

Research Paper

All-Optical Bistability in Photonic Crystal Slabs with Coupled Cavity-waveguide Structure¹

Taimaz Fathollahi Khalkhali²

Received: 2021.01.15

Revised:2021.04.03

Accepted:2021.04.23

Abstract

In this study, we consider a photonic crystal slab with a triangular lattice, which consists of air holes with a circular shape in a tellurium background on top of a Teflon substrate. In this structure, by enlarging the size of an air hole and infiltrating it with nonlinear polystyrene material we introduce a nonlinear cavity in the mentioned structures. Then, we optimize the geometrical parameters, using the finite-difference time-domain method, to obtain optimal parameters. The results reveal that the triangular lattice represents a nonlinear cavity with a large quality factor (3.6×10^4). The mentioned value is much greater than the reported values in similarly designed structures. Then, the designed high-quality cavity is placed between two waveguides symmetrically, and thus a coupled cavity-waveguide structure is created. These waveguides are used to couple light in and out of the cavity. Our investigation shows that by changing the structural parameters such as distance between the cavity and waveguides, the strong coupling between the cavity and waveguides is obtained. In the end, the optical bistability diagram of the structure corresponding to optimum parameters is presented. It is observed that the threshold power is significantly low in the designed structure. In the optical switching phenomenon, the threshold intensity and the response time of the nonlinear materials are very important. The response time of polymers is significantly shorter than that of semiconductors and due to the use of polymers instead of semiconductors in the current study, the obtained results represent some advantages compared with the previously published results.

Keywords: *Photonic Crystal Slabs, Photonic Crystal Cavities and Waveguides, Nonlinear Material, Finite-difference Time-domain Method.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.34757.1192

² Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. Email: tfathollahi@aeoi.org.ir taimazf@hotmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال یازدهم، پیاپی ۲۴، بهار ۱۴۰۰

مقاله پژوهشی

دوپایایی تمام‌نوری در بُره‌های بلور فوتونی با ساختار جفت‌شده کاواک-موجبر^۱

تایماز فتح‌الهی خلخالی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳

چکیده

در این تحقیق یک بُره بلور فوتونی با شبکه‌ی مثلثی شامل حفره‌های هوا در زمینه ماده ناهمسانگرد تلوریم بر زیرلایه‌ای از تفلون بررسی می‌شود. در این ساختار به منظور ایجاد یک کاواک غیر خطی، ابتدا اندازه یکی از حفره‌های هوا را تغییر می‌دهیم و درون آن را با ماده غیر خطی پلی‌استیرین پر می‌کنیم. در ادامه برای به دست آوردن بیشینه مقدار ضریب کیفیت کاواک، با استفاده از روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان، تمامی پارامترهای ساختاری بهینه شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد به ازای پارامترهای بهینه، این کاواک دارای ضریب کیفیت

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2021.34757.1192

^۲ استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

Email: tfathollahi@aeoi.org.ir , taimazf@hotmail.com

$10^4 \times 3.6$ است. سپس این کاواک به صورت متقارن بین دو موجبر قرار داده شد و یک دستگاه کاواک-موجبر ایجاد شد. نتایج نشان داد که می توان در ساختار فوق با تغییر دادن فاصله کاواک و موجبرها، جفت شدگی قوی بین کاواک و موجبرها به وجود آورد و در پایان نمودار دوپایایی نوری برای ساختار بهینه شده کاواک-موجبر محاسبه شد. از نتایج می توان دریافت که شدت آستانه کلیدزنی در این ساختار به شکل چشمگیری ناچیز است. در پدیده کلیدزنی نوری شدت آستانه و زمان واکنش ماده غیر خطی استفاده شده دارای اهمیت فراوان است. زمان واکنش پلیمرها نسبت به نیمرساناها به طور چشمگیری کمتر است و با توجه به این که در این تحقیق از ماده پلی استیرن استفاده شده است، در مقایسه با دستگاه های ساخته شده از ماده غیر خطی نیمرسانا دارای مزیت های بیشتری است.

واژگان کلیدی: بره های بلور فوتونی، کاواک ها و موجبرهای بلور فوتونی، مواد غیر خطی، روش تفاضل های متناهی حوزه زمان.

۱. مقدمه

بلورهای فوتونی آرایش منظمی از مواد با ضرایب شکست متفاوت هستند که به سه گروه عمده یک و دو و سه بعدی تقسیم می شوند [۱، ۲]. این بلورها در تشابه با نیمرساناها دارای یک ناحیه ممنوعه بسامدی هستند که امکان محبوس سازی نور را فراهم می کند [۳]. بلورهای فوتونی سه بعدی امکان محدودسازی نور در تمامی ابعاد فضایی را ممکن می نماید ولی ساخت این دسته از بلورهای فوتونی با فناوری امروز سخت و هزینه بر است. به همین دلیل، بره های بلور فوتونی به دلیل کاربردهای مشابه با بلورهای فوتونی سه بعدی و هم چنین امکان ساخت آسان با فناوری های کنونی مورد علاقه محققان قرار گرفته است [۴]. بره ها در دو بعد مشابه بلورهای فوتونی دو بعدی دارای تناوب هستند ولی در جهت عمود بر صفحه تناوب بلور، محدود شده اند. به این ترتیب این بلورها در صفحه تناوب مشابه بلورهای فوتونی دو بعدی دارای گاف بسامدی هستند و در بعد سوم نیز می توان از طریق انتخاب مناسب ضریب شکست لایه های پوششی، انتشار امواج الکترومغناطیسی را تنظیم کرد.

