

ساخت آینه در بلورهای فوتونی دو بعدی

زهرة درانی^۱، محمدعلی منصورى بیرجندى^۲

^۱مری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه پیام نور، بیرجند، ایران

^۲استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰، تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۵/۱۷)

چکیده

در این مقاله آرایه‌ای متناوب مثلثی شکل از بلورهای فوتونی دو بعدی در صفحه‌ی X-Z ایجاد شده است. در این ساختار میله‌های شش ضلعی سیلیکونی در زمینه هوا قرار دارند. با قرار دادن یک منبع نور گوسی در سمت چپ و مرکز ساختار میزان انتشار و انعکاس در اطراف بلور فوتونی به دست آمد. روش تفاضل متناهی حوزه زمان (FDTD) جهت شبیه‌سازی استفاده شده است که از جمله روش‌های عددی است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بلور فوتونی در محدوده‌ی بسامد نرمالیزه شده، انعکاس کامل دارد. در مطالعه حاضر، انعکاسات در باند توقف ساختار اتفاق می‌افتد. چون انعکاسات یک بازه را شامل می‌شود بهترین بسامد را با استفاده از شبیه‌سازی FDTD به دست می‌آوریم. بنابراین این ساختار را می‌توان یک آینه کامل نامید. این بلور متناوب با انعکاس تمام نورتابیده شده در سمت چپ ساختار، قابلیت استفاده به عنوان آینه نوری را دارد. آینه‌های نوری می‌توانند فوتون را در فضای مورنظر محدود کرده و با طراحی مناسب، مسیر حرکت نور را دلخواهانه تعیین کنند. تعیین مسیر دلخواه نور منجر به ایجاد کاواک و موجبر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آینه کامل، بلور فوتونی دو بعدی، روش تفاضل متناهی حوزه زمان، فوتون.

Mirror in Two Dimensional Photonic Crystals

Zohre, Dorrani¹; Mohammad Ali, Mansouri Birjandi²

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Payam Noor University, Birjand, Iran.

²Department of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

In this paper a structure of aperiodic array of two-dimensional photonic crystals plated consisting in x-z page. In this structure hexagon silicon rod placed in a background of air. By placing a Gaussian light source, was observed reflection and publish of waves in the photonic crystal. The Finite Difference time domain method used for simulation that the used method is one of numeral methods. We found that this structure is total reflector in normalized frequency ranges. In the current study these reflects evidence in band gap. Because of band gap included of one frequency ranges, and were quired to an optimum point of frequency, therefore this point was obtained by FDTD simulation. This structure is called a perfect mirror. The mirror reflected them ost light on the left side and the small values of waves published in right side. The mirrors stinted photon in particular space and therefore with suitable designer we can determined path of transmission of light. These properties produced cavity and waveguide for light circuits.

Keywords: Total Mirror, Two Dimensional Photonic Crystal, FDTD Method, Photon.

۲- روش‌های تحلیل بلورهای فوتونی

با استفاده از معادلات ماکسول یا معادله هلمهولتز به کمک روش‌های تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی می‌توان بلورهای فوتونی را تحلیل کرد. حل معادلات ماکسول به روش تحلیلی تنها در حالات خاصی برای توزیع ضریب شکست دلخواه امکان‌پذیر است. در تحلیل به کمک روش نیمه تحلیلی، فرمولاسیون کاملاً تحلیلی و مرحله‌شبه‌سازی عددی است. بنابراین این روش نیز محدودیت‌های روش تحلیلی را دارد. هر کدام از روش‌های عددی در الکترومغناطیس برای حل مساله توانایی ویژه‌ای دارند به نحوی که هر یک از آنها برای حل یک مساله خاص بر دیگری برتری دارد.

یکی از موارد مطالعه بلورهای فوتونی محاسبه ساختار باند است. این مساله تعیین یک مقدار ویژه است که بهینه‌ترین و مناسب‌ترین روش محاسبه، روش حوزه فرکانس مانند روش PWE^2 و FEM^3 است. بهترین روش تحلیل مودال حفره‌ها و موجبرها، روش حوزه فرکانس و محاسبه انعکاس و انتقال در خم‌ها و موجبرها، به کمک روش عددی حوزه زمان مناسب‌تر است.

