بررسي مدهاي موجبري قابل تنظيم در بلور فوتوني دو بعدي

سلطاني والا[1،2] ، علي ؛ رضائي[1] ، بهروز ؛ كلافي ، منوچهر[1،2]
[1] پژوهشكده فيزيک كاربردي و ستاره شناسي، دانشگاه تبريز
[2] دانشكده فيزيک، دانشگاه تبريز

چكيده

مدهاي موجبري در يک بلور فوتوني دو بعدي با شبكه مربعي از حفره هاي هوا در زمينه سيليكون كه شامل يک خط نقص از بلور مايع مي باشد، با استفاده از روش ابر سلول بر پايه روش بسط موج تخت بررسي مي شود. نتايج محاسبات نشان مي دهد كه مدهاي موجبري بدليل تغيير ضريب شكست بلور مايع تحت تاثير ميدان الكتريكي خارجي قابل كنترل است.

مقدمه

در سالهاي اخير بلورهاي فوتوني به دليل اهميت آنها از نقطه نظر كاربردي مانند ليزرهاي نيمه هادي با بهره بالا، ديودهاي گسيل نوري، موجبرها، فيلترهاي نوري [1-4] بطور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند. بلورهاي فوتوني قابل تنظيم از اهميت ويژه اي در سيستم هاي ارتباطات نوري برخوردار هستند و در حال حاضر توجه زيادي را به خود جلب كرده اند. در اين تحقيق يک بلور فوتوني دو بعدي با شبكه مربعي از حفره هاي هوا در زمينه سيليكون را در نظر مي گيريم كه در آن يک رديف از حفره هاي هوا بعنوان يک خط نقص با بلور مايع پر مي شوند. قابليت كنترل مدهاي موجبري كه ناشي از تغيير ضريب شكست بلور مايع بوسيله اعمال ميدان الكتريكي خارجي مي باشد، با استفاده از روش ابرسلول بر پايه روش بسط موج تخت مورد بررسي قرار گرفته است.

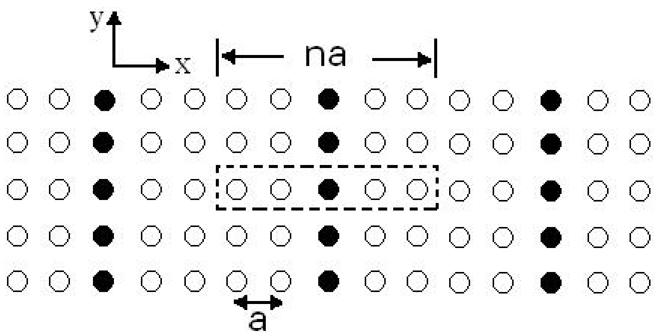
روش محاسبات

به منظور تعيين مدهاي مربوط به خط نقص (معروف به مدهاي موجبري) در يک بلور فوتوني از روش ابرسلول بر پايه روش بسط موج تخت استفاده مي شود [5]. شكل 1 يک بلور فوتوني دو بعدي با شبكه مربعي از حفره هاي هوا در زمينه سيليكون را نشان مي دهد كه در آن يک رديف از حفره هاي هوا در راستاي محورy با ماده ناهمسانگرد بلور مايع 5CB فاز نماتيک پر شده است. از نقطه نظر تقارن، در راستاي محورx تقارن انتقالي از بين رفته ولي در راستاي محور y اين تقارن همچنان وجود دارد. بنابر اين فقط مي توان مدهاي ويژه سيستم را در منطقه بريلوئن سطحي محدود به ناحيه $-\pi / a \le k_y \le \pi / a$ طبقه بندي كرد [6]. ناحيه خط چين در شكل 1 ابر سلول را نشان مي دهد. از تكرار ابر سلول در دو راستاي x و y به ترتيب با بردارهاي پايه $\vec{a}_1 = na\,\hat{x}$ و $\vec{a}_2 = a\,\hat{y}$ (n تعداد حفره هاي هوا و نقص در داخل ابر سلول) ابر ساختار حاصل مي شود(شكل 1).

بررسي انتشار امواج الكترومغناطيسي در بلورهاي فوتوني توسط معادلات ماكسول صورت مي پذيرد كه براي ميدان مغناطيسي بصورت زير است [6]:

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

در معادله فوق c سرعت نور، ω فركانس و $\varepsilon(\vec{r})$ تانسور دي الكتريک وابسته به مكان و داراي تناوب ابرساختار $\varepsilon(\vec{r}+\vec{R}) = \varepsilon(\vec{r})$ مي باشد ($\vec{R} = m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2$ بردار انتقال ابرساختار ، m_1 و m_2 اعداد صحيح



شکل۱ : نمايش شماتيک ابرساختار و ابرسلول مورد استفاده براي محاسبه مدهاي موجبري. دايره هاي پررنگ حفره هاي پر شده با بلور مايع را نشان مي دهد (خط نقص).