اگرچه تشابه زیادی بین نیمرساناها و بلورهای فوتونی وجود دارد، برخلاف الکترون ها، فوتون ها به سادگی قابل کنترل نیستند. این مسئله مانع از به کارگیری بلورهای فوتونی معمولی به عنوان اجزای فعال در تراشه های نوری و دستگاه های ارتباطی می شود. به همین دلیل محققین به دنبال یافتن روش هایی برای کنترل نور هستند. یکی از روش های پیشنهادی استفاده از مواد غیر خطی در بلورهای

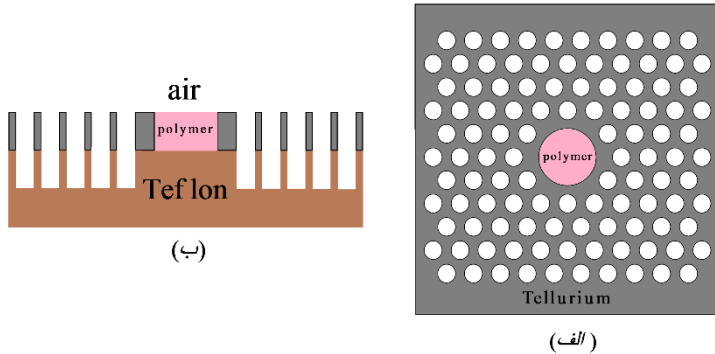
فوتونی می‌باشد [۵]. به این دسته از بلورها، بلورهای فوتونی غیرخطی گفته می‌شود. خواص این بلورها متناسب با شدت میدان الکترومغناطیسی اندرکنشی تغییر می‌کند. از متداول‌ترین مواد غیر خطی می‌توان به مواد غیر خطی کر، مانند نیمرساناها و شیشه‌ها و پلیمرها اشاره کرد [۶، ۷]. نیمرساناها در مقایسه با پلیمرها دارای ضریب شکست بیشتری هستند ولی ضریب غیر خطیت کر آنها نسبت به نیمرساناها کمتر است، هم‌چنین زمان واکنش آنها نسبت به نیمرساناها کوچک‌تر است، به همین دلیل امروزه محققین مطالعات فراوانی را بر روی این دسته از مواد انجام می‌دهند.

در تحقیق حاضر، کاواک‌های ساخته‌شده در بره‌های بلور فوتونی، پرشده از ماده غیر خطی پلی‌استیرن بررسی می‌شود. سپس سعی می‌کنیم با بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری تا حد امکان ضریب کیفیت را در این ساختارها بهینه کنیم. در ادامه، این کاواک را مستقیماً بین دو موجبر ورودی و خروجی قرار می‌دهیم. برای مشاهده کلیدزنی نوری مناسب در یک ساختار جفت‌شده کاواک-موجبر دو عامل بسیار با اهمیت است: ۱. ضریب کیفیت مطلوب و ۲. جفت‌شدگی قوی بین کاواک و موجبر. اگر میزان جفت‌شدگی کم باشد، موج الکترومغناطیسی نمی‌تواند با شدت کامل به درون کاواک نفوذ کند و اگر ضریب کیفیت کوچک باشد، اندرکنش نور با ماده ضعیف خواهد بود. بنابراین، در این تحقیق تلاش شده است که هم ضریب کیفیت و هم جفت‌شدگی کاواک با موجبر، به بهترین شکل ممکن بهینه‌سازی شود. در پایان، نمودار دوپایایی نوری برای ساختار بهینه محاسبه شود.

