



تفکیک فضایی زیر طول موجی در مرکز کننده بلوار فوتونی بر پایه شبکه 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 بلوار فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی ترکیبی، مت Shank از حفره های هوا در محیط ژرمانیوم را بررسی کرده ایم. در مقایسه با دیگر شبکه های مربعی، در مدل پیشنهادی ما، ساختار نواری بلوار به سمت بسامدهای پایین فشرده شده و بسامد متناظر با ضریب شکست مؤثر منفی، در نوار دوم انرژی و در ناحیه فرو سرخ نزدیک قرار گرفته است. محاسبه های ساختار نواری بلوار فوتونی و همچنین چگونگی انتشار موج و تشکیل تصویر، با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان و شرط های مرزی تناوبی و لایه کاملاً جور شده صورت گرفته است.

کلید واژه - بلوار فوتونی دو بعدی، تفکیک فضایی زیر طول موجی، با ضریب شکست منفی، نورشناسی 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.

۱- مقدمه

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 فراغدی مبتنی بر ضریب شکست مؤثر منفی را از خود نشان داده و در نتیجه به منظور مرکز 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، بلو فوتونی تنها قادر به مرکز نمودن نور در نواحی بسیار نزدیک به بلو است.

در این مقاله، تشکیل تصویر توسط بلو فوتونی دو بعدی با شبکه‌ی مربعی ترکیبی مشکل از حفره‌های هوا در ماده‌ی دی‌الکتریک را بررسی می‌کنیم. در قیاس با دیگر شبکه‌های مربعی، ضریب شکست مؤثر منفی در این بلو، مربوط به نوار دوم انرژی و حول نقطه‌ی Γ است. لازم به ذکر است که محاسبات مربوط به ساختار نواری و نحوه انتشار موج و تشکیل تصویر، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان^۴ و شروط مرزی تناوبی و لایه‌ی کاملاً جور شده، صورت گرفته است.

۲- بلو فوتونی با شبکه‌ی مربعی ترکیبی

بلو 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، $E_{Ge} = 18$ و شعاع حفره‌ها $R_1 = 0.25a$ و $R_2 = 0.15a$ در نظر گرفته شده که a ثابت شبکه‌ی بلو است. به منظور محاسبه‌ی ساختار نواری و شبیه‌سازی تشکیل تصویر در بلو فوتونی، موج الکترومغناطیس با قطبش TE را در نظر گرفته و معادلات ماقسول را در حوزه‌ی زمان، با روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان حل می‌کنیم. شکل (۲) ساختار نواری بلو فوتونی مذکور را نمایش می‌دهد. با رسم منحنی پاشندگی هوا، بسامد

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 مز منحیط و عدسی در ناحیه‌ای موسوم به نقطه‌ی کانونی مرکز 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 مرکز نماید.

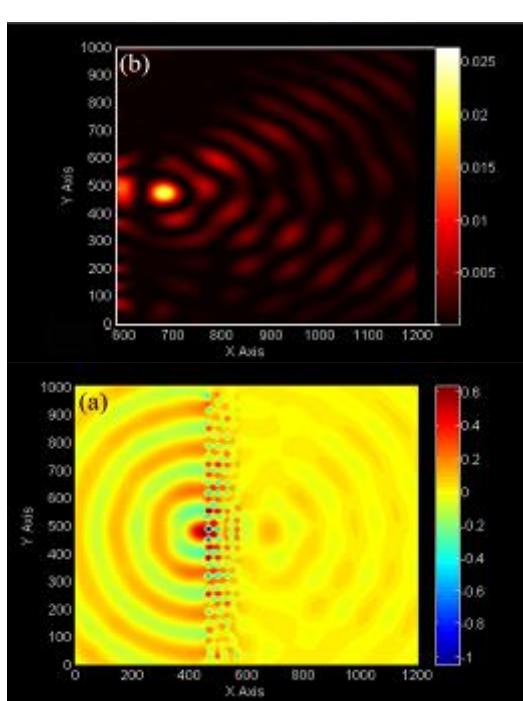
در سال ۱۹۶۸ برای اولین‌بار، دانشمندی روسی بنام وسلاگو^۱ امکان وجود ضریب شکست منفی را مطرح کرد. او با اشاره به این نکته که مقادیر گذردهی الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی از خصوصیات بینایی ماده و تنها پارامترهایی از ماده هستند که در معادله‌ی پاشندگی ظاهر می‌شوند، الکترودینامیک محیطی فرضی با ضریب شکست منفی را مورد بررسی قرار داد [۱۱]. پس از گذشت سه دهه از معرفی محیطی با ضریب شکست منفی، پندری^۲ 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^۳ [۴، ۵] و بلورهای فوتونی [۶، ۷] 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 اتفاف کمتری نسبت به فرامواد هستند و از طرفی رابطه‌ی پاشندگی مدهای بلاخ انتشاری در این بلورهای، می‌تواند به اثرات بسیار جالبی منجر شود. البته نکته‌ی بسیار مهم، نحوه‌ی طراحی و