هستند). با در نظر گرفتن مبدا مختصات در مرکز حفره نقص تانسور دي الکتريک ابر سلول را ميتوان بصورت زير نوشت:

$$\varepsilon_{ij}(\vec{r}) = \varepsilon_{b\,ij} + (\varepsilon_{LC\,ij} - \varepsilon_{b\,ij})\theta(\rho - |\vec{r}\,|) + + (\varepsilon_{a\,ij} - \varepsilon_{b\,ij}) \sum_{s=-n/2,\ s\neq 0}^{n/2} \theta(\rho - |\vec{r} - \vec{r}'_s|) \qquad (i,j) = (x,y) \qquad (۲)$$

در رابطه فوق $\varepsilon_{a\,ij}$ و $\varepsilon_{b\,ij}$ به ترتيب عناصر تانسوري حفره هاي هوا و ماده زمينه بوده و بصورت حاصضرب ماتريس واحد در ثابت دي الکتريک آنها تعريف مي شود. ρ شعاع حفره هاي هوا و $\vec{r}'_s = sa\,\hat{x}$ موقعيت آنها در داخل ابرسلول را نشان مي دهد. $\varepsilon_{LC\,ij}$ مولفه هاي تانسور دي الکتريک بلور مايع مي باشند. با فرض اينکه مولکولهاي بلور مايع موازي با صفحه تناوب بلور فوتوني دو بعدي باشند، مي توان نوشت [۷]:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon^{o}\sin^2(\theta) + \varepsilon^{e}\cos^2(\theta) \quad , \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon^{o}\cos^2(\theta) + \varepsilon^{e}\sin^2(\theta) \qquad (۳)$$
$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xy} = (\varepsilon^{e} - \varepsilon^{o})\sin(\theta)\cos(\theta)$$

در روابط فوق $\varepsilon^{o} = (n^{o})^2$ و $\varepsilon^{e} = (n^{e})^2$ که n^{o} و n^{e} به ترتيب ضرايب شکست عادي و غير عادي بلور مايع و θ نيز زاويه دوران مولکولهاي بلور مايع را نسبت به محور x نشان مي دهد که تحت تاثير ميدان الکتريکي خارجي دوران يافته است. با بسط ميدان مغناطيسي و تانسور دي الکتريک بر حسب امواج تخت معادله (۱) براي قطبش مغناطيسي به معادله ويژه مقداري زير منجر مي شود:

$$\sum_{\vec{G}'} H_{\vec{G},\vec{G}'} h(\vec{G}') = \omega^2 / c^2 \, h(\vec{G}) \qquad (۴)$$

که در آن

$$H_{\vec{G},\vec{G}'} = \varepsilon_{xx}{}^{-1}(\vec{G}-\vec{G}')(k_y+G_y)(k_y+G'_y) + \varepsilon_{yy}{}^{-1}(\vec{G}-\vec{G}')(k_x+G_x)(k_x+G'_x) - \varepsilon_{xy}{}^{-1}(\vec{G}-\vec{G}')(k_y+G_y)(k_x+G'_x) - \varepsilon_{yx}{}^{-1}(\vec{G}-\vec{G}')(k_x+G_x)(k_y+G'_y) \qquad (۵)$$

در رابطه فوق G_x و G_y مولفه هاي بردار انتقال شبکه وارون ابرساختار بوده و عبارتند از:

$$G_x = \frac{2\pi}{na} l_1 \ , \ G_y = \frac{2\pi}{a} l_2$$ (l_1 و l_2 اعداد صحيح هستند)

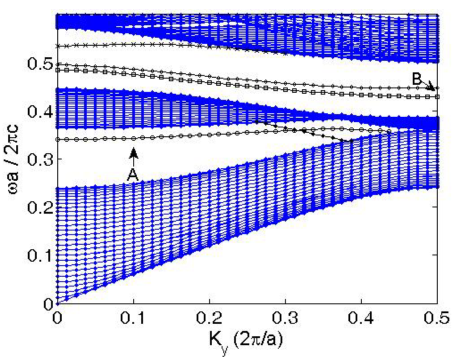
ميتوان نشان داد که ضرايب فوريه تانسور دي الکتريک بصورت زير است:

$$\varepsilon_{ij}(G)=\varepsilon_{bij}\delta_{G,0}+(\varepsilon_{LCij}-\varepsilon_{bij})2f\,\frac{J_1(\rho G)}{\rho G}+(\varepsilon_{aij}-\varepsilon_{bij})2f\,\frac{J_1(\rho G)}{\rho G}\sum_{s=-n/2,\,s\neq 0}^{n/2}e^{-iG_x r'_s} \quad (۶)$$

در رابطه فوق $f=\pi\rho^2/A_{sc}$ عامل پر شدگي ، $A_{sc}=na^2$ مساحت ابرسلول و $J_1(x)$ تابع بسل مرتبه اول مي باشد. مشکل اصلي در بدست آوردن مقادير ويژه معادله (۴) تعيين مولفه هاي ضرايب فوريه عکس تانسور دي الکتريک است. براي اين منظور ابتدا ماتريس ضرايب فوريه مولفه هاي تانسور دي الکتريک را محاسبه کرده و سپس وارون آنرا در معادله (۴) بکار مي بريم.

