مطالعه‌ی طیف عبوری بلورهای فوتونی یک‌بعدی با ساختارهای شبه‌دوره‌ای مبتنی بر دنباله‌های فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی

ملیحه نجاتی[1]

[1]گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه قم، قم، ایران، کد پستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۹/۰۲
تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۹/۰۷

شاپای چاپی: 2588-4921
شاپای الکترونیکی: 2588-493x

* نویسنده مسئول:
manejati61@gmail.com

DOI:
10.22034/jmrph.2026.137976.1005

چکیده

در این پژوهش یک بلور فوتونی با ساختارهای شبه‌دوره‌ای مبتنی بر دنباله‌های ریاضی گوناگون شامل فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی شبیه‌سازی شده است. در ابتدا، ساختار فیبوناچی به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده و با استفاده از روش ماتریس انتقال تأثیر ضریب شکست لایه‌های دی‌الکتریک، تعداد چاه‌ها و طول کلی ساختار بر طیف عبوری بررسی می‌گردد. در ادامه، طیف عبوری تمام این ساختارهای شبه‌دوره ای ترسیم و از نظر طیف عبور مقایسه شده‌اند تا مشخص شود که چگونه نوع نظم ناشی از دنباله‌های ریاضی متفاوت می‌تواند گاف‌های نواری و قله‌های عبوری را کنترل کند. این مقایسه به ازای تغییر طول کل ساختار و تغییر تعداد چاه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت به بررسی گاف نواری همه‌جهته ساختار بلور فوتونی شبه‌دوره‌ای پیشنهادی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی مختلف می‌پردازیم و نشان می‌دهیم ساختار پیشنهادی یک ساختار قابل تنظیم است که مقادیر مختلفی برای گاف-های نواری همه‌جهته ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: بلور فوتونی شبه‌دوره‌ای، طیف عبوری، گاف نواری فوتونی، دنباله‌های فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای، پاد فیبوناچی

مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهای متناوب دست‌ساخته‌ای با ثابت دی‌الکتریک مهندسی‌شده در مقیاس طول‌موج هستند که از زمان کشف خود در سال ۱۹۸۷ توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۱, ۲]. این ساختارهای تناوبی بر سازوکار انتشار نور تأثیر گذاشته و مشخصه‌های بنیادین سیستم نظیر گاف نواری، باند عبور و جذب نوری را تغییر می‌دهند. بسته به راستای تناوبی، بلورهای فوتونی به‌صورت یک، دو و سه بعدی ساخته شده‌اند[۳–۶]. بلورهای فوتونی یک بعدی را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مختلفی از جمله حکاکی الکتروشیمیایی، پوشش‌دهی چرخشی و رسوب‌دهی فیزیکی بخار ساخت [۷]. وجود لایه‌ها با ضریب شکست‌های مختلف در بلورهای فوتونی، از انتشار امواج الکترومغناطیسی در جهت‌های خاص و بازه‌های طول‌موج معین جلوگیری می‌کند [۸–۱۰] و باعث ایجاد

گاف‌های نواری در بلورهای فوتونی می‌شود. تنظیم‌پذیری این گاف‌ها نقشی حیاتی در کاربردهای متنوع دستگاه‌ها نظیر فیلترهای باند باریک [۱۱]، موجبرها [۱۲]، رادارهای فروسرخ [۱۳]، فیبرها [۱۴]، حسگرهای هموگلوبین خون [۱۵]، حسگرهای غیرمتقابل [۱۶] دارد.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در ساختارهای کاملاً تناوبی، محدودیت‌هایی نظیر تعداد محدود گاف‌های نواری فوتونی و دامنه‌ی فرکانسی معین، محققان را به‌سوی طراحی ساختارهای غیرتناوبی سوق داده است تا درجات آزادی بیشتری برای مهندسی طیف عبوری در اختیار داشته باشند. در این راستا، ساختارهای شبه‌دوره‌ای ساختارهایی هستند که به خاطر داشتن حالت میانی بین نظم کامل و بی‌نظمی کامل، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. یک شبه‌بلور، برخلاف بلورهای فوتونی دوره‌ای، دارای تقارن انتقالی نیست، اما بر اساس یک قاعده‌ی جایگزینی تولید می‌شود که بر دو بلوک سازنده استوار بوده و در نتیجه، نظم بلندبرد ایجاد می‌کند [۱۷] و انواع مختلفی از شبه‌بلورهای فوتونی وجود دارد[۱۸, ۱۹].

ساختارهای فیبوناچی به‌عنوان بلورهای فوتونی شبه‌دوره‌ای یک‌بعدی پیش‌تر بررسی شده‌اند [۲۰]. انتقال نور در حالت‌های لبه‌ی گاف این ساختارها، از جمله کاهش شدید سرعت گروه، با تداخل‌سنجی پالس فوق‌کوتاه به‌صورت تجربی بررسی و با روش ماتریس انتقال تفسیر شده است [۲۱]. در زمینه‌ی بازتاب همه‌جهته نیز، بلورهای فوتونی دوره‌ای با چندلایه‌های فیبوناچی مقایسه شده‌اند [۲۲] و فیبوناچی‌های تعمیم‌یافته برای بازتاب همه‌جهته بررسی شده‌اند، به‌طوری‌که نشان داده شده برخی چینش‌های غیرتناوبی می‌توانند از بلورهای فوتونی مرسوم بهتر عمل کنند [۲۳]. این کارها ضخامت‌ها را بهینه می‌کنند و عملکرد را با معیارهایی مانند سطح زیر منحنی عبور بر حسب زاویه [۲۲] یا بازتاب میانگین‌گرفته‌شده بر طول‌موج و زاویه [۲۳] می‌سنجند.

این رده‌ی میانی که ساختارهای قطعیِ غیرمتناوب نامیده می‌شوند، نه‌تنها شامل دنباله‌های فیبوناچی و دیگر شبه‌بلورها می‌شود بلکه نمونه‌هایی از ساختارهای غیرتناوبیِ متمایز از شبه‌بلورها، نظیر دنباله‌ی تو–مورس را نیز در بر می‌گیرد[۲۴].

در کار حاضر چند نوع بلورهای فوتونی یک بعدی با نظم شبه‌دوره‌ای نظیر فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم یافته، فیبوناچی چند جمله‌ای و پاد فیبوناچی مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار، طول کل و تعداد چاه ثابت و یکسان نگه داشته می‌شود و پنج دنباله‌ی فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی با ضرایب شکست یکسان مقایسه می‌شوند، به‌طوری‌که تفاوت طیف‌ها تنها ناشی از نظم لایه‌چینی است. پهنای گاف اصلی در فرود عمود برای تمام ساختارهای شبه‌دوره‌ای ذکر شده در سه حالت با هم مقایسه شده است (جدول ۲). در ادامه این کار به بررسی وجود گاف نواری فوتونی همه‌جهته در ساختارهای شبه‌دوره‌ای متفاوت پرداخته و بازه و پهنای گاف نواری همه‌جهته (OBG) برای همه‌ی ساختارها به‌صورت کمّی بر حسب گیگاهرتز گزارش می‌شود (جدول ۳) و پارامتر x در فیبوناچی چندجمله‌ای به‌عنوان درجه‌ی آزادی برای تنظیم گاف معرفی می‌شود.

