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

تفکیک فضایی زیر طول موجی در متمرکز کننده‌ی بلور فوتونی بر پایه‌ی شبکه‌ی مربعی ترکیبی

سمیه رفیعی دستجردی و مجید قناعت‌شعار

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - در این مقاله، قابلیت تفکیک فضایی زیر طول موجی بلور فوتونی دو بعدی با شبکه‌ی مربعی ترکیبی، متشکل از حفره‌های هوا در محیط ژرمانیوم را بررسی کرده‌ایم. در مقایسه با دیگر شبکه‌های مربعی، در مدل پیشنهادی ما، ساختار نواری بلور به سمت بسامدهای پایین فشرده شده و بسامد متناظر با ضریب شکست مؤثر منفی، در نوار دوم انرژی و در ناحیه‌ی فرو سرخ نزدیک قرار گرفته است. محاسبه‌ی ساختار نواری بلور فوتونی و همچنین چگونگی انتشار موج و تشکیل تصویر، با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان و شرط‌های مرزی تناوبی و لایه‌ی کاملاً جور شده صورت گرفته است.

کلید واژه- بلور فوتونی دو بعدی، تفکیک فضایی زیر طول موجی، با ضریب شکست منفی، نورشناخت مجتمع.

Sub-wavelength spatial resolution in a 2D photonic crystal lens based on a complex square lattice

Somayeh Rafiee Dastjerdi, Majid Ghanaatshoar

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113 Tehran, Iran

Abstract- We study the potential of sub-wavelength spatial resolution of a two dimensional complex square-lattice photonic crystal (PC) consisting air holes immersed in the Ge medium. The band diagram calculations and the wave propagation studies are done utilizing the finite difference time domain method (FDTD) incorporating periodic and perfectly matched layer (PML) boundary conditions. In contrast to the common square PCs, photonic band structure shifts to the lower frequencies and the frequency corresponding to the effective negative refraction occurs in the second photonic band in near-infrared region, in our model system.

Keywords: 2D photonic crystal, Sub-wavelength spatial resolution, Negative index materials, Integrated optics.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

عدسی نوری، در طول چند قرن به عنوان یکی از ابزارهای اولیه‌ی علمی در خدمت دانشمندان بوده است. نحوه‌ی عملکرد عدسی‌های نوری بر اساس نورشناخت هندسی به خوبی درک شده است. طبق نورشناخت هندسی، سطوح منحنی، نور را بواسطه‌ی تفاوت ضریب شکست در مرز محیط و عدسی در ناحیه‌ای موسوم به نقطه‌ی کانونی متمرکز می‌کنند. با توجه به اهمیت عدسی‌ها در پیشبرد دانش بشر نسبت به محیط پیرامون، تلاش‌های بسیاری در جهت افزایش قدرت تفکیک آن‌ها انجام گرفته است. البته لازم به ذکر است با وجود تمامی این تلاش‌ها، هیچ عدسی نمی‌تواند نور را در مساحتی به قطر کمتر از طول موج نور تابانده شده متمرکز نماید.

در سال ۱۹۶۸ برای اولین‌بار، دانشمندی روسی بنام وسلاگو[1] امکان وجود ضریب شکست منفی را مطرح کرد. او با اشاره به این نکته که مقادیر گذردهی الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی از خصوصیات بنیادی ماده و تنها پارامترهایی از ماده هستند که در معادله‌ی پاشندگی ظاهر می‌شوند، الکترودینامیک محیطی فرضی با ضریب شکست منفی را مورد بررسی قرار داد [۱]. پس از گذشت سه دهه از معرفی محیط با ضریب شکست منفی، پندری[2] ثابت کرد که چنین محیطی توانایی بازیابی فاز موج انتشاری و دامنه‌ی موج میرا شونده را داشته و می‌تواند به عنوان یک عدسی کامل بر حد پراش غلبه کند [۲].

