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

شکست منفی تمام جهتی در بلور فوتونی دوبعدی ناهمسانگرد مثلثی

حمید نادگران و محمد امین ایزدی

دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

چکیده – این مقاله ساخت یک لنزکامل توسط بلور فوتونی مثلثی ناهمسانگرد را بررسی می‌کند. ساختار نواری و نمودار کانتور هم-فرکانس توسط روش بسط تابع موج تخت مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده شده است که این ساختار در قطبش *TM* و برای شعاع نسبی سوراخ های هوا به میزان $0.35a$ و فرکانس $0.222\frac{2\pi c}{a}$ دارای ضریب شکست موثر منفی یک است. با استفاده از روش *FDTD* ، انتشار امواج الکترومغناطیسی از این ساختار و تشکیل تصویر نشان داده شده است. محاسبات نشان می‌دهد که می‌توان با تنظیم دقیق مرزهای بلور فوتونی میزان عبور از آن را به بالای ۹۵٪ رساند.

کلید واژه- بلور فوتونی ناهمسانگرد ، شکست منفی، لنز کامل.تصویرسازی با کیفیت بالا.

All-Angle Negative Refraction in Two-Dimensional Anisotropic Triangular Photonic Crystals

H. Nadgaran and M.A. Izadi

Department Of Physics, College Of Science, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

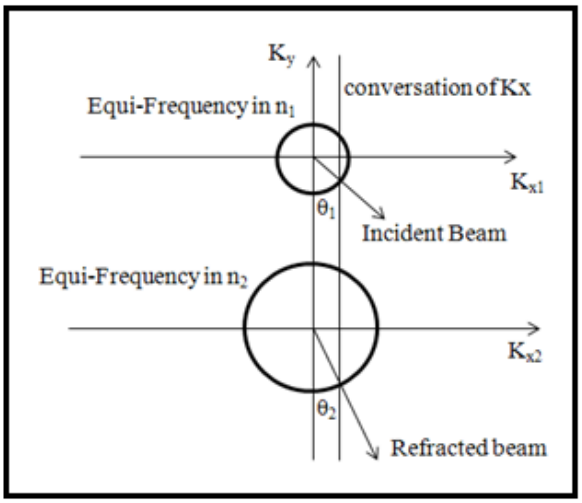
Abstract- This article studies the construction of a Super lens by an anisotropic triangular photonic crystal. The photonic bands and the contours of equi-frequency surfaces are studied by PWE method. This lens has an effective index of refraction of -1 for TM polarization, where the air holes relative radius are 0.35a and ω= $0.222\frac{2\pi c}{a}$. Propagation of electromagnetic waves through this Super lens and the construction of an image are also studied by means of FDTD method. Calculation shows that it is possible to have transmission rate more than 95% with a tailored adjustment of photonic crystal's boundaries.

Keywords: Anisotropic Photonic Crystals, Negative Refraction, Super Lens, Optical Imaging Super-Resolution.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱ – مقدمه