شبه‌بلورهای فوتونی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی متفاوت

همان طور که گفته شد در سال‌های اخیر استفاده از ساختارهای شبه‌دوره‌ای بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. این ساختارها نظم بلند بردی را از خود نشان می‌دهند و رفتارهای نوری جالبی از خود بروز می‌دهند[۲۰]. یکی از این ساختارهای شبه‌دوره‌ای ساختارهای فیبوناچی می‌باشد. در این مقاله بلورهای فوتونی یک بعدی با نظم شبه‌دوره‌ای فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی مورد بررسی قرار گرفته است. دنباله‌ی فیبوناچی، معروف‌ترین و پرکاربردترین ساختار شبه‌دوره‌ای یک‌بعدی است و قاعده بازگشتی در این دنباله عبارتست از:

$$s_n = s_{n-1} + s_{n-2} \qquad n \geq 2 \qquad (1)$$

بسته به این‌که s_0 و s_1 چه مقادیری داشته باشند، دنباله‌های مختلفی ساخته می‌شوند. در جدول۱ مقادیر s_0 و s_1 و نوع چینش لایه ها برای دنباله‌های مختلف آورده شده است. در این کار ما به دنبال بررسی طیف عبوری از بلور فوتونی یک بعدی به ازای تمام چینش‌های ذکر شده در جدول ۱ می‌باشیم.

روش تحلیل ما در این کار بر پایه‌ی روش ماتریس انتقال می‌باشد که ابزاری کارآمد و دقیق برای محاسبه‌ی ضرایب عبور و بازتاب در ساختارهای چندلایه‌ای به شمار می‌رود. در این پژوهش با استفاده از این روش و کد نویسی آن در برنامه متلب به بررسی طیف عبور، پهنای گاف نواری فوتونی و خواص نوری این ساختارها پرداخته می شود.

در قطبش TE، میدان الکتریکی و در قطبش TM، میدان مغناطیسی بر صفحه‌ی فرود عمود است. روش ماتریس انتقال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در دو موقعیت در لایه‌های مجاور به هم مرتبط می‌کند. با در نظر گرفتن وابستگی زمانی میدان‌ها به‌صورت $e^{-i\omega t}$، ماتریس انتقال برای لایه j ام عبارتست از:

$$M_j(\Delta z_j)=\begin{bmatrix} cos(k_z^j\Delta z_j) & \frac{-i}{p_j}sin(k_z^j\Delta z_j) \\ -i\,p_j sin(k_z^j\Delta z_j) & cos(k_z^j\Delta z_j) \end{bmatrix} \qquad (2)$$

که در آن ω فرکانس موج فرودی ، Δz_j ضخامت لایه j ام، $k_z^j=(\omega/c)\,n_j cos(\theta_j)$ مولفه z بردار موج در لایه j ام و ε_j و μ_j به ترتیب گذردهی و نفوذپذیری مواد در لایه j ام هستند. p_j پارامتر وابسته به قطبش است که برای قطبش TE برابر $p_j=\sqrt{\frac{\varepsilon_j}{\mu_j}}\cos\theta_j$ و برای قطبش TM برابر $p_j=\sqrt{\frac{\mu_j}{\varepsilon_j}}\cos\theta_j$ است؛ برای مواد غیرمغناطیسی ($\mu_j=1$) این دو به‌ترتیب به $n_j\cos\theta_j$ و $\frac{\cos\theta_j}{n_j}$ تبدیل می‌شوند. در روابط فوق، $\cos\theta_j=\sqrt{1-(n_0^2 sin^2\theta_0/n_j^2)}$ است. همچنین c ، θ_j ، θ_0 ، n_0 ، $n_j=\sqrt{\varepsilon_j\mu_j}$ به ترتیب سرعت نور در خلأ، زاویه‌ی انتشار در لایه‌ی j ام ، زاویه تابش فرودی، ضریب شکست فضای آزاد و ضریب شکست لایه j ام می‌باشند.

ماتریس انتقال کل ساختار از حاصل‌ضرب ماتریس انتقال تک‌تک لایه‌ها، به همان ترتیبی که در چینش قرار گرفته‌اند، به دست می‌آید. چون موج ابتدا از لایه‌ی اول و در نهایت از لایه‌ی J ام عبور می‌کند، ماتریس انتقال کل به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M_{Tot} = M_J(\Delta z_J)M_{J-1}(\Delta z_{J-1})\cdots M_2(\Delta z_2)M_1(\Delta z_1) \qquad (۳)$$

که در آن J تعداد کل لایه‌های چینش است و هر M_j مطابق رابطه‌ی (۲) بسته به این‌که لایه‌ی jام D_1 یا D_2 باشد ساخته می‌شود.

بدین ترتیب، ماتریس انتقال کل را می‌توان به‌صورت زیر بدست آورد:

$$M_{Tot}=\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

جدول۱: انواع دنباله‌های ریاضی، مقادیر اولیه و چینش ده لایه از آن‌ها

نوع دنباله	مقادیر $(s_0.s_1)$	چینش لایه ها
فیبوناچی	(1,1)	$D_1\ D_1\ D_2\ D_2D_2D_2$
لوکاس	(2,1)	$D_1D_2D_1D_1$ $D_2\ D_1\ D_2\ D_1D_1D_2$
لوکاس تعمیم‌یافته	(1,3)	$D_2D_2D_2D_1$ $D_1\ D_1\ D_2\ D_1D_1D_2$
فیبوناچی چندجمله‌ای با $x=1.618$	(1,1)	$D_1D_2D_2D_1$ $D_1\ D_2\ D_2\ D_1D_2D_1$
فیبوناچی چندجمله‌ای با $x=2$	(1,1)	$D_1D_2D_1D_2$ $D_1\ D_2\ D_1\ D_2D_1D_2$
پاد فیبوناچی	(1,-1)	$D_1D_2D_1D_2$ $D_1\ D_1\ D_2\ D_1D_1D_2$ $D_1D_1D_2D_1$

به این ترتیب، ضریب انتقال به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$t=\frac{2p_0}{(M_{11}+M_{12}p_s)p_0+(M_{21}+M_{22}p_s)} \qquad (۵)$$