با پیشرفت در فناوری نانو، زمینه‌ی ساخت و تولید نمونه‌هایی از مواد مصنوعی جدید مانند فرا مواد[3] [۳، ۴] و بلورهای فوتونی [۵، ۶] فراهم شد. این دسته از مواد ساخت دست بشر، می‌توانند در بازه‌های بسامدی خاص، دارای گذردهی الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی منفی و یا ضریب شکست مؤثر منفی باشند. در این میان، بلورهای فوتونی در بسامدهای نوری، دارای اتلاف کمتری نسبت به فرامواد هستند و از طرفی رابطه‌ی پاشندگی مدهای بلاخ انتشاری در این بلورها، می‌تواند به اثرات بسیار جالبی منجر شود. البته نکته‌ی بسیار مهم، نحوه‌ی طراحی و مهندسی سطح این بلورهاست که در افزایش نور عبوری و وضوح تصویر تشکیل شده اهمیت فوق العاده‌ای دارد [۷، ۸]. در همین راستا، بلورهای فوتونی طراحی شده با ساختار مربعی، در بسامدهای مربوط به نوارهای انرژی بالا، اثرات فراعدسی مبتنی بر ضریب شکست مؤثر منفی را از خود نشان داده و در نتیجه به منظور متمرکز کردن نور توسط بلورهای فوتونی با شبکه‌ی مربعی در بسامدهای پایین‌تر، بسامدهای مربوط به نوار اول انرژی، حول نقطه‌ی M پیشنهاد شد [۹]. در حالی که، نوار اول انرژی دارای ضریب شکست مثبت بوده و در این حالت، بلور فوتونی تنها قادر به متمرکز نمودن نور در نواحی بسیار نزدیک به بلور است.

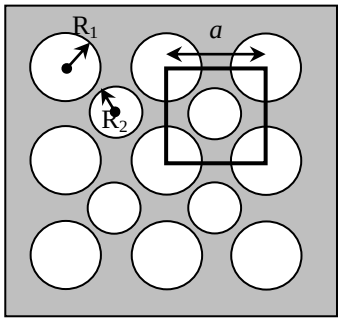
در این مقاله، تشکیل تصویر توسط بلور فوتونی دو بعدی با شبکه‌ی مربعی ترکیبی متشکل از حفره‌های هوا در ماده‌ی دی‌الکتریک را بررسی می‌کنیم. در قیاس با دیگر شبکه‌های مربعی، ضریب شکست مؤثر منفی در این بلور، مربوط به نوار دوم انرژی و حول نقطه‌ی Γ است. لازم به ذکر است که محاسبات مربوط به ساختار نواری و نحوه‌ی انتشار موج و تشکیل تصویر، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان[4] و شروط مرزی تناوبی و لایه‌ی کاملاً جور شده، صورت گرفته است.

۲- بلور فوتونی با شبکه‌ی مربعی ترکیبی

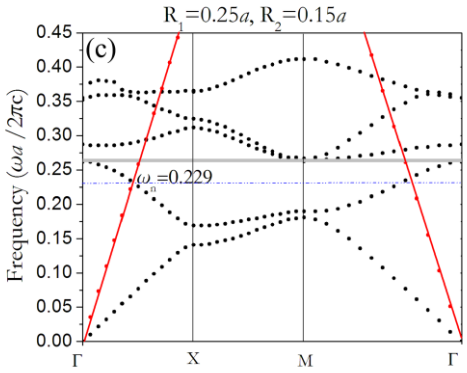
بلور فوتونی مورد بررسی، مطابق شکل (۱) شامل آرایه‌های متناوب از حفره‌های بلند هوا در ماده‌ی دی‌الکتریک ژرمانیوم است که در راستای محور x محدود و در راستای محور y نامحدود فرض شده‌اند. ثابت دی‌الکتریک ژرمانیوم در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر، $\varepsilon_{Ge}=18$ و شعاع حفره‌ها $R_1=0/25a$ و $R_2=0/15a$ در نظر گرفته شده که a، ثابت شبکه‌ی بلور است. به منظور محاسبه‌ی ساختار نواری و شبیه‌سازی تشکیل تصویر در بلور فوتونی، موج الکترومغناطیس با قطبش TE را در نظر گرفته و معادلات ماکسول را در حوزه‌ی زمان، با روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان حل می‌کنیم. شکل (۲) ساختار نواری بلور فوتونی مذکور را نمایش می‌دهد. با رسم منحنی پاشندگی هوا، بسامد

[1] Veselago
[2] Pendry
[3] Meta-materials
4 Finite Difference Time Domain (FDTD)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]



شکل۱: بلور فوتونی دو بعدی با ثابت شبکه‌ی a، متشکل از حفره‌های هوا به شعاع‌های R_1 و R_2 در محیط دی‌الکتریک ژرمانیوم.