¹ Veselago

² Pendry

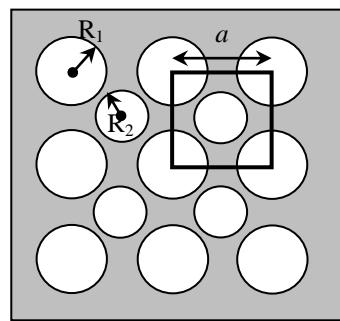
³ Meta-materials



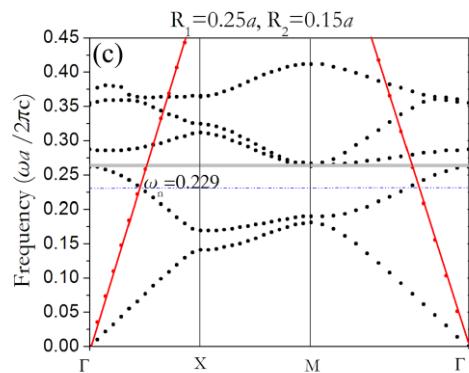
شکل ۳: (الف) توزیع میدان الکتریکی منبع نقطه‌ای که در فاصله‌ی $0/5a$ از سمت چپ بلور فotonی به ضخامت $4a$ واقع شده است و در بسامد نرمال $0/229$ تابش می‌کند. (ب) توزیع شدت میدان الکتریکی متناظر در سمت راست بلور فotonی.

کردن بازتاب از مرز بلور فotonی، ضخامت بلور را مضرب صحیحی از نصف طول موج نور تابشی در نظر گرفته و یک منبع نقطه‌ای را که در بسامد نرمال $0/229$ (بسامد متناظر با محل برخورد منحنی پاشندگی هوا و دومین نوار انرژی بلور فotonی) تابش می‌کند، در فاصله‌ی $0/5a$ از سمت چپ بلور فotonی ترکیبی قرار می‌دهیم. طول ثابت شبکه‌ی بلور فotonی را با توجه به بسامد نرمال و به منظور متمرکز نمودن نور با طول موج 1550 نانومتر، معادل 355 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 فotonی و با فاصله‌ی از مرز بلور تشکیل شده است. یکی از روش‌های محک زدن تفکیک فضایی بلور فotonی، 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



شکل ۱: بلور فotonی دو بعدی با ثابت شبکه‌ی a ، متخلص از حفره‌های هوا به شعاع‌های R_1 و R_2 در محیط دیالکتریک ژرمانیوم.



شکل ۲: ساختار نواری مربوط به بلور فotonی ساخته شده از حفره‌های هوا به شعاع‌های $R_1=0/25a$ و $R_2=0/15a$ در ماده‌ی ژرمانیوم. ناحیه‌ی تیره رنگ، مکان نوار ممنوع بسامد و خطوط رسم شده از نقطه‌ی Γ ، نمودار پاشندگی هوا را نمایش می‌دهند.

مرربوط 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 هم‌سامد بلور فotonی حول نقطه‌ی Γ ، دارای گردایان 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.

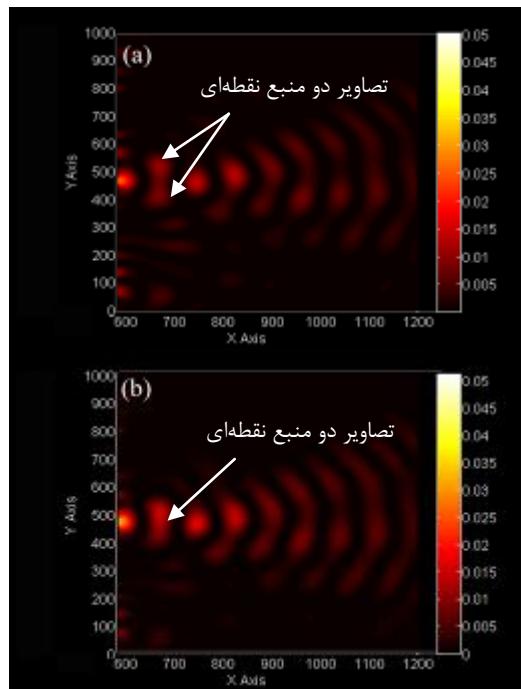
۳- شبیه‌سازی انتشار موج و تشکیل تصویر توسط بلور فotonی

با توجه به ساختار نواری به دست آمده، اکنون چگونگی تشکیل تصویر برای مد TE را برای حالتی که $R_1=0/25a$ و $R_2=0/15a$ باشد، بررسی می‌کنیم. به منظور کمینه

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).



شکل ۴: (الف) توزیع شدت میدان الکتریکی دو منبع نقطه‌ای که در فاصله‌ی $0.5a$ از سمت چپ بلور فوتونی واقع شده و در بسامد نرمال 0.229 تابش می‌کنند، برای حالاتی که فاصله‌ی دو منبع از یکدیگر $2.9a$ و (ب) $3a$ است.

می‌توان به دست آورد. اکنون دو منبع نقطه‌ای نور را در فاصله‌ی $a/5$ از سمت چپ بلور فوتونی قرار می‌دهیم. مطابق شکل (۴)، زمانی که فاصله‌ی دو منبع $a/687.8$ است، تصاویر مربوط به دو منبع قابل تشخیص است، در حالی که برای فاصله‌ی $a/2.9a$ عملاً تفکیک تصاویر غیرممکن می‌شود. بنابراین طبق معیار ریلی، تفکیک فضایی فضایی این ساختار، برابر با $a/687.8$ است که کوچکتر از طول موج 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 مت Shank 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 0.229 کاهش داده و یک مرکز کننده‌ی بلور فوتونی با تفکیک فضایی $0.687.8$ 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