روش تفاضل متناهی حوزه زمان (FDTD) یک روش تحلیل در حوزه زمان است و بهترین روش در تحلیل بلورهای فوتونی است. در این روش ساختار به شبکه‌ای مربعی تقسیم شده و تقریب پله‌ای برای پارامترهای محیط در نظر گرفته می‌شود. میدان‌های مغناطیسی گسسته‌سازی شده، معادلات ماکسول با تقریب تفاضلی جایگزین و سپس میدان‌ها در طول زمان محاسبه می‌شود.

مولفه‌های میدان گسسته‌سازی شده طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F^n(i, j, k) \quad (1)$$

پیشرفت روز افزون تکنولوژی ساخت قطعات الکترونیکی کوچک و کوچک‌تر تا به آنجا ادامه یافته است که امروزه پیش‌بینی می‌شود دیگر نتوان قطعاتی از این کوچک‌تر ساخت که قادر به عبور جریان الکتروسیسته باشند. به‌گونه‌ای که در آنها عبور یک الکترون برابر برقراری جریان و عدم عبور آن یعنی قطع جریان الکترونیکی [۱-۳] است. این امر باعث شده است تا دانشمندان به فکر جایگزینی برای الکترون باشند و در اولین گزینه فوتونی عنی کوانتای نور را جایگزینی مناسب یافتند. فوتونیک علمی است که به علمو فناوری‌های مربوط به نور و فوتون می‌پردازد [۳].

بلورهای فوتونی موادی مصنوعی هستند که خواص اپتیکی آن‌ها از قبیل ضریب شکست و ضریب نفوذپذیری الکترونیکی در یک جهت متناوباً تغییر می‌کند و در جهات دیگر ثابت است. در این ساختارها تغییرات متناوب ضریب شکست، ممانعت از انتشار امواج الکترومغناطیسی در بازه‌ای از فرکانس‌ها موسوم به باند توقف را در پی دارد [۴-۷].

بلورهای فوتونی معمولاً با آرایش مربعی یا مثلثی بوده و در برخی موارد شبکه‌های گرافیتی نیز مشاهده شده است. به دلیل محدودیت‌های فناوری در ساخت، سلول‌های شبکه به صورت دایره یا بیضی است. این سلول‌ها متناوباً تکرار می‌شوند و در پس زمینه‌ای از ماده دیگر قرار دارند [۳]. معمولاً به صورت ستون‌های دی‌الکتریک در هوا و یا سوراخ‌های هوا در دی‌الکتریک چیده می‌شوند. زمانی که تکرار در یک بعد باشد، بلور یک بعدی و زمانی که ساختار متناوب در دو و سه بعد تکرار می‌شود، بلور فوتونی دو و سه بعدی را بوجود می‌آورد. وجود باند توقف در این ساختارها باعث شده امواج الکترومغناطیسی با بسامدهای معینی نتوانند در آن انتشار یابند [۸-۱۰].

در این مقاله می‌خواهیم با روش شبیه‌سازی ناحیه باند توفقرا یافته و با استفاده از FDTD نشان دهیم که در این بازه آینه کامل می‌توان ایجاد کرد. با ایجاد نقص در بلور فوتونی ساخت موجبر و کاواک امکان‌پذیر می‌باشد.

²Plane wave expansion

³ Finite element method

۳- طراحی بلور فوتونی

پارامترهای هندسی ساختار بلور فوتونی ثابت شبکه (a) یا همان فاصله‌ی بین دو شعاع شعاع دواپس (r) است. براساس خصوصیات مقیاس‌بندی معادلات ماکسول، با تغییر ابعاد ساختار به یک نسبت، خصوصیات ساختار اولیه در طول موج‌هایی که با همان نسبت تغییر کرده‌اند، در ساختار جدید مشاهده می‌شود. بنابراین در بلورهای فوتونی نسبت شعاع به ثابت شبکه، تمام خصوصیات هندسی شبکه را بیان می‌کند.

آرایه‌ای متناوب مثلثی شکلی از میله‌های شش ضلعی از بلورهای فوتونی دو بعدی را در این مقاله بکار گرفتیم.

بلورهای فوتونی دو بعدی در جهت متناوب است. بردار بلاخ به صورت زیر است.

$$k = k_y \hat{y} + k_z \hat{z} \quad (5)$$

شش ضلعی‌ها از سیلیکن ساخته شده که در زمینه هوا گرفته است. ضریب شکست موثر این دو ماده را از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه ۶ ضریب شکست میله‌ها $n = \sqrt{11.4}$ و ضریب شکست $n = \sqrt{1}$ برای محیط زمینه است.

