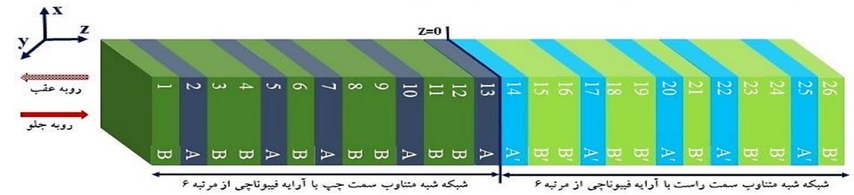
شبکه شبه متناوب فوتونی با آرایه فیبوناچی با تقارن پاریته–زمان

علی محمدپور، جمال بروستانی، علی سلطانی والا
دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

مقدمه

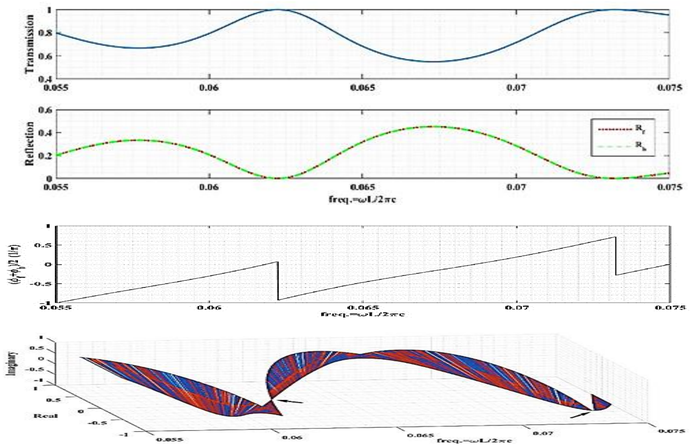
مفهوم فرامواد اپتیکی با تقارن پاریته–زمان، بستر مناسبی را برای به کارگیری و درک بر هم کنش نور با ماده در سامانه های باز فراهم ساخته است. ساختارهای اپتیکی با تقارن پاریته–زمان منجر به پدیده های غیر عادی جالب توجهی نظیر، خاصیت شفافیت تک سویه، تکینگی های طیفی، نامرئی سازی تک سویه، تغییرات ناگهانی در فاز مختلط و شناسایی نقاط استثنائی می شوند [۱]. شرط لازم برای برقراری تقارن پاریته–زمان این است که قسمت حقیقی شاخص شکست تابع زوج و قسمت موهومی تابع فردی از مکان باشد و بدین ترتیب یک محیط بهره و اتلاف را شکل دهند. در این مقاله، یک ساختار شبه متناوب با آرایه فیبوناچی [۲] را در نظر گرفته و با استفاده از روش ماتریس انتقال، ویژگی های اپتیکی مربوط به ساختار بدون اتلاف با آرایه فیبوناچی را بررسی کرده و سپس با اعمال تقارن پاریته–زمان روی ساختار، تأثیر این تقارن را روی طیف های عبور و بازتاب و مقدار میانگین عددی تغییرات فازهای بازتاب بدست می آوریم و در نهایت با مشاهده پرش های فازی در چهار نقطه استثنائی، ویژه مقادیر ماتریس پراکندگی را محاسبه کرده و تغییرات آن ها را مورد مطالعه قرار می دهیم.



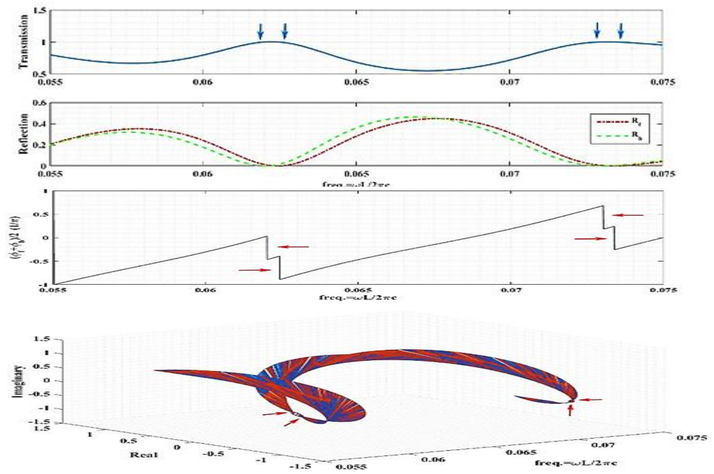
شکل ۱. طرحواره ساده ای از ساختار.