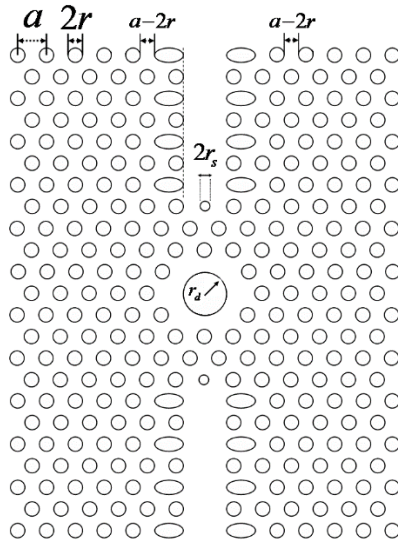
۲. ساختار مورد بررسی و روش محاسباتی

در این تحقیق بره بلور فوتونی با شبکه‌ی مثلثی ساخته‌شده از حفره‌های هوا در زمینه ماده ناهمسانگرد تلوریوم بر روی زیرلایه‌ای از نفلون $n_{\text{Teflon}} = 1.3$ در نظر گرفته شده است. برای ایجاد کاواک در این ساختار، شعاع یکی از حفره‌های هوا بزرگ‌تر از دیگر حفره‌ها در نظر گرفته شده است. سپس برای ایجاد کاواک غیر خطی، این حفره هوا که اندازه‌اش تغییر یافته است، از نوعی پلیمر با خاصیت غیر خطی کر به نام پلی‌استیرن پر می‌شود. راستای تناوب این بره در صفحه $X - Y$ است و در راستای محور Z ارتفاع آن محدود شده است. تلوریوم به عنوان یک بلور تک‌محوری مثبت شناخته می‌شود که دارای ضریب شکست عادی $n_o = 4.8$ و ضریب شکست غیر عادی $n_e = 6.2$ در محدوده طول موجی $4.5 - 6.25 \mu\text{m}$ است [۸، ۹]. در این تحقیق ضریب شکست ناهمسانگرد در راستای میله‌ها (محور Z) در نظر گرفته شده است. هم‌چنین پلی‌استیرن به عنوان ماده غیر خطی کر درون کاواک ریخته شده است و دارای ضریب شکست $n = 1.59$ در محدوده طول موجی $8 - 0.4 \mu\text{m}$ است. سرعت واکنش این ماده نسبت به میدان خارجی بسیار سریع است (در

حدود فمتو ثانیه). همچنین، ضریب غیرخطیت کر این ماده (cm^2/W) 1.65×10^{-12} است [۱۰]. در شکل ۱ طرحی از این کاواک در شبکه مثلثی رسم شده است. در این تحقیق برای انتقال نور به کاواک از دو موجبر به عنوان ورودی و خروجی استفاده می‌شود که به وسیله آن‌ها موج به درون کاواک منتقل می‌شود. در شکل ۲ ساختار جفت‌شده کاواک موجبر نشان داده شده است.



شکل ۱ کاواک متشکل از ماده غیر خطی پلی استیرن بر زیرلایه تفلون: الف. نگاه از بالا، ب. نگاه از کنار.



شکل ۲ نمایش طرح وار دستگاه کاواک-موجبر.

در تحلیل بلورهای فوتونی، روش‌های عددی متنوعی وجود دارد که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. در این تحقیق از روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان برای بررسی بلورهای فوتونی استفاده می‌شود. این روش بر پایه گسسته‌سازی فضا یا به عبارتی دیگر تعویض فضای پیوسته با مجموعه گسسته‌ای از نقاط استوار است. مشتقات در معادلات ماکسول با تفاضل‌های محدود

تعویض می‌شود که به دستگاهی از معادلات جبری در مختصات می‌انجامد. این دستگاه معادلات به طور ترتیبی با شروع از شرایط اولیه و مرزی و با حل معادلات ماکسول بر روی یک شبکه گسسته، توزیع میدان را به دست می‌دهد [۱۱]. در شبیه‌سازی‌های مربوط به محاسبه مد نقص و ضریب کیفیت مربوط به آن، از یک تپ گاوسی به عنوان منبع میدان استفاده شده است. این تپ به شکلی طراحی شده است که میدان مغناطیسی آن فقط در راستای محور Z دارای مؤلفه غیر صفر است و مؤلفه مغناطیسی میدان در صفحه $Y - X$ صفر است. اصطلاحاً به این نوع تپ، TE گفته می‌شود. لازم است ذکر کنیم که، به منظور افزایش دقت در محاسبات این منبع میدان در نقطه‌ای دارای کمترین تقارن درون کاواک قرار داده شده است تا امکان تحریک تمامی مدها وجود داشته باشد.

ضریب کیفیت در بُره‌های بلور فوتونی به دو بخش ضریب کیفیت در صفحه (در صفحه تناوب) $Q_{||}$ و ضریب کیفیت عمودی (عمود بر صفحه تناوب) Q_{\perp} تقسیم می‌شود که رابطه این دو با ضریب کیفیت کل کاواک عبارت است از:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{||}} + \frac{1}{Q_{\perp}}$$

ضریب کیفیت با طول عمر نور در کاواک متناسب بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Q = \frac{\omega \cdot E}{P} = -\frac{\omega \cdot E}{dE/dt}$$

که در آن، E انرژی ذخیره‌شده در کاواک و ω_{res} بسامد تشدید و P توان اتلاف است. می‌دانیم که افزایش لایه‌های تناوبی حفره‌های هوا در اطراف کاواک باعث افزایش $Q_{||}$ می‌شود، بنابراین اگر تعداد این لایه‌های تناوبی زیاد باشد $Q_{||}$ تقریباً بی‌نهایت خواهد شد. در نتیجه، ضریب کیفیت کل تقریباً برابر است با ضریب کیفیت عمودی یا به عبارت دیگر $Q \cong Q_{\perp}$. در نتیجه برای محاسبه ضریب کیفیت عمودی باید تعداد لایه‌های اطراف کاواک را افزایش داد تا ضریب کیفیت حاصل دقیقاً برابر با ضریب کیفیت عمودی کاواک باشد.