وسلاگو در سال ۱۹۶۴ میلادی ایده ایجاد موادی با ضریب شکست منفی را در مقاله مشهور خود عنوان کرد[۱]. ایده ساخت موادی با ضریب شکست منفی بر موادی استوار شده بود که گذردهی الکتریکی ε و تراوایی مغناطیسی μ در آنها همزمان اعداد منفی باشد.از آنجا که این مواد به صورت طبیعی وجود ندارند، محققان از زمان طرح نظری این ایده تا چندی پیش به دنبال ایجاد این ساختارها به صورت مصنوعی بودند. تا اینکه پندری در سال ۲۰۰۰ میلادی با معرفی یک ساختار فلزی خاص نشان داد که این ساختار می‌تواند در ناحیه میکروموج به صورت موثر دارای پارامترهای ε وμ منفی یک باشد و در آنجا ایده ساخت لنز کامل که بر مبنی شکست منفی بود، را مطرح کرد[۲]. ایده ساخت لنز کامل توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. نوتومی در سال ۲۰۰۲ میلادی ایده استفاده از بلورهای فوتونی[۳-۴] به عنوان ساختارهایی برای ایجاد شکست منفی را مورد مطالعه قرار داد[۵]. وی با استفاده از نمودار کانتور هم‌فرکانس، شکل۱ و با استفاده از شرط پایستگی بردار موج موازی سطح، زاویه شکست را در بلورهای فوتونی مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که بلور فوتونی دوبعدی مثلثی با ثابت دی الکتریک زمینه ۳/۵ و شعاع نسبی سوراخ‌های هوا به میزان ۰/۳۵ در قطبش TE می‌تواند برای یک گستره باریک زاویه فرودی، پدیده شکست منفی همگنی را ایجاد کند. پس از این مطالعه، مقالات زیادی در بررسی نظری و ساخت بلورهای فوتونی که توانایی ایجاد شکست منفی را داشته باشند چاپ شده است[۶-۹]. لو و دیگران در سال ۲۰۰۲ نوع دیگری از بلور فوتونی مربعی دوبعدی را مورد مطالعه قرار دادند که توانایی ایجاد شکست منفی در قطبش TE برای تمامی زاویه‌های فرودی را داشت[۱۰]. اما مشکل اصلی در طراحی مدل آنها این بود که ضریب شکست برای هر زاویه فرودی، فرق می‌کرد. مواد دی-الکتریک همسانگرد در طول موجهای نوری دارای ضریب شکست بین ۱ تا ۳/۵ هستند[۵]. بنابراین اگر به دنبال راهی برای افزایش ضریب شکست باشیم می‌توانیم از مواد دی الکتریک ناهمسانگرد مانند تلوریوم (Te) که یک ماده دی الکتریک ناهمساگرد تک‌محور است استفاده کنیم. ضریب شکست معمولی Te، n_e=۴/۸ و ضریب شکست غیرعادی آن n_e = ۶/۲ است[۱۱]. بلورهای فوتونی ساخته‌شده از مواد ناهمسانگرد اگرچه تقارن صفحه‌ای TE یا TM را می‌شکنند اما در صورتی که محورهای ماده‌ی ناهمسانگرد منطبق بر محورهای بلور فوتونی باشد، تقارن TEیا TM حفظ می‌گردد[۱۱].مورد دیگری که در ساخت لنز کامل باید درنظرگرفت جفت‌شدگی کامل امپدانس لنز و محیط اطراف می‌باشد[۲].جفت‌شدگی امپدانس در لنزهای بلورفوتونی ناشی از رفتار لبه‌های لنز است. بنابراین اثرات لبه‌های بلور فوتونی تاثیر به‌سزایی در میزان بازتاب یا عبور از بلور فوتونی و درنتیجه کیفیت تصویر ساخته شده از لنز طراحی شده دارد. زیاوو این اثرات لبه‌ای را در [۱۲] مورد بررسی قرار داده است. مقاله پیش رو این موضوع را بررسی می‌کند که بلور فوتونی ناهمسانگرد برای چه قطبشی می‌تواند یک شکست منفی کامل و یکنواخت برای تمامی زاویه‌های فرودی ایجاد کند و رفتار اثرات لبه‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهد.



شکل۱:نمودار کانتور هم‌فرکانس دو محیط به ضریب شکستهای n_1 و n_2 ($n_2>n_1$). درصورتی که زاویه فرودی موج Θ_1 باشد، زاویه شکست Θ_2 است.

۲- روش مطالعه

روش بسط تابع موج تخت (PWE) یک روش مناسب و کارآمد برای بررسی و تحلیل ساختار نواری و نمودارهای هم‌فرکانس بلورهای فوتونی می‌باشد[۱۳]. در این مقاله از این روش و به کمک بسته‌ی نرم افزاری MPB [۱۴] برای بررسی ساختارهای نواری و کانتورهای هم‌فرکانس بلور

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

فوتونی استفاده کرده‌ایم. به طور خلاصه باید بگوییم که برای به دست آوردن ساختارهای نواری و نمودارهای هم-فرکانس باید معادله مستقل از زمان ماکسول (۱) را در پایه ویژه توابع فوریه بسط داد که در این رابطه $\vec{H}$ بردار میدان مغناطیسی، ε تانسور دی‌الکتریک، ω فرکانس زاویه‌ای و c سرعت نور است.

