بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

شکست منفی در بلور فوتونی دوبعدی با هندسه‌ی جدید برای کاربردهای مخابراتی

نوید فارضی[۲،۱]، بابک علیائی فر[۱]، حبیب خوش‌سیما[۱] و جعفر پورصمد[۲]

۱- گروه فوتونیک - پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی – دانشگاه تبریز
۲- گروه فیزیک اتمی و مولکولی – دانشکده‌ی علوم پایه – دانشگاه بناب

چکیده - در این مقاله به بررسی شکست منفی حاصل از بلورهای فوتونی با هندسه‌ی جدید در طول‌موج مخابراتی $\lambda = 1.33\mu m$ پرداخته شده‌است. ساختاری که مطالعه خواهد شد شامل بلور فوتونی دو بعدی مربعی می‌باشد که میله‌های آن با سطح مقطع مربع از جنس سیلیکون با ضریب شکست ۳/۹۶ و پشت زمینه نیز هوا خواهد بود. بدین‌منظور ابتدا ساختار گاف نواری ساختار را با استفاده از روش بسط امواج تخت (*PWE*) رسم کرده و از روی آن نمودارهای هم فرکانس مطالعه شده‌است. در نتیجه شکست منفی به‌دست آمده از ساختار را مشاهده کرده و آن را با یک تخته‌ی سیلیکونی مقایسه می‌کنیم.

کلید واژه- بلور فوتونی، شکست منفی، نمودارهای هم‌فرکانس، ساختار گاف نواری.

Negative Refraction in Novel 2D Photonic Crystal for Telecommunication Applications

Navid Farezi[1,2], Babak Olyaeefar[1], Habib Khoshsim[1], jafar poursamadand[2]

1- Potonics Group, Research Institute for Applied Physics and Astronomy, Tabriz University, Tabriz, Iran
2- Atomic and Molecular Physics Group, Basic Science Department, Bonab University ,Bonab, Iran

Abstract- This paper investigate the negative refraction in a photonic crystal with a new geometry for telecom wavelength $\lambda = 1.33\mu m$. Studied structutre consist of 2D square rods (n=3.96) in a vaccum background. To this goal firs the band structure is obtained via plane wave expansion (PWE) method and then the equi frequency surfaces (EFS) are presented. In results, obtained negative refraction of the structure to view and compared with a silicon slab.

Keywords: Photonic crystal, Negative refraction, Equi frequency surfaces, Band gap structure.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

۱- مقدمه

در سالهای اخیر مطالعات بسیاری در مورد موادی با گذردهی الکتریکی ε و گذردهی مغناطیسی μ منفی انجام گرفته و در محدوده‌ی میکروموج مواد دارای ضریب‌شکست منفی به صورت سیم‌های رسانا و مشددهای حلقوی ساخته شده‌اند [۱]. بلورهای فوتونی در مقایسه با مشددهای حلقوی ساختارهایی هستند که ثابت دی‌الکتریک آنها به صورت متناوب تغییر می‌کند. نشان داده شده که اثر پراش بلورهای فوتونی می‌تواند باعث شکست منفی موثر یا حتی ضریب منفی گردد [۲-۵]. عموماً دو نوع شکست برای بلورهای فوتونی وجود دارد [۶] که یکی رفتار چپ‌گردی است و توسط وسلاگو[1] بیان شده و نوع دیگر شکست منفی بدون چپ‌گردی یا ضریب منفی می‌باشد که از پراکندگی براگ مرتبه‌ی بالا [۴] یا ناهمسانگردی [۵] استفاده می‌شود. آندره[2] و همکارانش به بررسی شکست منفی گسسته در ساختار موجبر بلورفوتونی پرداختند[۷] و جینلانگ[3] و همکارانش نور کند را با استفاده از شکست منفی بلور فوتونی مطالعه کردند [۸].