همان‌طور که بیان شد در این تحقیق از ماده غیر خطی $\chi^{(3)}$ استفاده شده است. ضریب شکست در حضور این نوع غیرخطیت می‌تواند به صورت زیر نمایش داده شود [۱۱]:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1)$$

در این رابطه، n_0 ضریب شکست خطی یا ضریب شکست میدان ضعیف است و $n_2 = \frac{3}{4n_0^2 \epsilon_0 c} \chi^{(3)}$ ثابت نوری جدیدی است که گاهی اوقات ضریب شکست مرتبه دوم نامیده می‌شود. رابطه (۱) نواخت افزایش ضریب شکست با افزایش شدت میدان را نشان می‌دهد، به

عبارت دیگر، شدت غیرخطیت نوری را مشخص می‌کند. کمیت $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 n_0 c E^2$ شدت موج فرودی است. برای محاسبه طیف عبوری در ساختارهای جفت‌شده کاواک موجبر یک تپ از طریق موجبر ورودی به درون کاواک منطبق شده است و در سوی دیگر آن با قرار دادن یک آشکار ساز در محیط شبیه‌سازی، طیف خروجی به دست می‌آید. در پایان این بخش ذکر می‌کنیم که به منظور استفاده از روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان و مطالعه بلورهای فوتونی به صورت نظری، به استفاده از برنامه‌نویسی و شبیه‌سازی رایانه‌ای نیاز خواهیم داشت. نرم‌افزارهای زیادی وجود دارند که بر مبنای روش تفاضل‌های متناهی طراحی شده‌اند. یکی از بهترین و پرکاربردترین این نرم‌افزارها MEEP^۳ است، که توسط محققین دانشگاه MIT طراحی شده است و در تحقیق کنونی از آن استفاده شده است [۱۲]. این نرم‌افزار بر روی سیستم عامل لینوکس نصب می‌شود و این قابلیت را دارد که ساختارهای متفاوتی را به وسیله آن طراحی کرد. با استفاده از این نرم‌افزار به آسانی می‌توان مواد غیر خطی، ناهمسانگرد، فلزی و بسیاری از ساختارهای متفاوت ساخته شده از این مواد را شبیه‌سازی کرد و نحوه انتشار امواج الکترومغناطیسی با بسامدهای متفاوت را به وسیله آن مشاهده کرد.

۳. نتایج و بحث

برای ایجاد کاواک غیر خطی در بُره بلورهای فوتونی شامل حفره‌های هوا در زمینه تلوریم بر روی زیرلایه تفلونی، ابتدا اندازه یکی از حفره‌های هوا را تغییر داده و این حفره تغییر یافته را با ماده غیر خطی پلی‌استیرن پر می‌کنیم. در ادامه با تغییر دادن پارامترهای ساختاری مانند شعاع حفره‌های هوا، شعاع کاواک و ارتفاع بُره، تلاش می‌کنیم که یک کاواک غیر خطی با ضریب کیفیت عالی ایجاد کنیم. بعد از طراحی کاواک غیر خطی، این کاواک را به صورت متقارن بین دو موجبر قرار می‌دهیم. یکی از این موجبرها به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود که به وسیله آن موج الکترومغناطیسی به درون کاواک منتقل می‌شود و موجبر دوم به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در این بخش با تغییر دادن فاصله بین کاواک و موجبر و سایر پارامترهای ساختاری دستگاه، میزان جفت‌شدگی کاواک با موجبرها مطالعه می‌شود. در نهایت، اثر تغییر مُد نقص بر اثر افزایش شدت میدان ورودی به منظور ایجاد کلیدزنی نوری بررسی می‌شود و نمودار دوپایایی نوری رسم می‌شود. این نتایج به ترتیب در سه بخش زیر جداگانه بررسی می‌شود.