فاصله بین دو راس متقابل هر شش ضلعی $r = 0.4a$ است.

ساختار بلور فوتونی ۹ لایه در جهت x و ۲۸ لایه در جهت z دارد.

محاسبه ساختار باند با استفاده از روش FDTD کند است، بنابراین این محاسبات به کمک روش PWE انجام می‌شود. در تحلیل بلورهای فوتونی دو بعدی، هنگامی که انتشار خارج از صفحه نباشد، پلاریزاسیون TE و TM مستقل از یکدیگر قابل مطالعه است. برای محاسبه ساختار باندهای بلور فوتونی، شبکه محاسباتی شامل یک تناوب بوده که شرط مرزی بلاخ با بردار

F هر یک از شش مولفه میدان‌های مغناطیسی است، Δx ، Δy و Δz به ترتیب اندازه مش‌ها در جهت x ، y و z است. Δt پله زمانی محاسبات است.

پایداری عددی و شرایط آن مهمترین ویژگی هر روش عددی است. FDTD چون از یک نسخه تفاضلی استفاده می‌کند بصورت شرطی پایدار است. پایداری FDTD با شرط زیر برقرار است.

$$0 \leq \Delta t \leq \frac{1}{c} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2)$$

که c سرعت نور در خلا است. این شرط بیان می‌کند که سرعت فاز عددی نباید از سرعت نور بیشتر باشد.

اما یکی از اشکالات روش FDTD مساله محدود کردن پنجره محاسباتی است. از آنجا که روش‌های عددی در یک فضای متناهی مساله را حل می‌کنند، پنجره محاسباتی ساختار باید محدود شود. بنابراین مدل عددی PML^۴ غیر همسانگرد ارائه شده است، که برترین روش در محدودسازی پنجره محاسباتی است. از آنجایی که PML یک ماده غیرهمسانگرد است امواج در آن توسط معادلات زیر بیان می‌شوند.

$$\nabla \times E = -j\omega \mu H \quad (3)$$

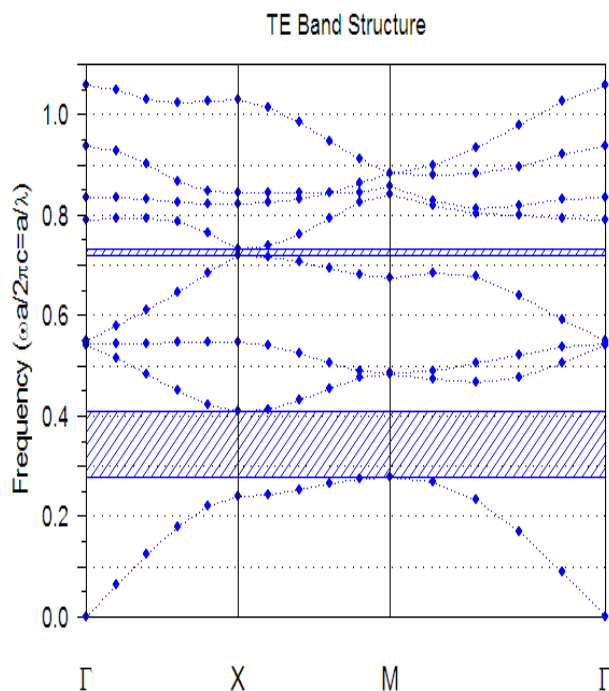
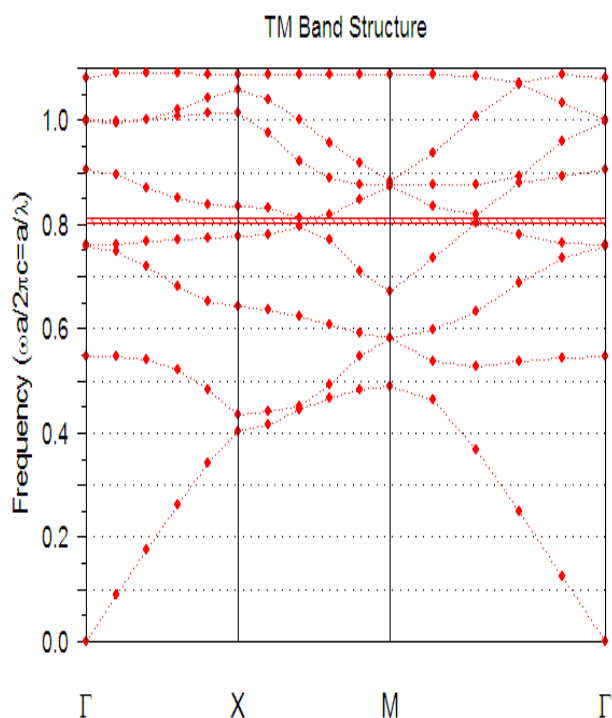
$$\nabla \times H = j\omega \epsilon E \quad (4)$$

با توجه به ویژگی‌های PML می‌توان شرایطی را به کار برد که میزان انعکاسات به حداقل برسد.