ایده‌ی شکست منفی در بلورهای فوتونی مرزهای جدیدی در اپتیک باز کرد و در این راستا پندری[4] به اصول عدسی کامل اشاره کرد که منجر به تصویربرداری زیرطول‌موج می‌شود [۹]. ویژگی کانونی کردن در بلورفوتونی در سالهای اخیر به موضوع تحقیقاتی بسیار داغی تبدیل شده است و در این زمینه، لئو[5] و همکارانش [۵]، همچنین چن[6] و همکارانش [۱۰] به بررسی اثر کانونی کردن که به دلیل ناهمسانگردی در ساختار بلور فوتونی دو بعدی مربعی ایجاد می‌شود پرداختند. موسا[7] و همکارانش، هم به صورت تجربی و هم به صورت تئوری نشان دادند که ساختار مثلثی که شامل میله‌های مستطیلی شکل است می‌تواند رفتار شکست منفی و ابر عدسی از خود نشان دهد [۱۱].

[1] Veslago
[2] Andrea
[3] Jinlong
[4] Pendry
[5] Lou
[6] Chien
[7] Moussa

ویژگی‌های غیرمعمول بلور فوتونی همواره با استفاده از نمودارهای هم‌فرکانس بررسی و تحلیل می‌شوند و با استفاده از این واقعیت که نمودار هم‌فرکانس با تغییر ضریب‌شکست دچار تغییر می‌شود، بر این باوریم که جهت انتشار در ساختار بلور فوتونی می‌تواند تغییر کند[۱۲].

در این رابطه ما یک ساختار جدید بلورفوتونی دوبعدی را در نظر می‌گیریم و ازآنجا که درطول‌موج استفاده شده در مخابرات اتلاف کمتر است و می‌توان بهره‌ی بیشتری را مورد استفاده قرار داد لذا از طول موج $\lambda = 1.33\mu m$ استفاده می‌کنیم و برای این طول‌موج شکست منفی را در قطبش TM بررسی خواهیم کرد.

۲- ساختار و روش‌ها

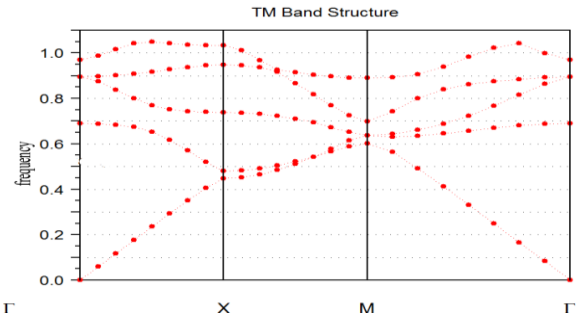
با توجه به این که ساختارهایی که برای بررسی شکست منفی بلور فوتونی انتخاب شده معمولا دارای شکل میله‌های دایره‌ای بوده در اینجا درنظر داریم از ساختارجدیدی استفاده کنیم که دارای شکل میله‌های مربعی می‌باشد. این ساختار که تعداد ۹ میله در هر ردیف و ۹ میله در هر ستون دارد(شکل ۲) به این صورت‌که میله‌های سیلیکونی ($n = 3.96$) بدون در نظر گرفتن زیرلایه در هوا ($n = 1$) قرار دارد، ثابت شبکه نیز $a = 1\mu m$ بوده و $r = 0.25a$ می‌باشد که در اینجا r فاصله‌ی مرکز هر مربع تا لبه‌ی آن می‌باشد، قطبشی نیز که برای این ساختار در نظر گرفته‌ایم قطبش TM است.