$$\vec{\nabla}\times\left[\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})}\vec{\nabla}\times\vec{H}(\vec{r})\right]=\left(\frac{\omega}{c}\right)^2\vec{H}(\vec{r}) \qquad (۱)$$

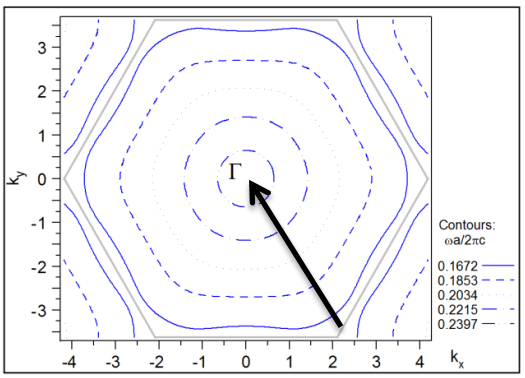
که در این رابطه $\vec{\nabla}\cdot\vec{H}(\vec{r})=0$ است. تانسور دی‌الکتریک مطابق با رابطه (۲) یک تابع دوره‌ای نسبت به بردار ثابت شبکه $\vec{a}$ است.

$$\varepsilon(\vec{r})=\varepsilon(\vec{r}+\vec{a}) \qquad (۲)$$

همانطور که گفته شد، ناهمسانگردی ماده دی الکتریک باعث شکسته شدن تقارن TE و TM می‌گردد، اما اگر محورهای ماده‌ی ناهمسانگرد منطبق بر محورهای بلور فوتونی باشد، تقارن TE یا TM حفظ می‌گردد. بلور مورد استفاده ما یک بلور فوتونی مثلثی دوبعدی است که با حفر سوراخ‌های دایره‌ای شکل به شعاع R در ماده زمینه ایجاد می‌شود. اندازه ثابت شبکه در این بلور a است. ساختار ذکرشده در مرجع [۵] به علت کوچک بودن کانتور همفرکانس بلور فوتونی نسبت به هوا، تمام زاویه های فرودی را در بر نمی‌گیرد. یکی از راه های افزایش شعاع کانتور هم‌فرکانس، افزایش ضریب شکست ماده زمینه است[۴]. برای این منظور ما از Te که یک ماده ناهمسانگرد است استفاده کرده‌ایم. ضریب شکست درجهت موازی با محور اصلی سوراخ‌های هوا را برابر با n_o و درجهت عمود بر آن را n_e در نظر می‌گیریم. رابطه ۳ تانسور دی الکتریک ماده زمینه (Te) بلور فوتونی را نشان می‌دهد.

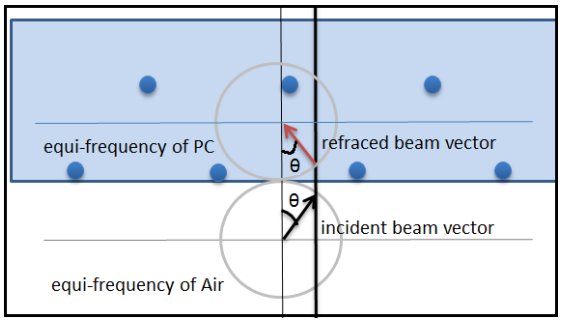
$$\begin{pmatrix}\varepsilon_{xx}={n_e}^2 & 0 & 0\\ 0 & \varepsilon_{yy}={n_e}^2 & 0\\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz}={n_o}^2\end{pmatrix} \qquad (۳)$$

شکل ۲، نمودار هم‌فرکانس مربوط به دومین نوار فرکانسی برای بلور ذکر شده در قطبشTM و برای شعاع نسبی $\frac{R}{a}$=۰/۳۵ را نشان می‌دهد. این شعاع یک شعاع استاندارد در ساخت بلورهای فوتونی مثلثی است. لازم به ذکر است که مطالعات قبلی در این زمینه به علت استفاده از موادی با ضریب شکست پایین مجبور به انتخاب شعاع-های نسبتاً بزرگ برای سوراخ‌ها می‌بودند که این کار موجب شکنندگی شدید بلور می‌شود. همانطور که پیداست نمودارهای هم‌فرکانس نزدیک نقطه Γ برای این نوار با افزایش فرکانس چروکیده می‌شوند و این نشانه رفتار دست‌چپی [۶] و سرعت گروه منفی در این فرکانس است. بنابراین در این ناحیه فرکانسی بلورفوتونی دارای ضریب شکست منفی است.



