# مهندسي ساختار نواري بلورهاي فوتوني دو بعدي قابل تنظيم

رضائي، بهروز ؛ كلافي ، منوچهر

*پژوهشکده فيزيک کاربردي و ستاره شناسي دانشگاه تبريز، تبريز*

## چکيده

*در اين طرح اثر تزريق بلور مايع و انتقال فاز آن روي خواص گاف فوتوني شبکه مثلثي از ميله هاي تلوريم با استفاده از روش عددي بسط موج تخت بررسي مي شود. نتايج محاسباتي نشان مي دهند که اندازه و موقعيت گافهاي فوتوني باتزريق بلور مايع در بلورهاي فوتوني و انتقال فاز آن بطور موثر تغيير مي يابد.*

## مقدمه

در طي سالهاي اخير بلورهاي فوتوني بدليل دارا بودن خواص نوري فوق العاده توجه زيادي را از هر دو ديدگاه تئوري و عملي به خود جلب کرده اند. مطالعه شکلهاي هندسي مختلف از بلورهاي فوتوني و روشهاي متفاوت براي کنترل پهناي گاف فوتوني آنها يک نکته کليدي در فيزيک اين ساختارها بشمار مي رود. کاربردهاي گوناگوني از بلورهاي فوتوني در توسعه عملکرد ابزارهاي الکترواپتيکي و ميکروموجها مانند ليزرهاي نيمه هادي با بهره بالا ، ديودهاي گسيل نوري ، موجبرها، فيبرهاي نوري و آنتن ها [۱-۵] ارائه شده است. قابل تنظيم بودن گاف نوار فوتوني مي تواند کاربردهاي جديدي از بلورهاي فوتوني را در ابزارهاي الکترو اپتيکي و ميکروموجها ارائه کند. براي بدست آوردن چنين خاصيت قابل تنظيم در اين بلورها از موادي مانند بلورهاي مايع [۶]، نيمه هادي ذاتي [۷] و يا مواد فريت [۸] استفاده مي کنند. ضريب شکست بلورهاي مايع بر اثر دما يا ميدان الکتريکي خارجي تغيير مي کنند. بنابر اين خواص نوري بلورهاي فوتوني قابل تنظيم که بلور مايع در آنها تزريق شده است، بوسيله دما يا ميدان الکتريکي خارجي قابل کنترل خواهد بود. ما در اين تحقيق اثر تزريق بلور مايع و انتقال فاز آن را روي گاف فوتوني شبکه مثلثي از ميله هاي تلوريم بطور نظري مورد بررسي قرار داده ايم. نتايج محاسباتي نشان مي دهند که اندازه و موقعيت گافهاي فوتوني با تزريق بلور مايع در بلورهاي فوتوني و انتقال فاز آن بطور موثر تغيير مي يابد.

## روش محاسبات

براي مطالعه انتشار امواج الکترومغناطيس در بلورهاي فوتوني از معادلات ماکسول استفاده مي کنيم. در چنين ساختارهايي معادله ماکسول براي ميدان مغناطيسي بصورت زير است [۹]:

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

که در آن $c$ سرعت نور، $\omega$ فرکانس، $\varepsilon(\vec{r})$ تابع دي الکتريک وابسته به مکان مي باشد و شرط تناوب شبکه يعني $\varepsilon(\vec{r}+\vec{R}) = \varepsilon(\vec{r})$ را که $\vec{R}$ بردار شبکه فضاي حقيقي است، ارضا مي کند.در يک بلور فوتوني دو بعدي بسته به اينکه ميدان الکتريکي و يا ميدان مغناطيسي موازي با محور ميله ها باشد، موج الکترو مغناطيسي به ترتيب مي تواند به دو مد قطبشي الکتريکي يا مغناطيسي منجر شود. با بسط ميدان مغناطيسي و عکس تابع دي الکتريک بر حسب امواج

