 پاریته-زمان کمک شایانی به طراحی فرامواد جدید نموده است [۲]. شرط تقارن پاریته-زمان، در سامانه های اپتیکی، زمانی که ضریب شکست نواحی مختلف بصورت $n(\vec{r})=n^*(-\vec{r})$ باشد، 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 عنوانِ یک سامانه بس لایه، در کنار هم قرار گرفته اند [۵]، که با تغییر پارامترهای 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 تأثیر افزایش ضخامت و تغییر موقعیت این 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 N=۱۵ بوده و ضخامت هر لایه برابر l=۵۰ nm در نظر گرفته شده است. ضریب شکست لایه های A و B به ترتیب برابر n_A=۱/۸۰ +۰/۰۴i (ITO) و n_B=۲/۲۰ -۰/۰۴i (Si:InP) بوده و طبق تقارن پاریته-زمان لایه D با لایه A و لایه C با لایه B مزدوج مختلط یکدیگر می باشند. ضخامت لایه های B_1 و C_1 و همزمان ضخامت لایه های B_2 و C_2 مشخص شده در شکل به عنوان نقص، نسبت به لایه های مجاور متفاوت در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: طرحواره ساده ای از ساختار .

نور فرودی با قطبش TE در محدوده بسامدی تراهرتز به طور مایل با زاویه فرود θ=۱۰ 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.

$$E_y(x,z)=e^{-i\omega t+ik_x x}\times\begin{cases}ae^{ik_z z}+be^{-ik_z z}\\ ce^{ik_z z}+de^{-ik_z z}\end{cases} \qquad (۱)$$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

مربوطه و ω بسامد نور فرودی به سامانه می باشد.

(۲)
$$\begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\lambda k_z}{2\pi n_l^2} & -\frac{\lambda k_z}{2\pi n_l^2} \\ 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} M \begin{pmatrix} \frac{\lambda k_z}{2\pi n_g^2} & -\frac{\lambda k_z}{2\pi n_g^2} \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

که در این رابطه n_l و n_g به ترتیب معرف ضریب شکست لایه های اتلاف و بهره بوده و $M=(m_g m_l m_g m_l)^N$ ماتریس انتقال مربوط به کل سامانه می باشد. ماتریس انتقال مربوط به یک تک لایه طبق رابطه ۳ داده می شود.

$$m_j = \begin{pmatrix} \cos(k_{jz} L_j) & i\frac{1}{q_j}\sin(k_{jz} L_j) \\ i q_j \sin(k_{jz} L_j) & \cos(k_{jz} L_j) \end{pmatrix} \quad (۳)$$

در این رابطه k_{jz} مولفه در جهت z بردار موج مربوط به لایه j ام بوده، L_j ضخامت لایه j ام و پارامتر q_j با رابطه ۴ داده می شود، که n_j ضریب شکست لایه j ام می باشد.

$$q_j = \sqrt{n_j^2 - n_0^2 (\sin\theta)^2} \quad (۴)$$

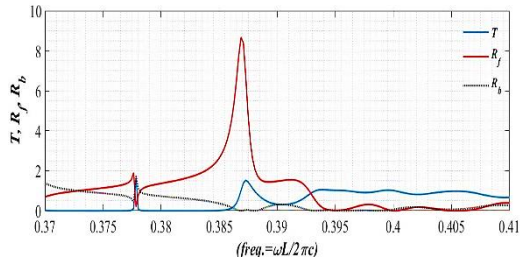
که ضرایب مربوط به بازتاب (r_L و r_R) و عبور ($t_L=t_R=t$) از سمت چپ و راست ساختار، توسط مؤلفه های ماتریس انتقال Q_{ij} داده شده و n_0 ضریب شکست محیط بوده و بدین ترتیب ماتریس پراکندگی توسط رابطه ۵ بیان خواهد شد.

$$S = \begin{pmatrix} t_R & r_L \\ r_R & t_L \end{pmatrix} \quad (۵)$$

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.

نتایج 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 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 ۰/۳۸۸۱، منحنی طیف عبور از مرتبه تقریباً یک بوده و طیف بازتاب برگشت نزدیک به صفر (R_b=۰/۰۰۰۰۶۸۳) بوده در حالی که طیف بازتاب رفت از مرتبه بزرگی (R_f=۲/۵۹) از اعداد می باشد.