شکل ۲) ساختار مربعی بلورفوتونی دو بعدی با شکل میله‌های مربعی

پس از انتخاب ساختار برای بررسی شکست منفی باید ساختار باند مربوط به بلور فوتونی (ویژه‌مقادیر معادله‌ی موج گذرنده از بلور فوتونی که ω بر حسب k می‌باشد) را رسم کرد. این کار توسط روش بسط امواج تخت (PWE) صورت می‌گیرد [۱۳]. ساختار باند این ساختار با تعداد ۲۸۹ موج تخت مطابق (شکل ۲) می‌باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

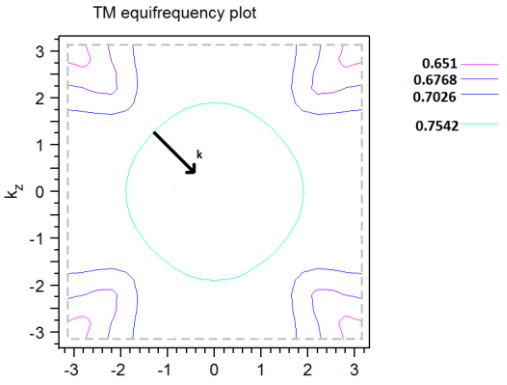


شکل ۲) ساختار باند بلور فوتونی مربوط به(شکل ۱)

همانطور که اشاره شد نمودارهای ساختار باند، فرکانس را بر حسب بردارهای موج نشان می‌دهد و یک نمودار دو بعدی است. اگر این نمودار در سه بعد کشیده شود، بردار موج را بر حسب k_x و k_y نشان می‌دهد که همان فضای بردار موج است، با انتخاب صفحه‌ی k_x و k_y به نمودارهای هم فرکانس که با استفاده از روش PWE به دست می‌آیند می‌رسیم. با استفاده از تحلیل نمودارهای هم فرکانس به بررسی شکست امواج در این ساختار می‌پردازیم. برای اینکه بتوان از شکست منفی به دست آمده اطمینان یافت، ساختار مورد نظر را با تخته‌ی سیلیکونی مقایسه می‌کنیم. روش مقایسه نیز چنین است که ابتدا نحوه‌ی انتشار امواج داخل سیلیکون و سپس داخل بلور فوتونی را با استفاده از روش شبیه‌سازی FDTD مشاهده خواهیم کرد و امواج خروجی از هر دو محیط را با استفاده از رسم نمودار مربوط به توان امواج خروجی از سطح مشترک بین دو محیط با همدیگر مقایسه می‌کنیم تا به نتایج مربوط به شکست منفی دست پیدا کنیم.

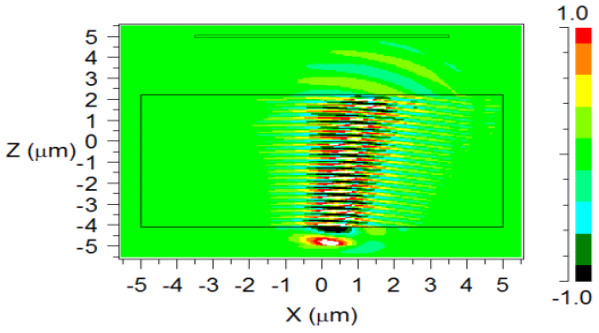
۳- بحث و نتایج

با توجه به اینکه می‌توان انتشار را بر حسب پایستگی بردار موج بررسی کرد راستای انتشار نیز بر اساس شیب نمودار هم‌فرکانس $(\frac{d\omega}{dk})$ سنجیده می‌شود [۱۴]. شکست منفی را نیز می‌توان با بررسی مسیر پرتو، زمانی که از هوا وارد بلور فوتونی می‌شود تشخیص داد [۱۲]. از آنجایی که طول‌موج انتخابی ما $\lambda = 1.33\mu m$ می‌باشد، باید نمودار هم‌فرکانس مربوط به این طول موج را بیابیم. بر طبق محاسبات ما، فرکانس مربوط به این طول‌موج $f = \frac{a}{\lambda} = 0.75$ خواهد شد. از روی (شکل ۳) که با استفاده از روش PWE برای ۲۸۹ موج تخت به دست آمده و نمودار هم‌فرکانس مربوط به باند سوم از (شکل۲) می‌باشد می‌توان به نتیجه‌ی موردنظر دست پیدا کرد.