شکل۲:نمودار کانتور هم‌فرکانس بلور فوتونی ناهمسانگرد مثلثی برای نوار دوم نزدیک نقطه Γ. پیکان جهت کاهش بردار موج با افزایش فرکانس را نشان می‌دهد.

شکل ۳ نمودار هم‌فرکانس مربوط به فرکانس ۰/۲۲۲$\frac{2\pi c}{a}$را نشان می‌دهد. این کانتور هم‌فرکانس کاملاً دایره‌ای می‌باشد و با توجه به شکل، چون با کانتور هم‌فرکانس هوا یکسان است، بلور فوتونی ذکر شده در این فرکانس دارای ضریب شکست منفی یک است.

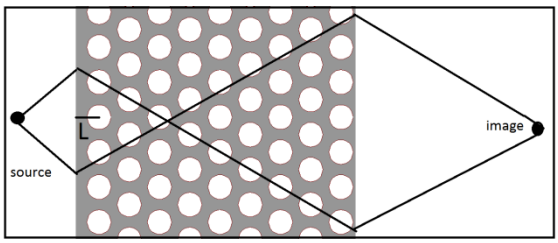


شکل۳: نمودار کانتور هم‌فرکانس بلور فوتونی مثلثی و هوا در فرکانس ۰/۲۲۲. هر دو نمودار باهم یکسانند. زاویه ورودی و شکست θ باهم برابر است.

در ادامه با استفاده از روش FDTD [۱۵] به انتشار امواج الکترومغناطیسی با قطبش TM از لنز طراحی شده می-

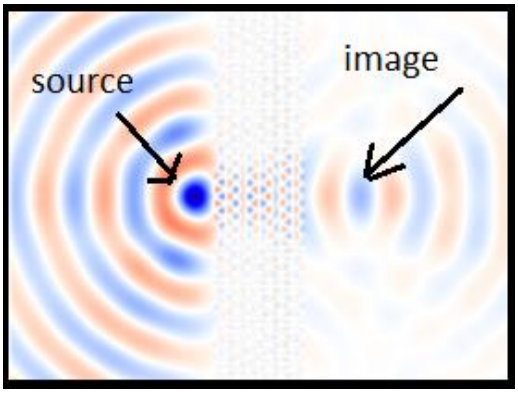
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

پردازیم. برای این منظور از نرم افزار MEEP [۱۶] استفاده نموده‌ایم. همانطور که در مقدمه ذکر شد، عامل مهمی که در ایجاد یک تصویر کامل در ناحیه زیر موج توسط لنز تاثیر دارد جفت‌شده‌گی دو محیط است که از طریق تنظیم مرزهای لنز امکان‌پذیر است. برای بررسی میزان عبور از لنز از روش FDTD استفاده کرده ایم. شکل۴، لنز طراحی‌شده و محل قرار گرفتن چشمه و تصویر را نشان می‌دهد. پارامتر L فاصله لبه بلور فوتونی از مرکز آخرین ردیف سوراخ‌ها است. با تنظیم دقیق L می‌توان میزان عبور از تیغه بلور فوتونی را به بالای ۹۵٪ رساند. درنتیجه لنز با محیط اطراف خود کاملاً جفت می‌شود و تمام مولفه‌های خروجی از چشمه در ساخت تصویر شرکت دارند و می‌توان تصویری با کیفیت بالا به‌دست آورد.



شکل۴: لنز کامل ساخته شده از بلور فوتونی و محل قرار گرفتن چشمه و تصویر. L فاصله لبه بلور فوتونی از مرکز آخرین ردیف سوراخ‌ها ست.