طبق مطالب بیان شده در بالا FDTD ذاتاً برای حل مسائل پراکندگی و انتشار امواج در حوزه زمان مناسب است.

در این روش با تکنیک‌های مشخصی می‌توان از تحلیل مودال بلورهای فوتونی، حفره‌ها و موجبرها نیز بهره برد.

⁴ Perfectly Matched Layer



شکل ۲- ساختار باندها برای آرایش بلور فوتونی در پلاریزاسیون TM

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مود TE دارای باندها توقف در محدوده‌ی بسامد نرمالیزه ۰٫۲۴ تا ۰٫۴۱ و نیز در محدوده‌ی ۰٫۷۲ تا ۰٫۷۳ است. در مود TM شکاف باندها در محدوده‌ی کوچک بین ۰٫۸۰۴ تا ۰٫۸۰۷ است.

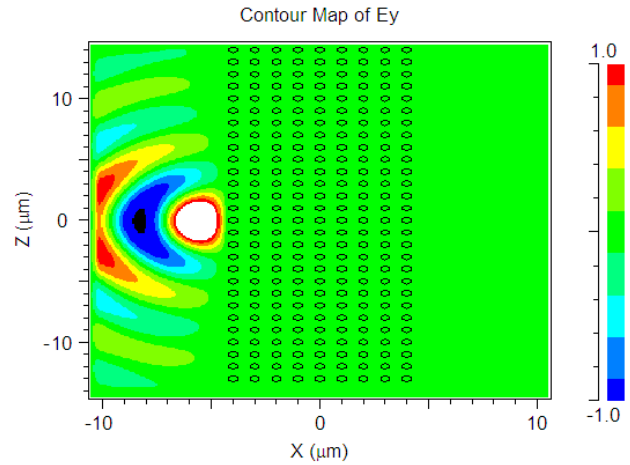
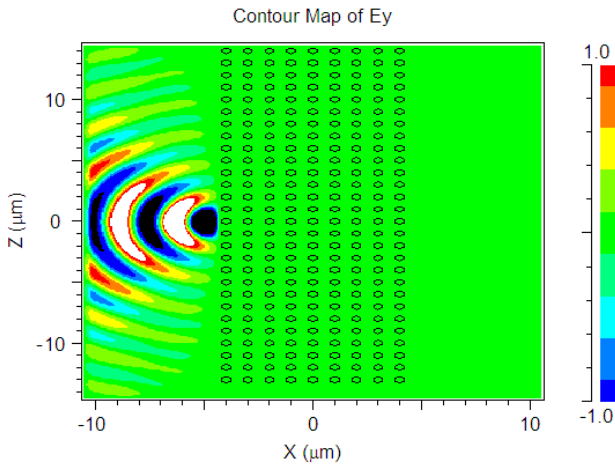
شکل ۱- ساختار باندها برای آرایش بلور فوتونی در پلاریزاسیون TE
 بلاخ به مرزهای آن اعمال می‌شود. در ابتدا یک میدان در شبکه قرار داده می‌شود و سپس میدان محاسبه شده و یکی از مولفه‌های میدان در یک سلول شبکه محاسباتی ضبط می‌شود. در انتها، با تشخیص قله‌هایی که در تبدیل فوریه میدان ضبط شده وجود دارد، بسامدهای ویژه مربوط به بردار بلاخ محاسبه می‌شود. این عمل برای بردارهای بلاخ موجود محاسبه می‌شود.