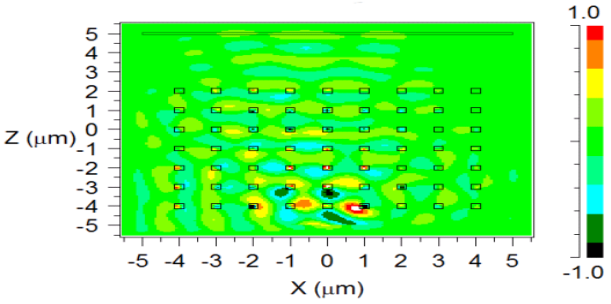


شکل ۳) نمودار هم فرکانس مربوط به باند سوم

برای اطمینان از نتایج به دست آمده، از روش شبیه سازی FDTD استفاده می‌کنیم تا نحوه‌ی انتشار امواج در محیط را نشان دهیم. برای این کار ابتدا انتشار امواج را برای یک تخته‌ی سیلیکونی(شکل ۴) و بار دیگر برای بلور فوتونی (شکل ۵) بررسی کرده و نتایج حاصله را مقایسه می‌کنیم. امواج فرودی با زاویه‌ی ۶ درجه وارد سیستم می‌شود. در هر دو مورد تمامی ابعاد و اندازه‌ها یکسان بوده و موج فرودی نیز دارای طول‌موج $\lambda = 1.33\mu m$ می‌باشد وتنها اختلاف در جنس محیط‌ها می‌باشد.



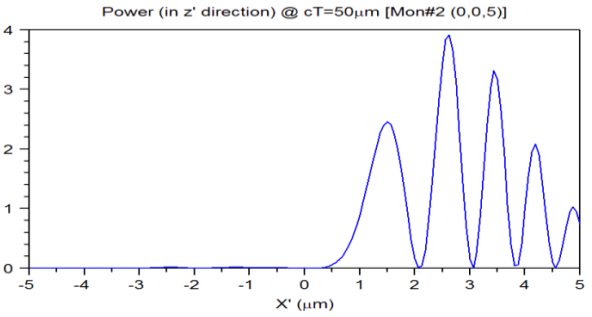
شکل ۴) پخش امواج در تخته‌ی سیلیکونی



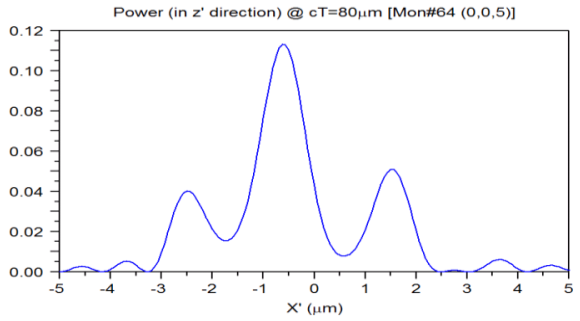
شکل۵) پخش امواج در بلور فوتونی سیلیکونی

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

در این نمودارها، خط عمود بر سطح دو محیط را نقطه‌ی صفر در نظر گرفتیم که اگر پرتوها هنگام خروج سمت راست صفر واقع شوند ضریب شکست مثبت و اگر در سمت چپ باشند ضریب شکست منفی خواهد بود. درنهایت برای اینکه بتوانیم مثبت یا منفی بودن شکست را مشاهده نماییم نیاز به نمودارهایی داریم که سمت شکسته شدن امواج را برایمان نشان دهند و بهترین نموداری که این اطلاعات را در اختیارمان قرار می‌دهد، نمودار توان امواج خروجی از سطح مشترک محیط‌ها می‌باشد. برای تخته‌ی سیلیکونی انتظار داریم بیشترین توان در سمت راست نقطه‌ی صفر واقع شده باشد و برای بلور فوتونی به دلیل شکست منفی انتظار داریم نسبت به نمودار قبلی بیشترین توان در سمت چپ نقطه‌ی صفر واقع گردد. نمودارهای مربوط به توان امواج خروجی از سطح مشترک را برای تخته‌ی سیلیکون در (شکل ۶) و بلورفوتونی در(شکل ۷) به دست آوردیم.