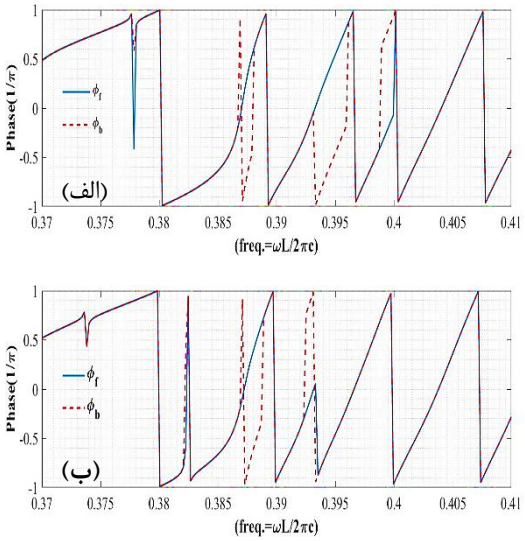


شکل ۲: طیف بازتاب رفت و برگشت و طیف عبور بر حسب بسامد بهنجار برای ساختار شکل ۱.

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 π 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

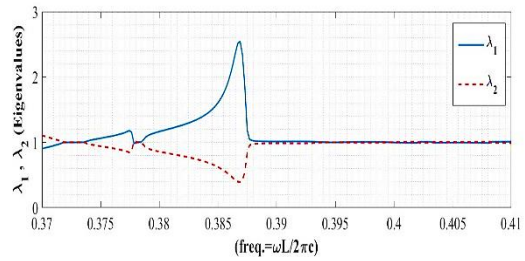
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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.



شکل ۳: نمودار تغییرات فاز بر حسب بسامد بهنجار. ضخامت لایه های نقص (الف) دو برابر، (ب) سه برابر لایه های مجاور.

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 مُد های مربوط به سامانه را معرفی می نمایند.



شکل ۴: ویژه مقادیر ماتریس پراکندگی بر حسب تغییرات بسامد بهنجار.

نتیجه گیری

در این مقاله اثر تغییرات ضخامت لایه های مرکزی مشخص به عنوان نقص در سامانه مورد بررسی قرار گرفت. خاصیت بدون انعکاس تک سویه که معادل با پرش فازی به اندازه π در منحنی مربوط به تغییرات فاز بازتاب برگشت بود، مشاهده شد، که دلیل آن حضور نقاط استثنائی (EPs) در سامانه بود.

مرجع‌ها

[۱] S. Jahani and Z. Jacob, “All-dielectric metamaterials”, NNano. ۱۰. ۱۰۳۸/۳۰٤, ۲۰۱۵.

[۲] W. Cai and V. Shalaev, *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications*, Springer, New York, ۲۰۱۰.

[۳] 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. ۱۱, P. ۷۵۲-۷۹۲, ۲۰۱۰.

[٤] D. Chritodoulides and J. Yang, *Parity-time symmetry and its Applications*, Springer Nature, Singapore, ۲۰۱۸.

[٥] O. V. Shramkova and G. P. Tsironis, “Scattering properties of PT-symmetric layered periodic structures”, J. Opt. ۱۸, ۱۰٥۱۰۱, ۲۰۱٦.

[٦] M. Silveirinha and N. Engheta, “Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media”, Phys. Rev. B ۷٥,۰۷٥۱۱۹, ۲۰۰۷.

[۷] H. Alaeian and J. A. Dionne, “Parity-time symmetric plasmonic metamaterials”, Phys. Rev. A ۸۹, ۰۳۳۸۲۹, ۲۰۱۴.

[۸] M. Sarisaman, “Unidirectional reflectionless and invisibility in the TE and TM modes of a PT-symmetric slab system”, Phys. Rev. A ۹٥, ۰۱۳۸۰٦, ۲۰۱۷.

[۹] B. Edwards, A. Alu, M. E. Yang, M. Silveirinha and N. Engheta, “Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide”, Phys. Rev. Lett. ۱۰۰, ۰۳۳۹۰۳, ۲۰۰۸.

[۱۰] M. Born and E. Wolf, *Principle of Optics*, seventh ed. Cambridge University Press, UK, ۱۹۹۹.

[۱۱] W. D. Heiss, “Exceptional points of non-Hermitian operators”, J. Phys. Math. Gen. ۳۷, ۲٤٥٥-۲٤٦٤, ۲۰۰۴.

[۱۲] A. Mohammadpour, J. Barvestani and A. Soltani Vala, “Extraordinary directional properties of a parity-time symmetric one-dimensional photonic

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

lattice", Optics Communications ۵۰۰, ۱۲۷۳٤۲, ۲۰۲۱.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]