که در آن برای قطبش TE، $p_0=n_0cos(\theta_0)$ ، $p_s=n_scos(\theta_s)$ و برای قطبش TM، $p_0=cos(\theta_0)/n_0$ و $p_s=cos(\theta_s)/n_s$ که در آن‌ها n_0 و n_S به ترتیب ضریب شکست محیط قبل از اولین لایه و بعد از آخرین لایه هستند. همچنین، θ_0 و θ_s به ترتیب زاویه تابش و زاویه‌ای هستند که موج نور از بلور فوتونی خارج می‌شود. زاویه‌ی خروجی θ_S نیز از قانون اسنل به دست می‌آید: $n_0\sin\theta_0=n_S\sin\theta_S$. لذا می‌توان عبور از چندلایه، T، را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

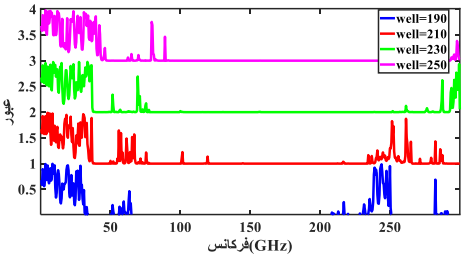
$$T=\frac{p_s}{p_0}|t|^2 \qquad (6)$$

در ابتدا بلور فوتونی با چینش لایه‌های دی‌الکتریک با ضریب شکست $n_1=1.5$ و $n_2=3$ بر اساس دنباله فیبوناچی با چینش

$$D_1\ D_1\ D_2\ D_2D_2D_2D_1D_2D_1D_1$$

در نظر گرفته شده است و طیف عبور ناشی از بلور فوتونی برای قطبشTE با شبیه‌سازی عددی مبتنی بر روش ماتریس انتقال و با

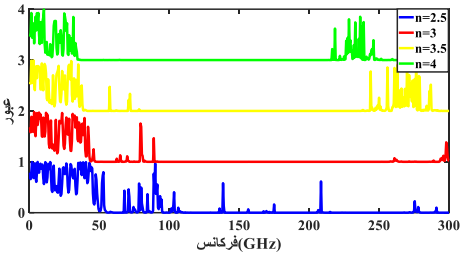
کد نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB محاسبه و رسم شده است. در این کد، ماتریس انتقال هر لایه طبق رابطه‌ی (۲) ساخته می‌شود و ماتریس انتقال کل ساختار از حاصل‌ضرب متوالی ماتریس‌های لایه‌ها، به ترتیب قرارگیری آن‌ها در چینش، به دست می‌آید. سپس ضریب عبور با استفاده از روابط (۵) و (۶) برای هر فرکانس و هر زاویه‌ی فرود محاسبه می‌شود. محیط پیش از ساختار و پس از آن هوا در نظر گرفته شده است($n_0 = n_s = 1$). در شکل ۱ نمودار طیف عبور از بلور فوتونی مبتنی بر ساختار فیبوناچی به‌ازای پارامترهای $n_1 = 1.5$، $n_2 = 3$، $L = 40\ mm$ و به ازای تعداد چاه‌های مختلف بر حسب فرکانس موج فرودی ترسیم شده است. در توصیف مورد نظر ما، «چاه» به یک لایه با ضریب شکست پایین (مشابه مکانیک کوانتومی چاه پتانسیل) اشاره دارد. لازم به ذکر است مواد بدون اتلاف و بدون پاشندگی در نظر گرفته شده‌اند و در شکل‌های ۱ تا ۶ فرود عمود است و فرکانس در بازه‌ی ۰ تا ۴۰۰ گیگاهرتز ترسیم شده است.



شکل۱: نمودار طیف عبور بلور فوتونی مبتنی بر ساختار فیبوناچی بر حسب فرکانس موج فرودی به ازای $n_1 = 1.5$ ، $n_2 = 3$ و $L = 40\ mm$ و به ازای تعداد چاه‌های مختلف

برای بررسی اثر تغییر تعداد چاه، طیف عبور به ازای تعداد چاه ۱۹۰، ۲۱۰،۲۳۰و ۲۵۰ ترسیم شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد با افزایش تعداد چاه‌ها (در طول کل ثابت)، ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و طیف عبور به سمت فرکانس‌های بالاتر می‌رود که به این پدیده شیفت آبی گفته می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چاه‌ها، پهنای گاف نواری فوتونی افزایش می‌یابد.

از این رو، به منظور به‌کارگیری این ساختار به‌عنوان فیلتر فرکانسی، انتخاب تعداد چاه‌های بیشتر، عملکرد مطلوب‌تری را به همراه خواهد داشت. در ادامه با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، اثر تغییر ضریب شکست دی الکتریک دوم را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج عددی حاصل از کد متلب در شکل ۲ ترسیم شده است. در این شکل ضریب شکست دی الکتریک اول ثابت و برابر $n_1 = 1.5$ نگه داشته شده و ضریب شکست لایه دوم مقادیر ۲.۵، ۳، ۳.۵ و ۴ انتخاب شده است.



شکل۲: نمودار طیف عبور بلور فوتونی مبتنی بر ساختار فیبوناچی بر حسب فرکانس موج فرودی به ازای $n_1 = 1.5$ ، $L = 40\ mm$

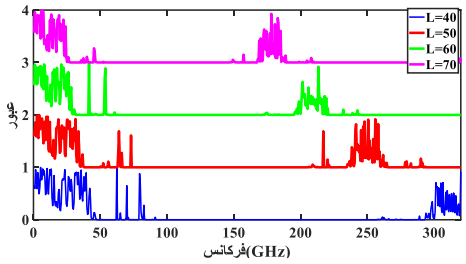
و به ازای ضرایب دی الکتریک مختلف well=250 ،

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، افزایش n_2 تباین ضریب شکست و ضخامت نوری لایه‌ها را بیشتر می‌کند؛ از آنجا که افزایش ضریب شکست فرکانس مدها را کاهش می‌دهد [۲۵]، طیف به فرکانس‌های پایین‌تر می‌رود (شیفت قرمز) و با افزایش تباین، گاف عمیق‌تر می‌شود. علاوه بر این همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد برای ضریب شکست‌های بالاتر، گاف نواری فوتونی عاری از هرگونه مد انتشار بوده و تقریباً هیچ فرکانسی در این بازهٔ ممنوعه قابلیت عبور از ماده را ندارد ($T \approx 0$). مثلاً برای ضریب شکست n=4، یک گاف نواری فوتونی پهن در ناحیه ۳۴ گیگا هرتز تا ۲۱۶ گیگا هرتز وجود دارد و در این محدوده، هیچ‌گونه عبور یا انتشار موجی رخ نمی‌دهد و لذا ساختار را برای کاربردهای فیلترسازی امواج الکترومغناطیسی در این محدودهٔ فرکانسی بسیار کارآمد و مناسب می‌سازد.

در نهایت، اثر طول کل ساختار بر طیف عبوری بلور فوتونی مبتنی بر دنباله‌ی فیبوناچی بررسی شده و نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل، تعداد چاه‌ها ۲۵۰ و ضرایب شکست لایه‌ها $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ثابت در نظر گرفته شده‌اند و طیف عبوری به ازای طول‌های کل $L = 40{,}50{,}60{,}70\ mm$ رسم شده است.

همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، با افزایش طول کل ساختار (در تعداد چاه ثابت) ضخامت لایه‌ها افزایش می‌یابد؛ در نتیجه طیف عبوری به سمت فرکانس‌های پایین‌تر و طول‌موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود (شیفت قرمز) و پهنای گاف نواری فوتونی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که بیشترین پهنای گاف در کوچک‌ترین طول بررسی‌شده، یعنی $L = 40\ mm$ ، مشاهده می‌شود. کاهش پهنای گاف نتیجه‌ی جابه‌جایی آن به فرکانس‌های پایین‌تر است. این نتیجه با نتیجه شکل

۱ همخوانی دارد، چون ضخامت لایه‌ها با طول کل نسبت مستقیم و با تعداد چاه‌ها نسبت معکوس دارد. به بیان دقیق‌تر، پهنای گاف بر حسب گیگاهرتز با نسبت well/L متناسب است: $\Delta\omega \propto \frac{well}{L}$ یعنی در L ثابت، افزایش تعداد چاه‌ها گاف را به فرکانس‌های بالاتر می‌برد و پهنای آن را زیاد می‌کند و در well ثابت، افزایش L گاف را به فرکانس‌های پایین‌تر می‌برد و پهنای آن را کم می‌کند. بنابراین دو گزاره‌ی «افزایش تعداد چاه‌ها پهنای گاف را زیاد می‌کند» و «افزایش طول کل پهنای گاف را کم می‌کند» با هم تناقضی ندارند.

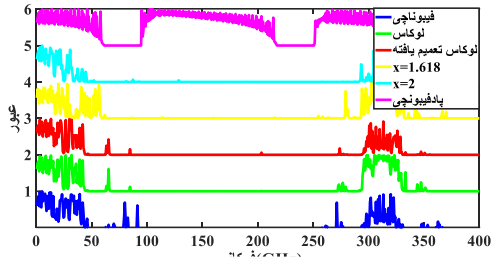


شکل۳: نمودار طیف عبور بلور فوتونی مبتنی بر ساختار فیبوناچی بر حسب فرکانس موج فرودی به ازای $n_1 = 1.5$ ، $n_2 = 3$ و well=250 به ازای طول‌های مختلف ساختار

بعد از بررسی اثر پارامترهای هندسی بر روی ساختار بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی، در ادامه این تحقیق، طیف عبوری چندین ساختار شبه‌تناوبی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی نظیر لوکاس و لوکاس تعمیم یافته، فیبوناچی چند جمله‌ای و پاد فیبوناچی بررسی شده است تا تأثیر نظم لایه‌چینی بر روی گاف نواری و طیف عبور مورد ارزیابی قرار گیرد. همان‌طور که گفته شد، در تمام این ساختارهای شبه‌دوره‌ای، نظم جملات از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$s_n = s_{n-1} + s_{n-2} \qquad n \geq 2$$

مقادیر اولیه s_0 و s_1 برای ساختارهای شبه‌دوره‌ای ذکر شده در جدول ۱ آورده شده است. به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 40\,mm$ و تعداد چاه well=250، با استفاده از مقادیر جدول ۱، طیف عبوری برای ساختارهای شبه‌دوره‌ای مختلف در شکل ۴ ترسیم شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد به ازای مقادیر مشخصه طول سیستم و تعداد چاه، در طیف عبوری از ساختار بلور فوتونی مبتنی بر دنباله پادفیبوناچی گاف‌های نواری کاملاً منظم و با فاصله‌های مساوی از هم ظاهر می‌شوند و پهنای گاف‌های نواری فوتونی آن حدود ۳۵گیگاهرتز است که به مراتب از بقیه ساختارهای شبه‌دوره‌ای ترسیم شده کوچک‌تر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود گاف نواری فوتونی دارای لبه‌های تیز می‌باشد و هیچ حالت باریک اضافی داخل گاف وجود ندارد، لذا در فیلترها برای عبور دادن فقط باند مشخصی از فرکانس‌ها کاربرد دارد.



شکل۴: نمودار طیف عبور بر حسب فرکانس تابشی بلور فوتونی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی گوناگون شامل فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت L=40 mm و تعداد چاه well=250

با توجه به شکل ۴ مشخص است، پهن‌ترین گاف نواری فوتونی برای ساختار بلور فوتونی شبه‌دوره‌ای با توزیع چند جمله‌ای به ازای x=2 می‌باشد. برای ساختارهای شبه‌دوره‌ای با توزیع چند جمله‌ای، نظم جملات از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

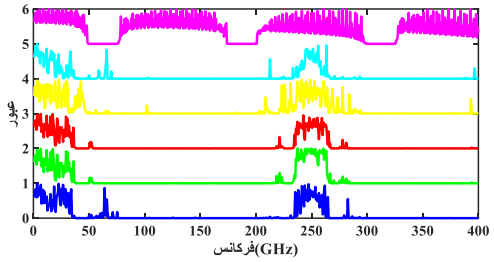
$$s_n = x s_{n-1} + s_{n-2} \qquad n \geq 2 \qquad (7)$$

با تغییر x ، دنباله و در نتیجه چیدمان لایه‌ها تغییر می‌کند. در شکل ۴ طیف عبوری به ازای مقادیر مشخصه طول کل سیستم و تعداد چاه و به ازای x=2 به رنگ آبی و به ازای x=1.618 به رنگ زرد نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد با افزایش xاز ۱.۶۱۸ به ۲ ، گاف نواری فوتونی به سمت فرکانس‌های پایین تر منتقل می‌شود و پدیده شیفت قرمز مشاهده می‌گردد. همچنین در این شرایط (۲۵۰ چاه و L=۴۰ mm) افزایش x باعث افزایش پهنای گاف می‌شود.

حسن استفاده از توزیع چند جمله‌ای در ساختارهای بلور فوتونی آن است که با تغییر پارامتر x ، می‌توان گاف نواری، تعداد حالت‌های باریک و پهنای آن‌ها را به دلخواه تنظیم کرد. نتایج حاصل از شکل ۴ به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت L=40mm و تعداد چاه well=250 حاصل شد. در ادامه، به‌منظور بررسی تأثیر تعداد چاه‌ها بر روی طیف عبوری، مجدداً طیف عبوری چندین ساختار شبه‌تناوبی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی شامل فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی با تعداد چاه‌های کم‌تر مورد

مطالعه قرار می‌گیرد تا با مقایسه با شکل ۴ تأثیر تعداد چاه بر ویژگی‌های طیفی ساختارها ارزیابی شود.