۴- نتایج

پس از انجام شبیه‌سازی PWE و تعیین محدوده بسامد نرمالیزه شده، شبیه‌سازی FDTD را بکار می‌گیریم. در تحلیل مسائل پراکندگی و انتشار امواج، یک موج الکترومغناطیسی باید از یک منبع تابیده شود و الگوریتم FDTD پراکندگی و انتشار را در ساختار محاسبه کند. یکی از منابع، منبع دو نقطه‌ای است که در این نوع منبع، یک نقطه ثابت از شبکه FDTD شکل مشخصی مانند سینوسی یا کوسینوسی در طول زمان تابش می‌کند. با استفاده از این نوع منبع فرکانس ارتعاش حفره‌ها، مودهای حفره‌ها و گسیل خود به خودی در میکرو حفره‌های نوری قابل مطالعه است.

در این ساختار یک منبع نور گوسی در سمت چپ، چسبیده به ساختار و مرکز لنز قرار می‌دهیم. ابتدا شبیه‌سازی را برای بسامد نرمالیزه شده ۰,۲۱ انجام داده و نتایج را در شکل ۳ می‌بینیم.

(الف)



(ب)

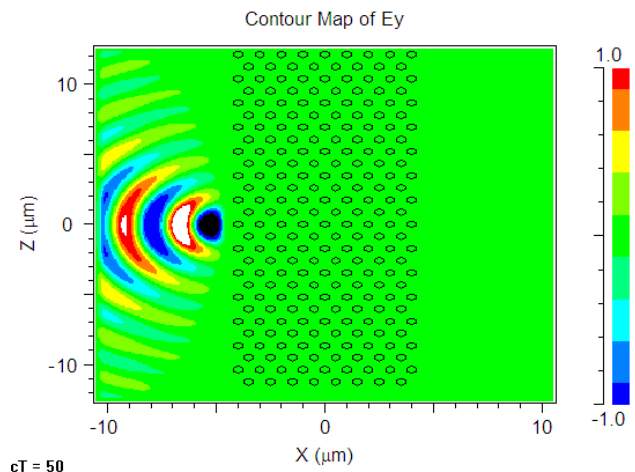
شکل ۴- نقشه‌های انتشار در بسامد الف: ۰,۳، ب: ۰,۴

شکل ۳- نقشه‌های انتشار در بسامد ۰,۲۱

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، آینه کامل را در محدوده‌ی باند توقف نشان می‌دهد. این آینه تمام نور تابیده شده به ساختار را به سمت چپ منعکس می‌کند و در سمت راست نوری منتشر نمی‌شود. تنها تفاوت نوع انتشار در سمت چپ و محدوده آن است که در نتایج قابل مشاهده است.

در همان محدوده‌ی باند توقف، شبیه‌سازی را برای بسامدهای ۰,۳ و ۰,۴ تکرار می‌کنیم.

جهت ساخت یک آینه بهینه و یافتن بهترین بسامد کاری در محدوده شکاف باند، میزان انعکاس را به ازای بسامدهای نرمالیزه ۰,۲۱ تا ۰,۴۱ به دست می‌آوریم. برای این منظور یک مانیتور در سمت چپ مانیتور و در فاصله $7a$ از مرکز لنز قرار دادیم و میدان الکتریکی را اندازه گرفته شده که نتایج در شکل ۵ آمده است. این نتایج با استفاده از شبیه‌سازی FDTD و روش اسکن ورودی و خروجی بدست آمده است. ورودی این شبیه‌سازی بسامد نرمالیزه شده است که از شکل ۱ بدست آمده است و خروجی، میزان میدان الکتریکی منعکس شده در سمت چپ ساختار بلور فوتونی است.



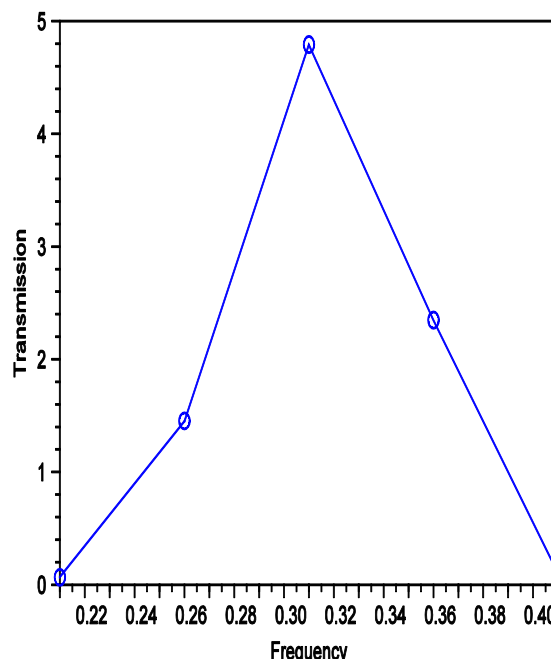
cT = 50

بلور منتشر نمی‌شود و کل نور منعکس می‌شود. با قرار دادن یک منبع گوسیو بررسی انتشار نور، پدیده انعکاس کامل را در چند بسامد در این محدوده مشاهده کردیم. برای تعیین بهترین بسامد در سمت چپ ساختار مانیتور قرار دادیم تا مقادیر دامنه انتشار امواج اندازه‌گیری شود.