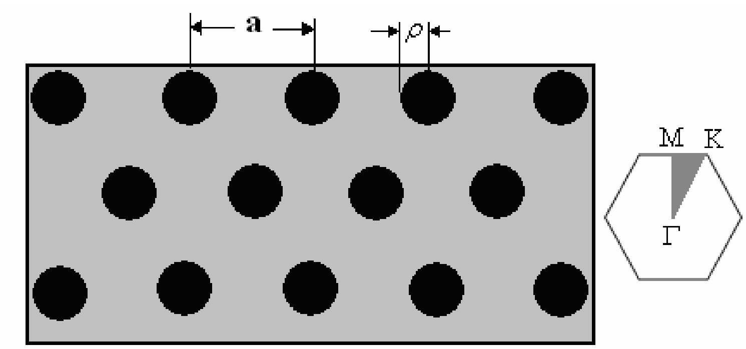
تخت ( معروف به روش بسط موج تخت ) معادله فوق منجر به معادله ويژه مقداري براي قطبش مغناطيسي مي شود كه ماتريس آن بصورت زير است:

$$M_{\vec{G},\vec{G}'} = (\vec{k}+\vec{G})\cdot(\vec{k}+\vec{G}')\eta(\vec{G}-\vec{G}') \qquad (٢)$$

و براي قطبش الكتريكي داريم :

$$M_{\vec{G},\vec{G}'} = |\vec{k}+\vec{G}||\vec{k}+\vec{G}'|\eta(\vec{G}-\vec{G}') \qquad (٣)$$

در معادلات فوق $\eta(\vec{G}-\vec{G}')$ تبديل فوريه عكس تابع دي الكتريك است و در تعيين ساختار باند فوتوني نقش مهمي را ايفا مي كند. ماتريس $M_{\vec{G},\vec{G}'}$ براي هر دو قطبش متقارن بوده و ويژه مقادير آن برابر با $\omega^2/c^2$ مي باشد. شكل١ شبكه مثلثي متشكل از ميله هاي دي الكتريک تلوريم با سطح مقطع دايروي در زمينه بلور مايع و ناحيه بريلوئن مربوطه را نشان مي دهد.




شكل١: شبكه مثلثي ازميله هاي تلوريم در زمينه بلور مايع فاز نماتيک **5CB** و ناحيه بريلوئن مربوطه.

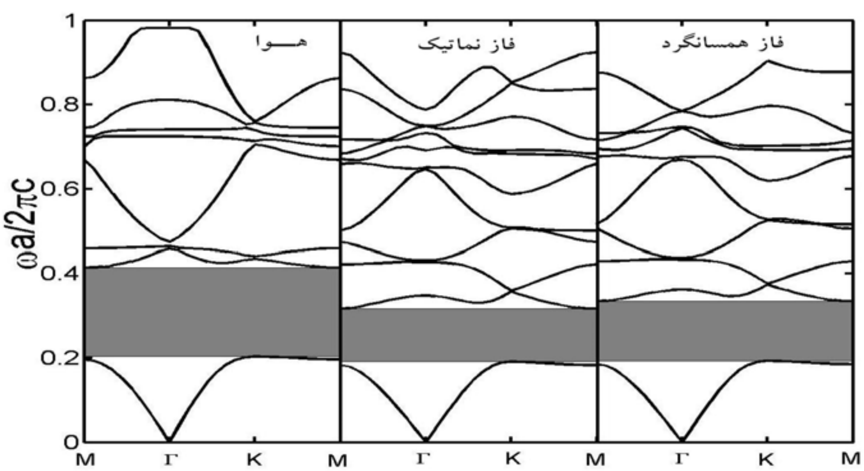
پارامترهاي $\rho$ و $a$ به ترتيب شعاع ميله ها و ثابت شبكه مي باشند. تلوريم و بلور مايع مواد ناهمسانگرد بوده و داراي ضرايب شكست عادي و غير عادي هستند. فرض مي كنيم كه ضريب شكست غير عادي براي ماده تلوريم موازي با محور ميله ها يعني در راستاي محور z و ضريب شكست عادي آن در راستاي عمود بر محور ميله ها باشد. ضرايب شكست عادي و غير عادي تلوريم به ترتيب برابر $n_{oTe}=4.8$ و $n_{eTe}=6.2$ مي باشد. بلور مايع مورد استفاده در اين مسئله از نوع 5CB در فاز نماتيک مي باشد و فرض مي شود كه تمام مولكولهاي آن موازي با محور ميله هاي تلوريم قرار مي گيرند. بلور مايع 5CB در دماي $25^\circ C$ در فاز نماتيک قرار دارد و ضرايب شكست عادي و غير عادي آن به ترتيب برابر $n_{oLC}=1.5$ و $n_{eLC}=1.67$ مي باشد [١٠]. ضريب فوريه عكس تابع دي الكتريک براي اين شبكه بصورت زير است:

$$\eta(\vec{G}) = \begin{cases} \dfrac{1}{\varepsilon_{eLC,oLC}} + \dfrac{\pi\rho^2}{\Omega}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_{eTe,oTe}} - \dfrac{1}{\varepsilon_{eLC,oLC}}\right) & , \quad \vec{G}=0 \\ \dfrac{2\pi\rho}{\Omega G}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_{eTe,oTe}} - \dfrac{1}{\varepsilon_{eLC,oLC}}\right)J_1(rG) & , \quad \vec{G}\neq 0 \end{cases} \qquad (٤)$$

كه در آن $J_1(x)$ تابع بسل نوع اول، $\Omega$ مساحت سلول اوليه است.

## نتايج و بحث

ساختار باند فوتوني از حل عددي معادلات (۲) و (۳) بدست مي آيد.تعداد ۴۴۱ موج تخت در اين محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است که همگرايي را لازم را براي فرکانسهاي مطلوب نتيجه مي دهد. ابتدا شبکه مثلثي از ميله هاي تلوريم در زمينه هوا را در نظر مي گيريم. ساختار باند فوتوني مربوطه بازاي شعاع $\rho = 0.355a$ داراي گاف فوتوني کامل ماگزيمم $\Delta\omega = 0.047(2\pi c/a)$ در محدوده فرکانسي $0.2279 - 0.2749(2\pi c/a)$ مي باشد[۱۱]. حال اگر زمينه را بلور مايع 5CB فاز نماتيک در نظر بگيريم ، نتايج محاسباتي نشان مي دهد که در اين حالت اولاً گاف فوتوني کامل که از همپوشاني گافهاي فوتوني مربوط به قطبشهاي الکتريکي و مغناطيسي بوجود مي آيد، وجود ندارد ، ثانياً گافهاي فوتوني مربوط به قطبش مغناطيسي بر خلاف قطبش الکتريکي چندان قابل ملاحظه نيست. فلذا فقط گافهاي فوتوني مربوط به قطبش الکتريکي را بر حسب شعاع ميله هاي تلوريم بهينه مي کنيم. بررسي جامع نشان مي دهد که گاف فوتوني ماگزيمم قطبش الکتريکي بين باند اول و دوم ($E_1$ ) براي شبکه مثلثي از ميله هاي تلوريم در زمينه بلور مايع فاز نماتيک بازاي شعاع $\rho = 0.15a$ حاصل مي شود که برابر با $\Delta\omega = 0.1254(2\pi c/a)$ است. از آنجائيکه ضريب شکست بلور مايع بوسيله دما قابل کنترل است، فلذا مي توان پهناي اين گاف را با انتقال فاز بلور مايع تغيير داد. بلور مايع 5CB فاز نماتيک در نزديکي دماي اتاق ( $35^\circ C$) از فاز نماتيک به فاز همسانگرد انتقال مي يابد. ضريب شکست بلور مايع در اين فاز برابر $n_{iso} = 1.55$ است. چون مد قطبشي الکتريکي در فاز همسانگرد ضريب شکست کمتري را احساس مي کند، بنابر اين پهناي تمامي گافهاي فوتوني الکتريکي نسبت به مقدار آن در فاز نماتيک افزايش خواهد يافت. شکل ۲ ساختار باند فوتوني شبکه مثلثي از ميله هاي تلوريم را به ترتيب از چپ به راست در زمينه هوا، در زمينه بلور مايع 5CB فاز نماتيک در دماي $25^\circ C$ و در زمينه بلور مايع 5CB فاز همسانگرد در دماي $35^\circ C$ نشان مي دهد.




شکل۲: ساختار باند فوتوني مد الکتريکي براي شبکه مثلثي از ميله هاي تلوريم با شعاع $\rho = 0.15a$ در زمينه هوا (سمت چپ)، در زمينه بلور مايع **5CB** فاز نماتيک در دماي $25^\circ C$ (وسطي) و در زمينه بلور مايع **5CB** فاز همسانگرد در دماي $35^\circ C$.