شکل۵، مولفه عمودی میدان الکتریکی به دست آمده از روش FDTD و محل چشمه و تصویر را نشان می‌دهد.



شکل۵ : مولفه Z میدان الکتریکی. محل چشمه و تصویر به دست آمده از لنز

محاسبات نشان می‌دهد که به ازای L=۰/۰۸a میزان عبور از بلور فوتونی نزدیک به ۹۵٪ بوده و بنابراین تمام مولفه-های ساتع شده از چشمه در ساخت تصویر شرکت دارند.

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

دراین مقاله تصویرسازی با کیفیت بالا توسط یک بلور فوتونی ساخته‌شده از یک ماده ناهمسانگرد به صورت نظری مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که بلور فوتونی ناهمسانگرد به خاطر ضریب شکست موثر بالایی که دارد، باعث می‌شود که بتوانیم اندازه شعاع سوراخ‌های هوا را کوچک انخاب کنیم و اینکار باعث جلوگیری از شکنندگی بلور می‌شود. لنز طراحی شده می‌تواند برای یک فرکانس مشخص می‌تواند همانند یک لنز تخت با کیفیت بالا در ابعاد نانومتری عمل کند. پدیده شکست منفی و ساخت لنز تخت می‌تواند کاربردهای بسیار متنوعی در سیستم‌های تصویربرداری نانومتری مانند میکروسکوپ‌های نانومتری داشته باشد. بدیهی است که تحقیقات نظری و عملی بسیاری نیاز است تا مواد ناهمسانگرد وارد کاربردهای عملی گردند.

مراجع

[1] Veselago, V.G., *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of $\mathcal{E}$ and μ,* **Sov. Phys. Usp.**10 (1968) 509-514.

[2] Pendry, j.b., *Negative refraction makes a perfect lens*, **Physical Review Letters**.85 (2000) 3966-3969.

[3] Yablonovitch, E, *photonic band structure: the F.C.C case*, **Physics Review Letters**.67 (1989) 2295-2298.

[4] Joanopoulos, J.D, *Photonic crystals molding the flow of light*, **p**.250,Princeton University Press, 2008.

[5] Notomi, M, *Negative refraction in photonic crystals*, **Optical and Quantum Electronics.**31 (2002) 133-143 .

[6] Foteinopoulou, S., *Negative refraction and left-handed behavior in two-dimensional photonic crystals*,**Physical Review B.** 67 (2003) 235107-235112

[7]Parimi,P.V., *Negative Refraction and Left-Handed Electro - magnetism in Microwave Photonic Crystals*, **Physics Review Letters**. 92 (2004) **,** 127401-127404

[8] Zhang, X, *Super lens to overcome the diffraction limit,*., **Progress Article**, (2008), 435-441.

[9]Lu, Z. *etal, Negative refraction imaging in a hybrid photonic-crystal device at near-infrared frequencies*. **Optics Express.** 15, (2007) 1286-1291.

[10] Lou, C.,*et al, all angle negative refraction without negative effective index*,**Physical Review B**.65 (2002) 2011041-2011044.

[11] Yuan Li, Z, et all, *Large absolute band gap in 2D anisotropic photonic crystals*, **Physical Review Letters.** 81 (1998) 2574-2577.

[12] Xiao, M, *Influence of the surface termination to the point imaging by a photonic crystal slab with negative refraction*, p., **Applied Physics Letters**.85 (2004) 4269-4275.

[13] Khromova, A., Melnikov, A., *Anisotropic photonic crystal: Generalized plane wave method and dispersion symmetry properties*, **Optics Communications**.281(2008) 5458-5466.

[14] Johnson S. G. , Joannopoulos, J. D., *The MIT Photonic-Bands Package*, home page http://ab-initio.mit.edu/mpb/,(2003).

[15]Taflove,A.,Hagness, S.C., *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, **p.120** Artech,Norwood, 3rd edn., 2005.

[16] Oskooi, Ardavan F., *MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method*, ,**Computer Physics Communications.** 181 (2010) 687–702.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]