شکل ۶) نمودار توان امواج خروجی از سطح مشترک برای تخته‌ی سیلیکونی



شکل ۷) نمودار توان امواج خروجی از سطح مشترک برای بلور فوتونی

همانطوری که مشاهده می‌شود می‌توان دید که تمامی پیش‌بینی‌های موردنظر صحیح بوده و به وضوح می‌توان اثر شکست منفی را مشاهده نمود به‌طوری‌که امواج وارد شده به بلور فوتونی که با هندسه‌ی جدید انجام یافته به سمت چپ خط عمود پیش‌می‌روند در حالی که قبلاً و در تخته‌ی سیلیکونی در سمت راست خط عمود بوده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ما توانستیم برای طراحی یک نوع ساختار هندسی جدیدی از بلور فوتونی در طول موج مخابراتی $\lambda = 1/33\mu m$ به شکست منفی دست پیدا کنیم. با توجه به قابلیت ساخت آسان بلورهای فوتونی، ساختار فوق می‌تواند به راحتی ایجاد گردد [۱۱] و همانطور که اشاره شد از ضریب شکست منفی به دست آمده می‌توان در بررسی موجبر بلورفوتونی، بررسی نور کند با استفاده از پوشش بلورفوتونی، کانونی کردن امواج فراتر از حد پراش، تصویرسازی زیرطول موج، اثر عدسی کامل، اثر ابرمنشور، اثر خود موازی سازی، شنل نامرئی کننده و ادوات جنگی و جاسوسی رادارگریز و کاربردهای فراوان دیگر استفاده کرد.

۵- مراجع

[1] Shelby R., Smith D. and Schultz S., *Experimental verification of a negative index of refraction*, Science, 292 (2001) 77-79.

[2] Foteinopoulou S., Economou E. and Soukoulis C., *Refraction in media with a negative refractive index*, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 107402(4).

[3] Notomi M., *Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in thevicinity of the photonic band gap*, Phys. Rev. B **62** (2000) 10696-10705.

[4] Foteinopoulou S. and Soukoulis C., *Negative refraction and left-handed behavior in two-dimensional photonic crystals*, Phys. Rev. B **67** (2003) 235107(5).

[5] Chiyan L., Steven J., and Joannopoulos D. *All-angle negative refraction without negative effective index*, Phys. Rev. B **65** (2002) 201104(4).

[6] Gajić R., Meisels R., Kuchar F., and Hingerl K., *Refraction and rightness in photonic crystals*, Opt. Express 13 (2005) 8596-8605.

[7] Locatelli A., Conforti M., Modotto D., and De Angelis C., *Discrete negative refraction in photonic crystal waveguide arrays*, Opt. Let , 31 (2006) 9.

[8] He J., Jin Y., Hong Z., and He S., *Slow light in a dielectric waveguide with negative-refractive-index photonic crystal cladding*, OSA. 16 (2008) 15.

[9] Pendry J.B., *Negative Refraction Makes Perfect Lens*, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 3966-3969.

[10] Chien H. T., Tang H. T., Kuo C. H., Chen C. C. and Ye Z., *Direct diffraction without negative refraction*, Phys. Rev. B, **70** (2004) 113101(4).

[11] Moussa R., Foteinopoulou S., Lei Z., Tuttle G., Guven K., Ozbay E. andSoukouli C. M. s, *Negative refraction and superlens behavior in a two-dimensional Photonic Crystal*, Phys. Rev. B, **71** (2005) 085106(5).

[12] Notomi M., *Negative Refraction in Photonic Crystal*, Optical and Quantum Electronics 34 (2002).

[13] Aaron, Danner J., *An introduction to the plane wave expansion method for calculating photonic crystal band diagrams*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801 (2002).

[14] Charles k, *Introduction to solid state physics*, p. 221, John Wiley, 1996

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]