^۳ MIT Electromagnetic Equation Propagation

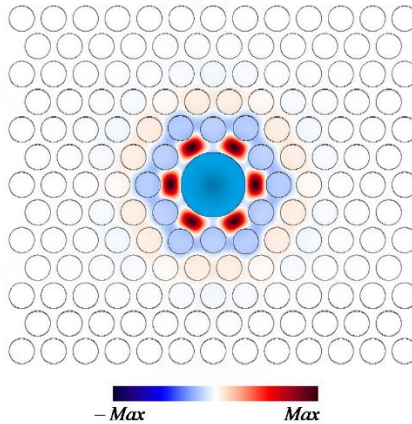
۱-۳ کاواک غیر خطی

در کاواک بره‌های بلور فوتونی، محبوس‌سازی نور در راستای عمود بر صفحه تناوب به روش بازتاب کلی داخلی صورت می‌پذیرد. بنابراین نوع ماده‌ای که به عنوان زیرلایه و لایه پوششی انتخاب می‌شود، تأثیر شدیدی در ضریب کیفیت عمودی دارد. در این بخش فرض می‌کنیم که بُره بلور فوتونی طراحی شده بر روی زیرلایه‌ای از تفلون قرار دارد و به ازای تمامی مقادیر ممکن پارامترهای ساختاری (r : شعاع حفره‌های هوا، h : ارتفاع بُره، r_d : شعاع کاواک) بسامد مُد نقص و ضریب کیفیت متناظر مطالعه می‌شود. نتایج محاسبات عددی نشان می‌دهد که، هنگامی که ارتفاع بُره (h) در محدوده $0.80a - 1.2a$ قرار دارد (a ثابت شبکه بلور است)، کاواک تک‌مد است و ضریب کیفیت متناظر با بسامد مُد نقص تقریباً مقداری بزرگ است. جدول (۱) نحوه تغییرات بسامد مُد نقص و ضریب کیفیت متناظر را بر حسب تغییر اندازه شعاع کاواک نشان می‌دهد. در محاسبات مربوط به این جدول، شعاع حفره‌های هوا $r = 0.34a$ و ارتفاع بُره $h = 1.0a$ است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که ضریب کیفیت در این ساختار به شدت وابسته به اندازه شعاع کاواک است و تغییرات کوچک در r_d باعث تغییرات زیادی در ضریب کیفیت کاواک می‌شود.

جدول ۱ نتایج عددی مربوط به مُد نقص و ضریب کیفیت عمودی Q_v برای $r = 0.34a$ و $h = 1a$

شعاع کاواک (r_d)	بسامد مُد نقص (ω_{res})	ضریب کیفیت عمودی (Q_v)
$0.95a$	$0.2011(2\pi c/a)$	$Q_v = 8.4 \times 10^3$
$1.0a$	$0.2077(2\pi c/a)$	$Q_v = 1.5 \times 10^4$
$1.05a$	$0.2152(2\pi c/a)$	$Q_v = 3.3 \times 10^4$
$1.10a$	$0.2238(2\pi c/a)$	$Q_v = 5.7 \times 10^3$

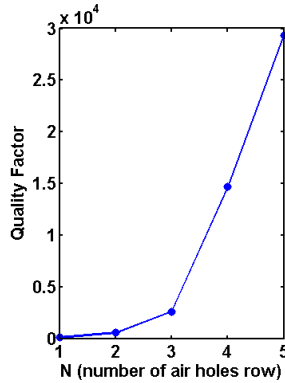
بعد از بررسی تمامی حالت‌های ممکن، محاسبات عددی نشان می‌دهد که بیشترین ضریب کیفیت در این ساختار برابر است با: $Q_v = 3.3 \times 10^4$ (جدول ۱). این ضریب کیفیت به ازای پارامترهای بهینه $r = 0.34a$ و $h = 1.0a$ و $r_d = 0.38a$ به دست آمده است. ضریب کیفیت به دست آمده در این ساختار حدود پنج برابر کاواک‌هایی است که تا به امروز با استفاده از پلیمر در بُره‌های بلور فوتونی ساخته شده است [۱۳، ۱۴]. نحوه توزیع میدان مغناطیسی در این کاواک به ازای پارامترهای بهینه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می‌بینید، میدان مغناطیسی شدیداً در درون کاواک و اطراف کاواک توزیع شده است.



شکل ۳ نحوه توزیع میدان مغناطیسی در کاواک شامل ماده غیر خطی پلی استیرن.

۲-۳ دستگاه جفت شده کاواک-موجبر

در این ساختار به ازای پارامترهای بهینه $r = 0.34a$ و $h = 1.0a$ و $ra = 1.05a$ ضریب کیفیت عمودی کاواک و بسامد مُد نقص متناظر با آن به ترتیب برابرند با: $Q_v = 3.3 \times 10^4$. در ادامه این کاواک را مطابق شکل ۲، به طور کاملاً متقارن بین دو موجبر طراحی شده قرار می دهیم. در اولین گام اثر تعداد لایه های تناوبی کامل حفره های هوا (N) بین کاواک و موجبر را مطالعه می کنیم. در این مرحله ضریب کیفیت کل کاواک را برای حالتی بررسی می کنیم که تعداد لایه های تناوبی حفره های بین کاواک و موجبر از یک تا پنج لایه تغییر می کند. شکل ۴ نحوه تغییرات ضریب کیفیت را بر حسب تعداد لایه های کامل حفره های هوا بین کاواک و موجبرها نشان می دهد. همان طور که از این شکل می توان در یافت، هنگامی که کاواک و موجبر به هم نزدیک هستند، ضریب کیفیت بسیار کوچک است و هنگامی که این فاصله زیاد باشد، ضریب کیفیت بیشتر می شود ولی با بیشتر شدن ضریب کیفیت میزان نور عبوری کم خواهد بود در نتیجه با توجه به مقادیر نشان داده شده، تعداد سه لایه کامل از حفره های هوا ($N = 3$) را به عنوان پارامتر بهینه انتخاب می کنیم.



شکل ۴ نحوه تغییرات ضریب کیفیت بر حسب تعداد لایه‌های حفره‌های هوا بین کاواک و موجرها.

به منظور افزایش کنترل بر نحوه تغییرات ضریب کیفیت و نور عبوری، فرض می‌کنیم که اندازه حفره واقع در انتهای موجبر ورودی و ابتدای موجبر خروجی را می‌توان تغییر داد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شعاع این حفره با r_s نشان داده می‌شود. جدول ۲ نحوه تغییرات ضریب کیفیت کل و درصد نور عبوری را بر حسب تغییرات r_s نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که، به ازای r_s بزرگ‌تر از $0.30a$ درصد نور عبوری به زیر 50% کاهش می‌یابد.