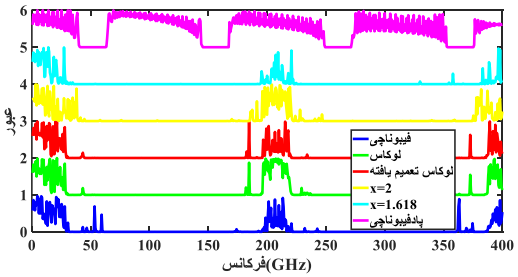
در شکل ۵، طیف عبوری به ازای تمام پارامترهای ثابت یکسان با شکل ۴ و تعداد چاه کم‌تر well=200 ترسیم شده است:



شکل۵: نمودار طیف عبور بر حسب فرکانس تابشی بلور فوتونی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی گوناگون شامل فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 40\ mm$ و تعداد چاه well=200

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، مشابه شکل ۴، طیف عبوری بلور فوتونی با ساختار پاد فیبوناچی دارای گاف‌های نواری منظم و هم‌فاصله است و پهنای این گاف‌ها به‌مراتب کوچک‌تر از پهنای گاف در سایر ساختارهای بررسی‌شده است. با این حال، در مقایسه با شکل ۴، کاهش تعداد چاه‌ها از ۲۵۰ به ۲۰۰ سبب می‌شود تعداد گاف‌های واقع در بازه‌ی فرکانسی رسم‌شده افزایش یابد و پهنای هر گاف در فرود عمودی از حدود ۳۵ گیگا هرتز به حدود ۲۸ گیگا هرتز کاهش یابد. مقایسه با شکل ۴ نشان می‌دهد در تمام ساختارهای شبه‌دوره‌ای با کاهش تعداد چاه از ۲۵۰ به ۲۰۰، پهنای گاف‌های نواری فوتونی کاهش می‌یابد. لذا برای داشتن پهنای گاف نواری فوتونی بزرگ‌تر و کامل‌تر بهتر است تعداد چاه‌ها در بلور فوتونی افزایش یابد.

در شکل ۶ طیف عبوری بلور فوتونی با ساختارهای شبه‌دوره‌ای به ازای تمام پارامترهای شکل ۴ اما با افزایش طول کلی ساختار، ترسیم شده است.



شکل۶: نمودار طیف عبور بر حسب فرکانس تابشی بلور فوتونی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی گوناگون شامل فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 60\ mm$ و تعداد چاه well=250

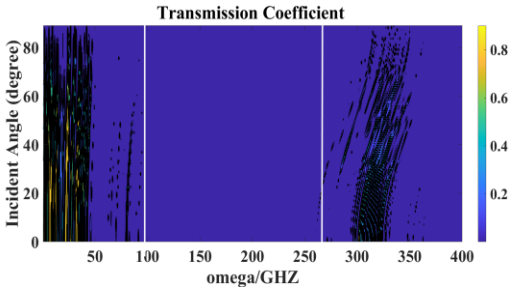
در این شکل نیز مشابه با دو شکل پیشین طیف عبوری از بلور فوتونی مبتنی بر دنباله پاد فیبوناچی دارای گاف‌های نواری منظم با لبه‌های تیز می‌باشد. اما پهنای گاف‌های نواری از هر دو حالت قبل باریک‌تر شده و به حدود 23GHz کاهش می‌یابد. همچنین همان گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده شد، در این حالت نیز، کم‌ترین پهنای گاف نواری فوتونی مربوط به ساختار مبتنی بر دنباله‌ی پادفیبوناچی می‌باشد. مقایسه شکل‌های ۴ و ۶ نشان می دهد که در طیف عبوری بلورهای فوتونی با ساختارهای شبه‌تناوبی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی گوناگون (شامل فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته و فیبوناچی چندجمله‌ای)، افزایش طول کل سیستم به‌وضوح باعث بروز پدیده‌ی شیفت قرمز (انتقال به سوی طول‌موج‌های بلندتر یا فرکانس‌های پایین‌تر) می‌شود. پهنای گاف-های نواری در قطبش برای فرود عمود به ازای $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: پهنای گاف نواری اصلی در فرود عمود برای ساختارهای شبه‌دوره‌ای (n_2 = ۳، n_1 = ۱.۵، قطبش TE).

دنباله	پهنای گاف، ۲۵۰ چاه، L=۴۰ mm (GHz)	پهنای گاف، ۲۰۰ چاه، L=۴۰ mm (GHz)	پهنای گاف، ۲۵۰ چاه، L=۶۰ mm (GHz)
فیبوناچی	۱۷۸	۱٦۷	۱۳۷
لوکاس	۲۰٦	۱۹٤	۱۵۰
لوکاس تعمیم‌یافته	۲۲۹	۱۹٦	۱۵۱
فیبوناچی چندجمله‌ای (x = ۱.۶۱۸)	۲۲۰	۱۷٦	۱٦٦
فیبوناچی چندجمله‌ای (x = ۲)	۲٤۷	۱٦۵	۱٤٤
پاد فیبوناچی	۳۵ ≈	۲۸ ≈	۲۳ ≈

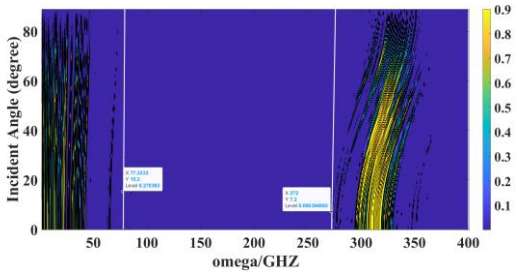
گاف نواری فوتونی همه‌جهته(OBG)

تاکنون، زاویه نور فرودی بر سیستم مورد مطالعه را صفر درجه در نظر گرفته‌ایم و سپس با تغییر پارامترهای ذکر شده، نمودارهای طیف عبوری را بر حسب فرکانس نور فرودی برای قطبش TE بررسی کرده و گاف نواری فوتونی آن را یافته‌ایم. در این بخش، تأثیر زاویه بر نرخ عبوری در بلور فوتونی با ساختار شبه‌دوره‌ای را بررسی کرده و وجود گاف نواری فوتونی همه‌جهته (OBG) در قطبش TE را بررسی می‌کنیم. بدین منظور زاویه فرودی را از ۰ تا ۹۰ درجه تغییر می‌دهیم. طبق تعریف گاف نواری فوتونی همه‌جهته (OBG)، نرخ عبوری نور باید در تمام زوایای نور فرودی صفر باشد. در شکل ۷، طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی و به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت L=40 mm و تعداد چاه well=250 ترسیم شده است. در محاسبات OBG، زاویه‌ی فرود از ۰ تا ۹۰ درجه تغییر داده شده و ناحیه‌ای که عبور در تمام زوایا عملاً صفر است، به‌عنوان OBGدر نظر گرفته شده است.