روش

با استفاده از روش ماتریس انتقال و محاسبه ماتریس پراکندگی [۳]، ویژگی های مربوط به ساختار را بررسی می نماییم. مطابق شکل ۱، ساختاری متشکل از دو شبکه شبه متناوب یک بعدی که با آرایه فیبوناچی در کنار هم قرار گرفته اند، در نظر می گیریم. در شبکه سمت چپ نسبت به مبدأ بُره های A و B هر کدام دارای ضخامتی برابر ۵۰ نانومتر بوده و شاخص شکست مربوط به هر کدام به ترتیب برابر: $n_A = 3.20 + 0.01i\beta$ و $n_B = 2.80 - 0.01i\beta$ می باشد و در سمت راست برای بُره های A' و B' با تقارن پاریته–زمان نسبت به شبکه سمت چپ به ترتیب داریم: $n_A' = 3.20 - 0.01i\beta$ و $n_B' = 2.80 + 0.01i\beta$ که درآن ها پارامتر β، ضریب بهره و اتلاف مربوط به ساختار بوده و با تغییرات مربوط به این ضریب، می توانیم سامانه را ابتدا بدون اتلاف در نظر گرفته و سپس تقارن پاریته–زمان را روی آن اعمال نماییم.



شکل ۲. ساختار فیبوناچی بدون اتلاف ($\beta = 0$).



شکل ۳. ساختار فیبوناچی با اتلاف ($\beta = 1$).

نتایج

ابتدا یک سامانه بدون اتلاف با آرایه فیبوناچی را در نظر می گیریم، برای این منظور مقدار پارامتر بهره و اتلاف موجود در شاخص شکست β را برابر مقدار صفر می گیریم و تصور می کنیم که ساختار فاقد تقارن پاریته–زمان است. با محاسبه طیف عبور و طیف های بازتاب روبه جلو و روبه عقب بر حسب تغییرات بسامد بهنجار شده، مطابق شکل ۲(الف)، ملاحظه می کنیم که در بازه مشخصی برای بسامد بهنجار شده در دو نقطه معین ۰/۰۶۲۲۵ و ۰/۰۷۳۲۵ طیف عبور برابر یک بوده و بازتاب ها برابر عدد صفر می باشند، که این ویژگی معرف خاصیت شفافیت دوسویه در این نقطه می باشد. در شکل ۲(ب) میانگین عددی فازهای بازتاب بر حسب تغییرات بسامد بهنجار شده بدست آمده است، دقیقاً در دو نقطه، پرش فازی به اندازه π اتفاق افتاده که این معرف دو نقطه استثنائی برای ساختار می باشد. با محاسبه قسمت های حقیقی و موهومی ویژه مقادیر ماتریس پراکندگی مطابق شکل ۲(ج)، مشاهده می کنیم که به ازای این دو نقطه استثنائی، ویژه مقادیر در همدیگر ادغام شده و تک مقدار می باشند. اکنون تقارن پاریته–زمان را به ساختار اعمال نماییم، مقدار پارامتر بهره و اتلاف را برابر یک گرفته و با رسم طیف های عبور و بازتاب ویژگی های اپتیکی سامانه را مطالعه می نماییم. مطابق شکل ۳(الف)، در نقاط مشخصی با مقدار بسامد بهنجار شده ۰/۰۶۲۰۳ و ۰/۰۶۲۴۳ و همچنین ۰/۰۷۳۰۲ و ۰/۰۷۳۳۹، که با علامت پیکان مشخص شده اند، در محدوده بازه عددی بین این نقاط، طیف عبور از مقدار یک اندکی فراتر می رود، و اما به ازای دقیقاً چهار نقطه مشخص فوق، مقدار طیف عبور برابر یک بوده و یکی از بازتاب ها مقدار کوچکی نزدیک به صفر داشته و دیگری دقیقاً برابر صفر می باشد، تحت این شرایط، خاصیت شفافیت تک سویه معکوس رخ می دهد. در شکل ۳(ب)، میانگین فازهای بازتاب، بدست آمده است و در نقاط مذکور، پرش های فازی دو تایی به اندازه $\pi/2$ اتفاق می افتد که در این حالت، چهار نقطه استثنائی داریم، که در نهایت با محاسبه قسمت های حقیقی و موهومی ویژه مقادیر ماتریس پراکندگی، مطابق شکل ۳(ج)، ملاحظه می کنیم که نسبت به حالت قبل، در این حالت هر نقطه در بسامد مربوطه، به دو نقطه شکافته شده و در این چهار نقطه ویژه مقادیر در همدیگر ادغام شده و تک مقدار می باشند. نکته مهم و قابل توجه دیگر موجود در این شکل، وجود حلقه های بسته تشکیل شده بین هر دو نقطه استثنائی است که آن، معادل حالتی است که در آن ناحیه، تقارن فازها شکسته شده و ویژه مقادیر تک مقدار نبوده و مقدار طیف عبور بزرگتر از مقدار واحد می باشد.

مراجع

[1] D. Christodoulides and J. Yang, “Parity-time symmetry and its Applications”; *Springer Nature*, Singapore, (2018).

[2] P. A. Kalozoumis, et al; “Local symmetries and perfect transmission in aperiodic photonic multilayers”; *Physical Review A* **88**, (2013) 033857.

[3] A. Mohammadpour, J. Barvestani and A. S. Vala; “Extraordinary directional optical properties of a parity-time symmetric one-dimensional photonic lattice”; *Optics Commun.* **500**, (2021) 127342.