آینه‌ها، امواج الکترومغناطیسی را در محدوده‌ی بسامدی مشخصی از سطح منعکس می‌کنند، بنابراین مقدار انتشار داخل ساختار صفر است و انعکاس مقدار ماکزیمم دارد. این خاصیت فوتون را در فضای مورد نظر محدود و یا با طراحی مناسب می‌توان مسیر حرکت نور را تعیین کرد.

مراجع

- [۱] شگری، علی اصغر، مدل تحلیلی برای محاسبه تابع پذیرفتاری مغناطیسی در یک گاز الکترون آزاد قطبیده اسپینی، پیشرفت‌های فیزیک ایران، ۱۳۹۱.
- [۲] سبزه‌جو، مصطفی، بلورهای فوتونی، دانشگاه پیام نور، ۱۳۹۳.
- [۳] فلاحیویشکائی، فاطمه، مروج فرشی، محمدکاظم، حیدری، مجید ابن علی، طراحی سوئیچ ماخ زندر بلور فوتونی با استفاده از اثر نوری-دمایی، هجدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۰۵۳-۱۰۵۷، ۱۳۸۹.
- [۴] خراسانی، سینا، نقاط کوانتومی در کاواک‌های بلور فوتونی، ۱۳۸۸.
- [5] Rong FAN, Yuanbin HOU, and Wei SUN, "Photonic Crystal Fiber Fabry-Perot Interferometers With High-Reflectance Internal Mirrors", PHOTONIC SENSORS, Vol. 5, No. 2, 97-101, 2015.
- [6] Joannopoulos, J, et al, "Photonic Crystals, Molding the Flow of Light", Princeton university press. 2008.
- [7] Saeed Olyaei and Morteza Azizi, "Micro-Displacement Sensor Based on High Sensitivity Photonic Crystal", Photonic Sensors, Vol. 4, No. 3, 220-224, 2014.
- [8] Jiapeng Fu, Aniwat Tandraechanurat, Satoshi Iwamoto, and Yasuhiko Arakawa, "Design of high-Q nanocavity in three-dimensional photonic crystal with vertically mirror-symmetric structure", P hys. Status Solidi C 10, No. 11, 1457-1460, 2013.
- [9] Philippe Hamel, et al, "Spontaneous mirror-symmetry breaking in coupled photonic-crystal nanolasers", Nature Photonics, VOL 9, 2015.
- [10] M.J. Collins, "Integrated spatial multiplexing of heralded single-photon sources", Nature Communications, vol 4, 2013.



شکل ۵- نتایج اندازه‌گیری دامنه میدان در برابر بسامد نرمالیزه شده

در بسامد نرمالیزه شده ۰,۳۱ بیشترین میزان انعکاس اتفاق می‌افتد که بهترین بسامد انتخابی است. بنابراین جهت ساخت یک آینه با کارایی بالا، بسامد نرمالیزه شده ۰,۳۱، بهترین بسامد است. از این رو با این ساختار می‌توان آینه نوری کامل ایجاد کرد. به کمک این آینه‌ها امواج الکترومغناطیسی در محدوده‌ی بسامدی مشخصی از سطح آن منعکس می‌شوند و چون مقدار انتشار داخل ساختار صفر است و انعکاس مقدار ماکزیمم دارد، آینه کامل ایجاد می‌شود. با استفاده از این خاصیت می‌توان فوتون را در فضای مورد نظر محدود و یا با طراحی مناسب، مسیر حرکت آن را معین نمود و با این تغییرات می‌توان حفره و کاواک ایجاد کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله آینه کامل با استفاده از یک ساختار بلور فوتونی دوبعدی طراحی کردیم. این ساختار شش ضلعی‌هایی متناوبی سیلیکونی است که در پس زمینه هوا قرار دارد. این آرایه در محدوده بسامدی خاصی باند توقف دارد که این شبیه‌سازی با استفاده از روش PWE به دست آمد. در این محدوده نور داخل