جدول ۲ نتایج عددی مربوط به ضریب کیفیت کل و درصد نور عبوری بر حسب تغییرات r_s .

r_s	ضریب کیفیت کل Q	درصد نور عبوری (%)
$0.24a$	۱۱۳۱	۶۷٪
$0.26a$	۱۳۰۳	۶۱٪
$0.28a$	۱۶۰۵	۵۷٪
$0.30a$	۱۹۲۳	۵۳٪
$0.32a$	۲۲۲۸	۴۹٪
$0.34a$	۲۶۰۰	۴۳٪

۳-۳ کلیدزنی و دوپایایی نوری

در این قسمت، تغییرات مُد نقص را بر اثر افزایش شدت نور ورودی بررسی می‌کنیم. ابتدا باید شدت نور ورودی را اندکی افزایش داد و بسامد مُد نقص را با بررسی طیف نور عبوری از دستگاه کاواک-موجبر به دست آورد. در مرحله بعدی، شدت نور عبوری را بیشتر افزایش داد و مراحل فوق را تکرار می‌کنیم تا جایی که در شدت آستانه مشاهده می‌شود که بسامد مُد نقص جابه‌جا

شده است. حال در دستگاه کاواک-موجبر با پارامترهای ساختاری $r = 0.34a$ و $h = 1.0a$ و $r_d = 1.05a$ (پارامترهای بهینه) این روش را به منظور بررسی میزان تغییرات بسامد نقص اجرا می‌کنیم. در این حالت به ازای یک مقدار مشخص از r_s کمترین شدت لازم برای جابه‌جایی بسامد مُد نقص را به دست می‌آوریم و همین مراحل را برای مقادیر دیگری از r_s تکرار می‌کنیم. نتایج بهینه به ازای شدت ورودی $I_{in} = 133 \left(\frac{\text{mW}}{\text{nm}^2} \right)$ در جدول ۳ به طور خلاصه بیان شده است.

جدول ۳ تغییرات بسامد مُد نقص کاواک در دستگاه کاواک-موجبر به ازای $I_{in} = 133 \left(\frac{\text{mW}}{\text{nm}^2} \right)$ ، بر حسب

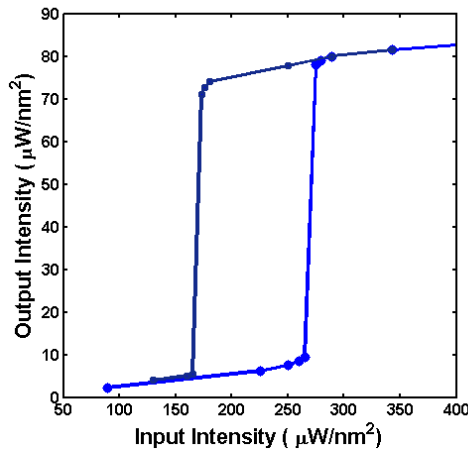
تغییرات r_s .

r_s	در صد نور عبوری	ضریب کیفیت ساختار	بسامد مُد نقص W	تغییرات بسامد مُد نقص $(\omega_+ - \omega_-)$
$0.26a$	۶۱٪	۱۳۰۳	$0.21493(2\pi c/a)$	$0.00027(2\pi c/a)$
$0.28a$	۵۷٪	۱۶۰۵	$0.21465(2\pi c/a)$	$0.00055(2\pi c/a)$
$0.30a$	۵۳٪	۱۹۲۳	$0.21471(2\pi c/a)$	$0.00049(2\pi c/a)$

از این جدول می‌توان در یافت که بیشترین مقدار جابه‌جایی بسامد مُد نقص کاواک هم به میزان نور عبوری و هم به ضریب کیفیت متناظر با بسامد مُد نقص وابسته است. در صورتی که درصد نور عبوری بسیار زیاد باشد، ضریب کیفیت کاهش یافته، در نتیجه میزان اندرکنش نور با ماده کم می‌شود. در صورتی که درصد نور عبوری بسیار کم باشد، ضریب کیفیت بیشتر خواهد بود، ولی میزان نوری که به درون کاواک نفوذ می‌کند کم خواهد بود. از این مطالب می‌توان در یافت که برای بیشترین مقدار جابه‌جایی بسامد مُد نقص باید حالتی در نظر گرفته شود که نسبتاً دارای ضریب کیفیت خوب و همچنین درصد نور عبوری زیادی باشد. بنابراین با توجه به نتایج جدول ۳ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حالت بهینه متناظر با $r_s = 0.28a$ خواهد بود.