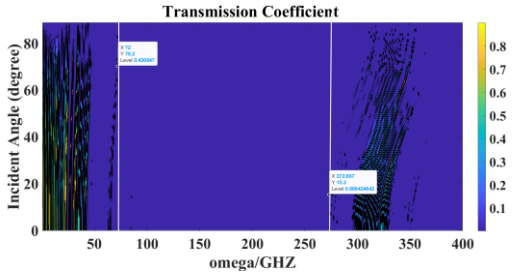
شکل۷: طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L =$ $40\ mm$ و تعداد چاه well=250

همان‌طور که شکل فوق نشان می‌دهد یک گاف نواری فوتونی همه‌جهته در بازه فرکانسی ۹۴ تا ۲۶۰ گیگا هرتز وجود دارد که در این بازه فرکانسی به ازای هیچ زاویه‌ی فرودی، عبور اتفاق نمی‌افتد. طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله ریاضی لوکاس به ازای تمامی مقادیر ثابت شکل ۷ در شکل ۸ ترسیم شده است.



شکل ۸: طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله لوکاس به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 40\ mm$ و تعداد چاه well=250

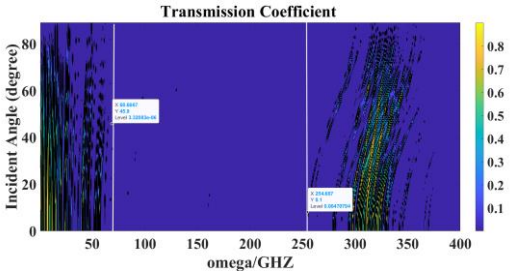
همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد به ازای تمام زوایای فرودی، طیف عبوری دارای یک گاف نواری فوتونی همه‌جهته به پهنای ۱۹۵ گیگا هرتز در ناحیه فرکانسی GHz<ω<272GHz۷۷ می‌باشد. مقایسه شکل ۸ و ۷ نشان می‌دهد طیف عبوری از بلور فوتونی مبتنی بر دنباله لوکاس پهنای باند بزرگ‌تری نسبت به دنباله فیبوناچی دارد. در ادامه با بکارگیری دنباله لوکاس تعمیم یافته در ساختار بلور فوتونی، نمودار طیف عبور به ازای زوایای تابش فرودی مختلف در بازه فرکانسی ۰ تا ۴۰۰ گیگا هرتز ترسیم شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد برای دنباله لوکاس تعمیم یافته یک گاف نواری فوتونی همه‌جهته در ناحیه فرکانسی GHz<ω<272GHz۷۲ به پهنای ۲۰۰ گیگاهرتز وجود دارد که کمی از گاف نواری فوتونی همه‌جهته لوکاس پهن‌تر می‌باشد.



شکل۹: طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله لوکاس تعمیم یافته به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 40\ mm$ و تعداد چاه well=250

در ادامه به بررسی حضور گاف نواری فوتونی همه‌جهته برای بلورهای فوتونی شبه‌دوره‌ای مبتنی بر فیبوناچی چند جمله‌ای می‌پردازیم. ابتدا حالت x=1.618 را در نظر می‌گیریم. طیف

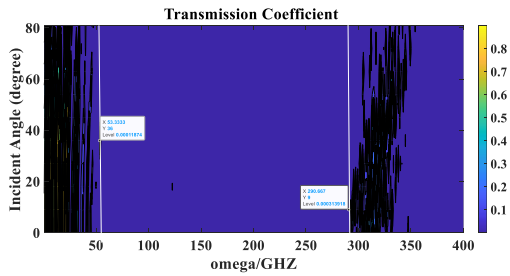
عبور بر حسب فرکانس موج تابشی و زاویه تابش در شکل ۱۰ ترسیم شده است.



شکل ۱۰: طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی چند جمله-ای با ضریب x=1.618 ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت L=40 mm و تعداد چاه well=250

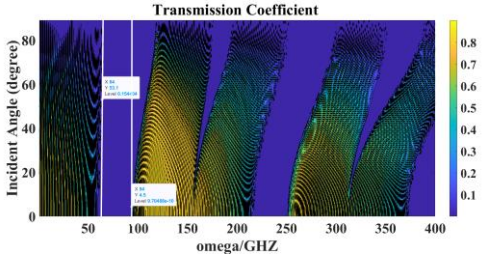
بعد از ترسیم طیف عبور به ازای x=1.618 در شکل ۱۱ به ترسیم طیف عبوری بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی چند جمله-ای با ضریب x=2 می‌پردازیم.

همان‌طور که شکل نشان می‌دهد به ازای x=2، گاف نواری فوتونی همه‌جهته با پهنای ۲۳۸ گیگاهرتز در ناحیه فرکانسی 53GHz<ω<291GHz وجود دارد. مقایسه شکل ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش x از x=1.618 به x=2 پهنای گاف نواری فوتونی از ۱۸۶ به ۲۳۸ گیگاهرتز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی چند جمله-ای با ضریب x=2 به ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 40\ mm$ و تعداد چاه well=250

در نهایت طیف عبور بر حسب فرکانس موج تابشی به ازای تمام زوایای تابشی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله پاد فیبوناچی در شکل۱۲ترسیم شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد برای فرکانس‌های کم‌تر از 400GHz پهنای گاف نواری فوتونی همه‌جهته (OBG) به مراتب کوتاه‌تر از دیگر ساختارهای شبه‌دوره ای می باشد. مقایسه شکل‌های ۷ تا ۱۲ نشان می‌دهد، برای فرکانس های کم‌تر از 400GHz پهن‌ترین گاف نواری فوتونی همه‌جهته‌ی بلور فوتونی شبه‌دوره‌ای فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی چند جمله‌ای با ضریب x=2 و کم‌ترین پهنای گاف نواری فوتونی همه‌جهته برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله پادفیبوناچی می‌باشد. نتیجه کمی گاف‌های نواری همه جهته ساختارهای شبه‌دوره‌ای مورد بررسی در جدول ۳ جمع آوری شده است.



شکل۱۲: طیف عبور بر حسب فرکانس موج فرودی و زاویه فرودی برای بلور فوتونی مبتنی بر دنباله پادفیبوناچی به ازای ضریب شکست لایه‌های دی الکتریک $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 3$ ، طول ثابت $L = 40\ mm$ و تعداد چاه well=250

جدول۳: بازه و پهنای گاف نواری فوتونی همه‌جهته (OBG) ساختارهای شبه‌دوره‌ای (n_1 = ۱.۵، n_2 = ۳، L = ۴۰ mm، تعداد چاه ۲۵۰)

دنباله	بازه‌ی OBG (GHz)	پهنای OBG (GHz)
فیبوناچی	۹۴ تا ۲۶۰	۱۶۶
لوکاس	۷۷ تا ۲۷۲	۱۹۵
لوکاس تعمیم‌یافته	۷۲ تا ۲۷۲	۲۰۰
فیبوناچی چندجمله‌ای (x = ۱.۶۱۸)	۶۸ تا ۲۵۴	۱۸۶
فیبوناچی چندجمله‌ای (x = ۲)	۵۳ تا ۲۹۱	۲۳۸
پاد فیبوناچی	۶۴ تا ۹۴	۳۰