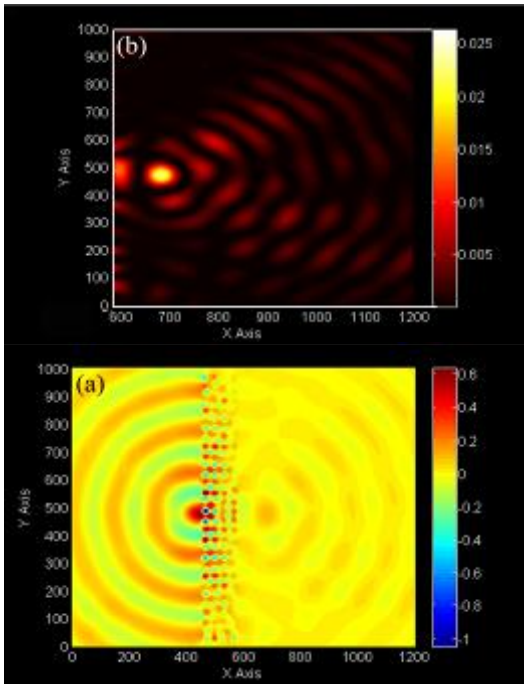


شکل۲: ساختار نواری مربوط به بلور فوتونی ساخته شده از حفره‌های هوا به شعاع‌های $R_1=$ ۰/۲۵a و $R_2=$۰/۱۵a، در ماده‌ی ژرمانیوم. ناحیه‌ی تیره رنگ، مکان نوار ممنوع بسامد و خطوط رسم شده از نقطه‌ی Γ، نمودار پاشندگی هوا را نمایش می‌دهند.

مربوط به ضریب شکست مؤثر منفی را که محل برخورد نمودار پاشندگی هوا و بلور است، به دست می‌آوریم. بدیهی است که سرعت گروه در این بسامد خاص، منفی است زیرا سطح هم‌بسامد بلور فوتونی حول نقطه‌ی Γ، دارای گرادیان افزایشی به سمت داخل است [۹]. مطابق شکل، با وجود فشرده شدن پنج نوار نخست انرژی، نوار ممنوع بسامد میان نوارهای دوم و سوم انرژی به وجود آمده است.

۳- شبیه‌سازی انتشار موج و تشکیل تصویر توسط بلور فوتونی

با توجه به ساختار نواری به دست آمده، اکنون چگونگی تشکیل تصویر برای مد TE را برای حالتی که $R_1=$۰/۲۵a و $R_2=$۰/۱۵a باشد، بررسی می‌کنیم. به منظور کمینه

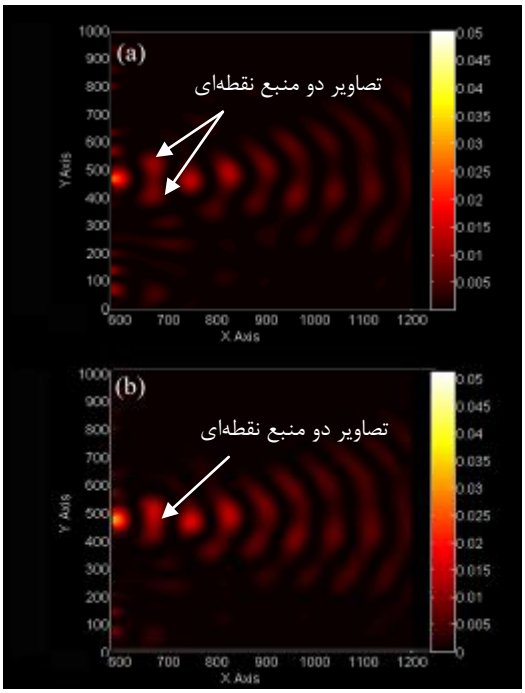


شکل۳: (الف) توزیع میدان الکتریکی منبع نقطه‌ای که در فاصله‌ی ۰/۵a از سمت چپ بلور فوتونی به ضخامت ۴a واقع شده است و در بسامد نرمال ۰/۲۲۹ تابش می‌کند. (ب) توزیع شدت میدان الکتریکی متناظر در سمت راست بلور فوتونی.

کردن بازتاب از مرز بلور فوتونی، ضخامت بلور را مضرب صحیحی از نصف طول موج نور تابشی در نظر گرفته و یک منبع نقطه‌ای را که در بسامد نرمال ۰/۲۲۹ (بسامد متناظر با محل برخورد منحنی پاشندگی هوا و دومین نوار انرژی بلور فوتونی) تابش می‌کند، در فاصله‌ی ۰/۵a از سمت چپ بلور فوتونی ترکیبی قرار می‌دهیم. طول ثابت شبکه‌ی بلور فوتونی را با توجه به بسامد نرمال و به منظور متمرکز نمودن نور با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، معادل ۳۵۵ نانومتر در نظر می‌گیریم.