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی بیان شد بیشترین ضریب کیفیت عمودی به ازای پارامترهای بهینه $r = 0.34a$ و $h = 1.0a$ و $r_d = 1.05a$ و بسامد مُد نقص $0.2152(2\pi c/a)$ قابل حصول است. با توجه به جدول ۳ می‌توان در یافت که بیشترین میزان جابه‌جایی مُد نقص در این حالت به ازای $r_s = 0.28a$ مشاهده می‌شود. حال در این مرحله برای این ساختار بهینه‌شده نمودار دوپایایی نوری راسم می‌کنیم. به منظور محاسبه شاخه پایینی نمودار دوپایایی از یک تپ سینوسی (تک‌بسامد) و پیوسته استفاده می‌کنیم. بسامد این تپ را $0.21482(2\pi c/a)$ در نظر می‌گیریم. سپس به ازای یک شدت مشخص از این تپ (تپ ورودی) شدت تپ خروجی را محاسبه می‌کنیم.

در مرحله بعد بدون تغییر بسامد تپ ورودی، شدت آن را اندکی افزایش داده و شدت تپ خروجی را محاسبه می‌کنیم. این محاسبات را با افزایش تدریجی شدت ورودی تکرار کرده و در هر مرحله شدت خروجی رو محاسبه می‌نماییم. حال با رسم شدت نور ورودی بر حسب خروجی مشاهده می‌کنیم که با افزایش شدت ورودی، اندازه شدت خروجی به شکلی آهسته و به صورت خطی افزایش یافته است تا اینکه در یک شدت مشخص مشاهده می‌شود که شدت نور خروجی به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۵). در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود کلیدزنی نوری رخ داده است. به منظور محاسبه مسیر بازگشت در منحنی دوپایایی نوری از ترکیب یک موج سینوسی و یک تپ گاوسی استفاده می‌کنیم. در این قسمت شدت موج گاوسی بسیار بیشتر از شدت تپ سینوسی انتخاب می‌شود. در این حالت برخلاف قسمت قبل، از نور پر شدت شروع کرده و شدت تپ سینوسی را آرام آرام و کاهش می‌دهیم و در هر مرحله شدت نور خروجی را محاسبه می‌کنیم. یادآوری می‌کنیم که در تمامی این مراحل شدت تپ گاوسی بیشتر از شدت تپ سینوسی است. از شکل ۵ می‌توان در یافت که در این ساختار، شدت آستانه در کلیدزنی نوری $270 \left(\frac{\text{mW}}{\text{nm}^2}\right)$ است. این مقدار قابل مقایسه با شدت آستانه جهت کلیدزنی نوری در نیم‌رساناهاست [۱۵-۱۸].



شکل ۵ نمودار دوپایایی نوری در دستگاه جفت‌شده کاواک‌موجبر.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق یک ساختار مثلثی از بره‌های بلور فوتونی شامل حفره‌های هوا در زمینه تلوریم بر روی زیرلایه تفلون بررسی شد. اندازه یکی از حفره‌های هوا را در ساختار فوق تغییر دادیم. سپس این حفره تغییر اندازه یافته را از ماده غیر خطی پلی‌استیرن پر کردیم. نتایج محاسبات عددی بر پایه روش

تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان نشان می‌دهد که در ساختارهای مذکور امکان ایجاد کاواک با ضریب کیفیت بیشتر در مقایسه با سایر کاواک‌های ساخته‌شده از پلی‌استیرن وجود دارد. این نتایج بیان می‌کند که در شبکه‌ی مثلثی شامل حفره‌های هوا در زمینه تلوریوم بر روی زیرلایه‌ای از تفلون، ضریب کیفیت کاواک غیر خطی تشکیل شده از ماده پلی‌استیرن به ازای پارامترهای بهینه، برابر است با $10^4 \times 3.6$ که حدود بیست برابر کاواک‌هایی است که تا به امروز از ماده پلی‌استیرن در بره‌های بلور فوتونی ساخته شده است [۱۴، ۱۹]. اختلاف ضریب شکست کاواک با زیرلایه و لایه پوششی نقش مؤثری در ضریب کیفیت عمودی (Q_v) کاواک‌ها دارد. ضریب شکست پلی‌استیرن در مقایسه با نیمرساناها کمتر است که باعث کاهش ضریب کیفیت عمودی کاواک‌های ساخته‌شده از پلیمرها در مقایسه با نیمرساناها می‌شود ولی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ضریب کیفیت درخور توجه است. در ادامه، این کاواک را به صورت متقارن بین دو موجبر قرار دادیم. یکی از این موجبرها به عنوان ورودی در نظر گرفته شد که به وسیله آن موج الکترومغناطیسی به درون کاواک منتقل می‌شد و موجبر دوم به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شد. در این بخش با تغییر دادن فاصله بین کاواک و موجبر میزان جفت‌شدگی کاواک با موجبرها مطالعه شد. نتایج نشان داد که به ازای پارامترهای بهینه، جفت‌شدگی قوی بین کاواک غیر خطی با موجبرها وجود دارد.