در مورد اثر نوع چینش، دنباله‌ی پاد فیبوناچی چینشی تقریباً دوره‌ای دارد و به همین دلیل گاف‌های آن منظم، هم‌فاصله و با لبه‌های تیز ظاهر می‌شوند. در فیبوناچی چندجمله‌ای با x = ۲ نیز چینش لایه‌ها تناوبی D_1D_2 است (جدول ۱) و این ساختار پهن‌ترین گاف همه‌جهته را دارد. با این حال، هدف این پژوهش اثبات یا توجیه علت تک‌تک تغییرات پهنای گاف نبود؛ هدف بررسی منظم ساختارهای شبه‌دوره‌ای مبتنی بر دنباله‌های مختلف و گزارش کمّی رفتار طیفی آن‌هاست (جدول‌های ۲ و ۳) تا بتوان بر پایه‌ی آن ساختار را برای کاربرد مورد نظر طراحی کرد: بازتابنده‌ی همه‌جهته با گاف پهن [۲۶, ۲۷]، پوشش‌های پنهان‌سازی راداری [۱۳] یا فیلتر باند باریک [۱۱]. تحلیل کامل سازوکار هر چینش (مثلاً بررسی طیف فوریه‌ی دنباله‌ها) خارج از دامنه‌ی این کار است و می‌تواند موضوع پژوهش‌های بعدی باشد.

نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش، طیف عبوری و گاف نواری فوتونی همه‌جهته‌ی بلورهای فوتونی یک‌بعدی مبتنی بر دنباله‌های فیبوناچی، لوکاس، لوکاس تعمیم‌یافته، فیبوناچی چندجمله‌ای و پاد فیبوناچی با روش ماتریس انتقال بررسی و مقایسه شد. یافته‌های اصلی به شرح زیر است.

ساختار مرجع فیبوناچی: با ثابت بودن طول کل، افزایش تعداد چاه‌ها لایه‌ها را نازک‌تر می‌کند؛ طیف به فرکانس‌های بالاتر می‌رود (شیفت آبی) و پهنای گاف نواری افزایش می‌یابد. افزایش ضریب شکست لایه‌ی دوم، که تباین ضریب شکست را بیشتر می‌کند، طیف را به فرکانس‌های پایین‌تر می‌برد و پدیده شیفت قرمز مشاهده می‌شود. در نهایت، اثر طول سیستم روی طیف فرکانسی بلور فوتونی مبتنی بر دنباله فیبوناچی نشان داد با افزایش طول سیستم، پهنای گاف نواری فوتونی کاهش یافته و بیشترین پهنای باند به ازای طول سیستم $L = 40\ mm$ رخ می‌دهد. همچنین نشان داده شد که افزایش طول کل سیستم، مشابه افزایش اختلاف ضریب شکست، طیف عبور را به سمت فرکانس‌های پایین‌تر و طول‌موج‌های بلندتر انتقال داده و مجدداً پدیده‌ی شیفت قرمز را به همراه دارد.

مقایسه‌ی ساختارهای شبه‌دوره‌ای در فرود عمود:

در ادامه این پژوهش، طیف عبوری چندین ساختار شبه‌تناوبی مبتنی بر دنباله‌های ریاضی نظیر لوکاس و لوکاس تعمیم یافته، فیبوناچی چند جمله‌ای و پاد فیبوناچی بررسی شد و تأثیر نظم لایه‌چینی بر روی گاف نواری و طیف عبور مورد ارزیابی قرار گرفت. مطالعات عددی نشان داد:

در بلور فوتونی مبتنی بر دنباله‌ی پاد فیبوناچی، که چینش لایه‌های آن تقریباً دوره‌ای است، گاف‌های نواری منظم و هم‌فاصله ظاهر می‌شوند، اما پهنای آن‌ها به‌مراتب کم‌تر از سایر ساختارهای شبه دوره‌ای ست. در فرود عمودی به ازای تعداد چاه ۲۵۰ و طول کل ساختار ۴۰ میلیمتر پهن‌ترین گاف مربوط به فیبوناچی چندجمله‌ای با ثابت $x = 2$ است و با افزایش ثابت x از ۱.۶۱۸ به ۲، گاف هم پهن‌تر می‌شود و هم به فرکانس‌های پایین‌تر می‌رود. در همه‌ی ساختارها، کاهش تعداد چاه‌ها از ۲۵۰ به ۲۰۰ (در طول کل ثابت) پهنای گاف‌ها در فرود عمودی را کم می‌کند و برای پاد فیبوناچی از حدود $35GHz$ به $28GHz$ می‌رسد. به طور مشابه، افزایش طول کل ساختار (در تعداد چاه ثابت) نیز پهنای گاف‌ها را کاهش می‌دهد، به‌طوری‌که پهنای گاف برای ساختار پاد فیبوناچی از حدود $35GHz$ به $23GHz$ می‌رسد. این رفتار مشابه قابل انتظار است، زیرا در هر دو حالت ضخامت لایه‌ها افزایش می‌یابد: کاهش تعداد چاه‌ها در طول ثابت و افزایش طول در تعداد چاه ثابت، هر دو لایه‌ها را ضخیم‌تر می‌کنند. پهنای گاف اصلی هر پنج ساختار در فرود عمود، برای سه حالت (۲۵۰ چاه با L=۴۰ mm، ۲۰۰ چاه با L=۴۰ mm و ۲۵۰ چاه با L=۶۰ mm)، در جدول ۲ جمع‌آوری شده است.

گاف نواری فوتونی همه‌جهته:

همه‌ی ساختارهای بررسی‌شده در بازه‌ی فرکانسی کمتر از ۴۰۰ GHzگاف نواری همه‌جهته دارند و بازه و پهنای آن‌ها در جدول ۳ آمده است. پهن‌ترین گاف همه‌جهته مربوط به فیبوناچی چندجمله‌ای با $x = 2$ است، به پهنای $238GHz$ و پس از آن به ترتیب لوکاس تعمیم‌یافته $(200GHz)$، لوکاس$(195GHz)$، فیبوناچی چندجمله‌ای $(186GHz)$ و فیبوناچی $(166GHz)$ قرار دارند. در $x = 1.618$ فیبوناچی چندجمله‌ای افزایش x از ۱.۶۱۸ به ۲ گاف همه‌جهته را پهن‌تر می‌کند (از $186GHz$ به $238GHz$) و لبه‌ی پایینی آن را به فرکانس‌های پایین‌تر می‌برد (از $68GHz$ به $53GHz$). کم‌ترین پهنا مربوط به پاد فیبوناچی است به پهنای $30GHz$. بنابراین با تغییر نوع دنباله و پارامتر x می‌توان بازه و پهنای گاف همه‌جهته را تنظیم کرد.

منابع

[1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett. 58, 2059–2062 (1987).

[2] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," Phys. Rev. Lett. 58, 2486–2489 (1987).