شعاع ميله هاي تلوريم برابر $\rho = 0.15a$ انتخاب شده است، چون ماگزيمم گاف فوتوني الکتريکي بازاي اين شعاع حاصل مي شود. ملاحظه مي شود که با افزودن بلور مايع فاز نماتيک پهناي گاف فوتوني کاهش يافته و لبه بالاي آن

اندكي به طرف فركانسهاي پايين جابجا شده است. اين كاهش پهنا بدليل افزايش ضريب شكست موثر مي باشد. همچنين ملاحظه مي شود كه با انتقال بلور مايع از فاز نماتيک به فاز همسانگرد پهناي گاف فوتوني و در نتيجه فركانس مركزي آن افزايش يافته است. با توجه به اينكه ميدان الكتريكي براي فركانس لبه بالاي گاف فوتوني از نظر فضايي در دي الكتريک زمينه متمركز مي شود، بنابر اين افزايش بلور مايع و انتقال فاز آن عمدتاً فركانس لبه بالايي گاف فوتوني را تحت تاثير قرار داده و سبب جابجايي آن مي شود. پارامتر قابليت تنظيم $(\omega_{c,2}-\omega_{c,1})/\omega_{c,1}$ براي اين ساختار برابر 3.94% است كه در آن $\omega_{c,1}$ و $\omega_{c,2}$ به ترتيب فركانسهاي مركزي گاف فوتوني قبل و بعد از انتقال فاز بلور مايع مي باشند.

## نتيجه گيري

در اين تحقيق خواص گاف فوتوني شبكه مثلثي از ميله هاي تلوريم در زمينه بلور مايع با استفاده از روش عددي بسط موج تخت مورد بررسي قرار مي گيرد. نتايج محاسباتي نشان مي دهند كه تزريق بلور مايع 5CB فاز نماتيک باعث از بين بردن گاف فوتوني كامل و كاهش پهناي گاف فوتوني قطبش الكتريكي مي شود. با اتقال بلور مايع از فاز نماتيک به فاز همسانگرد پهناي گاف فوتوني قطبش الكتريكي و در نتيجه فركانس مركزي آن افزايش مي يابد. بدين ترتيب گاف فوتوني بوسيله دما قابل كنترل بوده كه از نقطه نظر عملي براي كاربردهاي گوناگون از بلورهاي فوتوني قابل تنظيم مفيد واقع خواهد شد.

## مرجع‌ها


1. M. Loncar, T. Yoshie, A. Scherer, P. Gogna and Y. Qiu, “Low-threshold photonic crystal laser”, *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 2680.
2. Y.-J. Lee, S.-H. Kim, J. Huh, G.-H. Kim, Y.-H. Lee, S.-H. Cho, Y.-C. Kim and Y. R. Do, “A high-extraction-efficiency nanopatterned organic light-emitting diode”, *Applied Physics Letters* **82** (2003) 3779.
3. S. G. Johnson, P.R. Villeneuve, S. Fan and J. D. Joannopoulos, “Linear waveguides in photonic-crystal slabs”, *Phys. Rev. B* **62** (2000) 8212.
4. Philip St. J. Russell, “Photonic crystal fibers”, *Science* **299** (2003) 358.
5. E. R. Brown, C. D. Parker, and E. Yablonovitch, “Radiation properties of a planar antenna on a photonic crystal substrate”, *J. Opt. Soc. Am. B* **10** (1993) 404.
6. Kurt Busch and Sajeev John, “Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum”, *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 967.
7. P. Halevi, F. Ramos-Mendieta, “Tunable Photonic Crystals with Semiconducting Constituents”, *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 1875.
8. Chul-Sik Kee, Jae-Eun Kim, Hae Yong Park, Ikmo Park and H. Lim, “Two-dimensional tunable magnetic photonic crystals”, *Phys. Rev. B* **61** (2000) 15523.
9. M. Plihal and A.A. Maradudin, “Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice”, *Phys. Rev. B* **44**, (1991) 8565.
10. I. C. Khoo, *Liquid crystals*, 1st ed. (John Wiley & Sons, New York, 1995) pp. 51.
11. B. Rezaei, M. Kalafi, “Absolute band gap engineering of anisotropic square and triangular photonic crystals”, Materials Science in Semiconductor Processing (2007) In Press.