در آخرین مرحله، کلیدزنی نوری در ساختارهای طراحی شده بررسی شد. با افزایش شدت نور ورودی، میزان جابه‌جایی بسامد مد نقص کاواک غیر خطی مطالعه شد و در نهایت نمودار دوپایایی نوری برای ساختار بهینه شده محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت آستانه نور ورودی برای مشاهده کلیدزنی نوری به ازای پارامترهای بهینه $270 \left(\frac{\text{mW}}{\text{nm}^2}\right)$ است، که به طرز چشمگیری کم است. پلیمرها در مقایسه با نیمرساناها دارای زمان واکنش بسیار کمتری هستند ولی به دلیل ضریب کیفیت ناچیز، کاواک‌های ساخته‌شده از آن‌ها، اندرکنش نور با ماده در آن‌ها ضعیف‌تر و در نتیجه شدت آستانه لازم جهت کلیدزنی نوری در آنها بیشتر است. ولی نتایج محاسبات نشان می‌دهد شدت آستانه به‌دست آمده در این تحقیق با ساختارهای ساخته‌شده از نیمرساناها قیاس‌پذیر است [۱۶-۱۸، ۲۰].

۵. تقدیر و تشکر

نگارنده بر خود لازم می‌داند از آقای دکتر بهروز رضایی عضو هیات علمی دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز به خاطر راهنمایی‌ها و حمایت‌های فکری جهت انجام این پژوهش تشکر نماید.

منابع

- [1] Yablonovitch. E, Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58. 2059-2062. 1987.
- [2] John. S, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 58. 2486-2489. 1987.
- [3] Anderson. C.M., Giapis. K.P, Larger Two-Dimensional Photonic Band Gaps, *Phys. Rev. Lett.* 77. 2949-2952.1996.
- [4] Johnson S. G., Fan. S., Villeneuve. P. R., Joannopoulos. J. D., Kolodziejski. A., Guided modes in photonic crystal slabs, *Phys. Rev. B.* 60. 5751-5758.1999.
- [5] Bravo-Abad. J., Rodriguez. A., Bermel. P., Johnson. S. G., Joannopoulos. J. D., Soljacic. M., Enhanced nonlinear optics in photonic-crystal microcavities, *Opt Express.* 15 16161-16176.2007.
- [6] Melnichuk. M., Wood. L. T., Direct Kerr electro-optic effect in noncentrosymmetric materials, *Phys. Rev. A.* 82. 013821-9.2010.
- [7] Wang Y., Abe. Y., Matsuura. Y., Miyagi. M., Uyama. H., Refractive indices and extinction coefficients of polymers for the mid-infrared region, *Appl. optics* 37. 7091-7095 (1998).
- [8] Rezaei. B., Fathollahi Khalkhali. T., Soltani Vala. A., Kalafi. M., Absolute band gap properties in two-dimensional photonic crystals composed of air rings in anisotropic tellurium background, *Optics Commun.* 282. 2861-2869.2009.
- [9] Fathollahi-Khalkhali. T., Bananej. A., Tunable complete photonic band gap in anisotropic photonic crystal slabs with non-circular air holes using liquid crystals, *Optics Commun.* 369. 79-83.2016.
- [10] Liang. C. Y., Krimm. S., Infrared Spectra of High Polymers. VI. Polystyren, *Journal of Polymer Science.* XXVII. 241-254.1958.
- [11] Ftahollahi-Khalkhali, T., Shiri, R., Shahrokhbabadi, H., Bananej. A., Complete photonic band gap characteristics of two-dimensional Kerr nonlinear plasma photonic crystals, *Indian J Phys.* 93. 1537-1544.2019.
- [12] Oskooi A. F., Roundy D., Ibanescu. M., Bermel. P., Joannopoulos. J. D., Johnson. S. G., MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Comput Phys. Commun.* 181. 687-702.2010.
- [13] Hu. X., Gong. Q., Liu. Y., Cheng. B., Zhang. D., All-optical switching of defect mode in two-dimensional nonlinear organic photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.* 87. 231111-3.2005.
- [14] Qin. F., Meng. Z.M., Li. Z.Y., Design of all-optical switching component based on pillar-array hybrid nonlinear photonic crystal cavity, *J. Opt. Soc. Am. B* 29. 2314-2319.2012.
- [15] Almeida. V.R., Lipson. M., Optical bistability on a silicon chip, *Opt. Lett.* 29. 2387-2389.2004.
- [16] Notomi. M., Shinya. A., Mitsugi. S., Kira. G., Kuramochi. E., Tanabe. T., Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities, *Opt Express* 13. 2678-2687.2005.
- [17] Barclay. P.E., Srinivasan. K., Painter. O., Nonlinear response of silicon photonic crystal microresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper, *Opt Express* 13 801-820.2005.
- [18] Tripathy. S.K., Hota. M., Panigrahi. T., A Model for Optical Bistability in a Hybrid Semiconductor Photonic Crystal Structure, *IEEE. Photon. Technol. Lett.* 21. 772-774.2009.
- [19] Paghousi. R., Fasihi. K., High-contrast controllable switching based on polystyrene nonlinear cavities in 2D hole-type photonic crystals. *Optics Commun.* 415. 101-106.2018.
- [20] Yang. D., Wang. C., Yuan. W., Wang. B., Yang. Y., Ji. Y., Silicon on-chip side-coupled high-Q microcavities for the multiplexing of high sensitivity photonic crystal integrated sensors array, *Optics Commun.* 374. 1-7. 2016.