[3] C. Wu, Q. Fan, W. Wu, T. Liang, Y. Liu, H. Yu, Y. Yin, "Magnetically tunable one-dimensional plasmonic photonic crystals," Nano Lett. 23(5), 1981–1988 (2023).

[4] X.T. He, J.W. Liu, F.L. Shi, K. Shen, W.J. Chen, X.D. Chen, J.W. Dong, "Dual-polarization two-dimensional valley photonic crystals," Sci. China Phys. Mech. Astron. 65(8), 284212 (2022).

[5] R.K. Cersonsky, J. Antonaglia, B.D. Dice, S.C. Glotzer, "The diversity of three-dimensional photonic crystals," Nat. Commun. 12, 2543 (2021).

[6] J.D. Joannopoulos, P.R. Villeneuve, S. Fan, "Photonic crystals: putting a new twist on light," Nature 386, 143–149 (1997).

[7] L.D. Bonifacio, B.V. Lotsch, D.P. Puzzo, F. Scotognella, G.A. Ozin, "Stacking the nanochemistry deck: structural and compositional diversity in one-dimensional photonic crystals," Adv. Mater. 21, 1641–1646 (2009).

[8] M. Solaimani, F. Cheraghi, M. Nejati, "Effect of geometry on the electromagnetic wave transport properties of dielectric/non-magnetized plasma photonic crystals: comparison of top-flat and top-curved refractive index profiles," Opt. Quantum Electron. 54, 581 (2022).

[9] M. Solaimani, M. Ghalandari, M. Nejati, "Optical filters based on fixed length Thue–Morse plasma-dielectric photonic band multilayers: comparing two, three, and four materials systems," AIP Adv. 11, 025309 (2021).

[10] M. Nejati, M. Solaimani, S. Azizi, "Electromagnetic bandgaps of fixed-length Thue–Morse plasma/dielectric/superconductor photonic band multilayers," Philos. Mag. 103(18), 1756–1773 (2023).

[11] W. Nakagawa, P.-C. Sun, C.-H. Chen, Y. Fainman, "Wide-field-of-view narrow-band spectral filters based on photonic crystal nanocavities," Opt. Lett. 27, 191–193 (2002).

[12] B. Wang, "Waveguiding and bending modes in a plasma photonic crystal bandgap device," AIP Adv. 6, 065015 (2016).

[13] Z. Wang, Y. Cheng, Y. Nie, X. Wang, R. Gong, "Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications," J. Appl. Phys. 116, 054905 (2014).

[14] M.V. Alfimov, A.M. Zheltikov, A.A. Ivanov, V.I. Beloglazov, B.A. Kirillov, S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.B. Fedotov, L.A. Melnikov, N.B. Skibina, "Photonic-crystal fibers with a photonic band gap tunable within the range of 930–1030 nm," JETP Lett. 71, 489–492 (2000).

[15] S.E.-S. Abd El-Ghany, W.M. Nouman, Z.S. Matar, Z.A. Zaky, A.H. Aly, "Optimized bio-photonic sensor using 1D-photonic crystals as a blood hemoglobin sensor," Phys. Scr. 96, 035501 (2021).

[16] J.Y. Sui, S.Y. Liao, B. Li, H.F. Zhang, "High sensitivity multitasking non-reciprocity sensor using the photonic spin Hall effect," Opt. Lett. 47, 6065–6068 (2022).

[17] Z.V. Vardeny, A. Nahata, A. Agrawal, "Optics of photonic quasicrystals," Nat. Photonics 7, 177–187 (2013).

[18] W. Steurer, D. Sutter-Widmer, "Photonic and phononic quasicrystals," J. Phys. D: Appl. Phys. 40, R229–R247 (2007).

[19] M. Bellingeri, A. Chiasera, I. Kriegel, F. Scotognella, "Optical properties of periodic, quasi-periodic, and disordered one-dimensional photonic structures," Opt. Mater. 72, 403–421 (2017).

[20] M. Ghulinyan, "One-dimensional photonic quasicrystals," in Light Localisation and Lasing, M. Ghulinyan, L. Pavesi (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 2015, Ch. 5, pp. 99–119.

[21] L. Dal Negro, C.J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, P. Johnson, A. Lagendijk, R. Righini, M. Colocci, D.S. Wiersma, "Light transport through the band-edge states of Fibonacci quasicrystals," Phys. Rev. Lett. 90, 055501 (2003).

[22] A.G. Barriuso, J.J. Monzón, L.L. Sánchez-Soto, A. Felipe, "Comparing omnidirectional reflection from periodic and quasiperiodic one-dimensional

photonic crystals," Opt. Express 13(11), 3913 (2005).

[23] A.G. Barriuso, J.J. Monzón, T. Yonte, A. Felipe, L.L. Sánchez-Soto, "Omnidirectional reflection from generalized Fibonacci quasicrystals," Opt. Express 21(24), 30039–30053 (2013).

[24] A.N. Poddubny, E.L. Ivchenko, "Photonic quasicrystalline and aperiodic structures," Physica E 42, 1871–1895 (2010).

[25] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, 2008.

[26] Y. Fink, J.N. Winn, S. Fan, C. Chen, J. Michel, J.D. Joannopoulos, E.L. Thomas, "A dielectric omnidirectional reflector," Science 282, 1679–1682 (1998).

[27] J.N. Winn, Y. Fink, S. Fan, J.D. Joannopoulos, "Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal," Opt. Lett. 23, 1573–1575 (1998).

JMRPh. (11)(1): 107-117, Spring & Summer 2026

Study of the transmission spectrum of one-dimensional photonic crystals with quasi-periodic structures based on Fibonacci, Lucas, generalized Lucas, polynomial Fibonacci, and anti-Fibonacci sequences

[1] Malihe Nejati,

[1]* Physics Department, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran, postal code: 3716146611

Article details

Received:2026/09/09
Accepted:2026/11/23
Published: 2026/12/05

ISSN: 2588-4821
eSSN: 2588-493x

Correspondence email:
manejati61@gmail.com

DOI:
10.22034/jmrph.2026.137976.1005

Abstract

In this study, a photonic crystal with quasi-periodic structures based on various mathematical sequences—including Fibonacci, Lucas, generalized Lucas, polynomial Fibonacci, and anti-Fibonacci—is simulated. Using the Fibonacci structure as a reference, the transfer matrix method (TMM) is employed to investigate the effects of the refractive index of the dielectric layers, the number of wells, and the total length of the structure on the transmission spectrum. Subsequently, the transmission spectra of all the quasi-periodic structures are plotted and compared to determine how the specific ordering induced by each mathematical sequence can control the band gaps and transmission peaks. This comparative analysis is further extended to account for variations in the total length and the number of wells. Finally, we demonstrate that this photonic crystal configuration, based on different sequences, yields a tunable platform that provides distinct values for the omnidirectional band gaps.

Keywords: Quasiperiodic photonic crystal, transmission spectrum, photonic bandgap, Fibonacci sequences, Lucas, generalized Lucas, Fibonacci polynomial, anti-Fibonacci