شکل (۳)، الگوی توزیع میدان و شدت میدان الکتریکی منبع نقطه‌ای و تصویر تشکیل شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل، تصویر منبع نقطه‌ای به وضوح در سمت راست بلور فوتونی و با فاصله از مرز بلور تشکیل شده است. یکی از روش‌های محک زدن تفکیک فضایی بلور فوتونی، استفاده از دو منبع نقطه‌ای همدوس است. به این صورت که فاصله‌ی میان دو منبع نقطه‌ای را به تدریج کم می‌کنیم تا عملاً تفکیک تصاویر غیرممکن شود. در این حالت بر اساس معیار ریلی [۱۰]، تفکیک فضایی را

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]



شکل۴: (الف) توزیع شدت میدان الکتریکی دو منبع نقطه‌ای که در فاصله‌ی $0/5a$ از سمت چپ بلور فوتونی واقع شده و در بسامد نرمال ۰/۲۲۹ تابش می‌کنند، برای حالتی که فاصله‌ی دو منبع از یکدیگر (الف) $3a$ و (ب) $2/9a$ است.

می‌توان به دست آورد. اکنون دو منبع نقطه‌ای نور را در فاصله‌ی $0/5a$ از سمت چپ بلور فوتونی قرار می‌دهیم. مطابق شکل (۴)، زمانی که فاصله‌ی دو منبع $3a$ یا $0/687\lambda$ است، تصاویر مربوط به دو منبع قابل تشخیص است، در حالی‌که برای فاصله‌ی $2/9a$ عملاً تفکیک تصاویر غیرممکن می‌شود. بنابراین طبق معیار ریلی، تفکیک فضایی این ساختار، برابر با $0/687\lambda$ است که کوچکتر از طول‌موج نور تابشی است. با توجه به این امر، این ساختار دارای تفکیک فضایی زیر طول موجی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، چگونگی تشکیل تصویر در بلور فوتونی دو بعدی با شبکه‌ی مربعی ترکیبی متشکل از حفره‌های هوا در ماده‌ی ژرمانیوم را بررسی نمودیم. با اضافه کردن یک حفره با شعاع متفاوت به مرکز شبکه‌ی مربعی ساده، توانستیم بسامد نرمال متناظر با ضریب شکست منفی را تا ۰/۲۲۹ کاهش داده و یک متمرکز کننده‌ی بلور فوتونی با تفکیک فضایی $0/687\lambda$ طراحی کنیم. لازم به ذکر است که نمودار پاشندگی این بلور فوتونی، دارای گاف ممنوع بسامد میان نوار دوم و سوم انرژی بوده و این بلور، شرایط لازم برای ایجاد ضریب شکست مؤثر منفی و قابلیت عملکرد به عنوان یک فرا عدسی در بسامدهای فرو سرخ را دارد.

مراجع

[1] V. G. Veselago, *The electromagnetic of substances with simultaneously negative value of ε and μ*, **Sov. Phys. Usp.** 10, 509-514 (1968).

[2] J. B. Pendry, *Negative refraction makes a perfect lens*, **Phys. Rev. Lett.** 85, 3966-3969 (2000).

[3] M. Zedler, C. Caloz, and P. Russer, *A 3-D isotropic left-handed metamaterial based on the rotated transmission-line matrix scheme*, **IEEE Trans. Ant. Prop.** 55, 2930–2941 (2007).

[4] J. M. Algarin, M. J. Freire, M. A. Lopez, M. Lapine, P. M. Jakob, V. C. Behr, and R. Marques, *Analysis of the resolution of split-ring metamaterial lenses with application in parallel magnetic resonance imaging*, **Appl. Phys. Lett.** 98, 014105 (2011).

[5] V. Kumar, K. S. Singh, and S. P. Ojha, *Negative Refraction in One Dimensional Photonic Crystal without negative refractive index material*, **International J. Micro. Opt. Tech.** 5, 235 (2010).

[6] X. Wang, Z. F. Ren, and K. Kempa, *Unrestricted superlensing in a triangular two dimensional photonic crystal*, **Opt. Express**, 12, 2919 (2004).

[7] E. Cubukcu, K. Aydin, and E. Ozbay, *Subwavelength resolution in a two-dimensional photonic crystal based superlens*, **Phys. Rev. Lett.** 91, 207401 (2003).

[8] M. Notomy, *Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refraction-like behavior in the vicinity of the photonic band gap*, **Phys. Rev. B** 62, 10696-10705 (2000).

[9] C. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, and J. B. Pendry, *Subwavelength imaging in photonic crystals*, **Phys. Rev. B** 68, 045115 (2003).

[10] F. Xia, M. Yun, M. Liu, J. liang, W. Kong, H. Tan, and W. Lv, *Negative refraction subwavelength imaging in a hexagonal two-dimensional annular photonic crystal*, **J. Appl. Phys.** 113, 013109 (2013).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]