بحث و نتايج

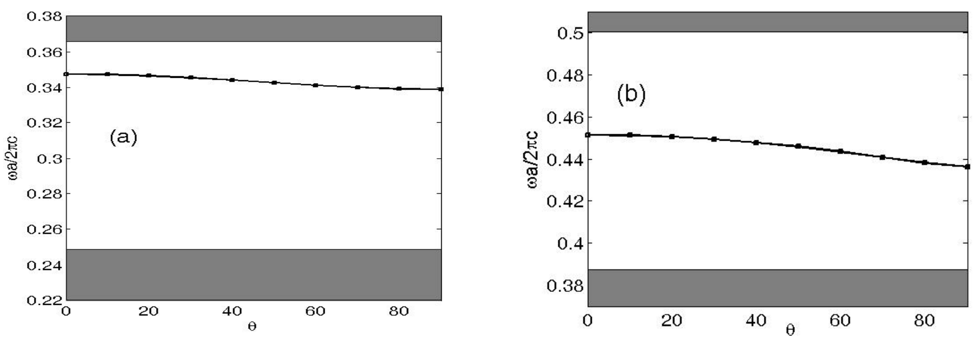
از حل عددي معادله (۴) مدهاي موجبري بدست مي آيند. لازم بذکر است که اندازه ابرسلول بايد چنان انتخاب شود که مدهاي موجبري مستقل از آن باشد. در اين محاسبات تعداد هشت حفره هوا و يک حفره نقص در داخل ابرسلول در نظر گرفته شده است و تعداد امواج تخت مورد استفاده برابر ۳۲۴۹ است که همگرايي مطلوب براي فرکانسهاي ويژه سيستم حاصل مي شود. بلور فوتوني دو بعدي با آرايش مربعي شامل حفره هاي هوا با ثابت دي الکتريک $\varepsilon_a=1$ و شعاع $\rho=.475a$ در زمينه سيليکون با ثابت دي الکتريک $\varepsilon_b=12$ مي باشد. ضرايب شکست عادي و غير عادي بلور مايع ناهمسانگرد به ترتيب $n^o=1.49$ و $n^e=1.66$ مي باشند. شکل ۲ پاشندگي موجبري را نشان مي دهد که در آن نواحي پررنگ مربوط به ساختار باند بلور فوتوني کامل در ناحيه بريلوئن سطحي است و مدهاي حاصل از نقص خطي در داخل نواحي ممنوعه فرکانسي (نواحي سفيد رنگ) رسم شده اند. اين مدها حالتهاي مجاز فرکانسي را در داخل ناحيه ممنوع فرکانسي نشان ميدهند که نور مي تواند فقط در راستاي خط نقص منتشر شود. بنابر اين، اين سيستم بعنوان يک موجبر عمل خواهد کرد.



شکل۲ : مدهاي موجبري در بلور فوتوني مربعي براي جهت گيري $\theta=45^\circ$ از مولکولهاي بلور مايع

اين منحني پاشندگي مربوط به حالتي است که در آن مولکولهاي بلور مايع تحت ميدان الکتريکي خارجي در راستاي $\theta=45^\circ$ قرار گرفته اند. از آنجائيکه کنترل مدهاي موجبري اهميت فراواني در سيستمهاي ارتباطات نوري دارد، براي اين منظور ميزان تغيير موقعيت فرکانسي مدهاي موجبري را با توجه به جهت گيري مولکولهاي بلور مايع مورد بررسي قرار مي دهيم. شکل ۳ وابستگي مدهاي موجبري بر حسب زايه θ را بازاي دو مقدار $k_y=0.1(2\pi/a)$

و $k_y = 0.5(2\pi / a)$ نشان مي دهد كه در شكل ۲ با نقاطA و B مشخص شده اند. چنين خاصيت قابل تنظيم در مدهاي موجبري مي تواند بعنوان فيلترهاي نوري مورد استفاده قرار گيرد. بازه تغييرات مدهاي موجبري در شكل ۳-a مابين فركانسهاي $a / \lambda = .3387$ و $a / \lambda = .3473$ و در شكل ۳-b در محدوده فركانسي $a / \lambda = .4362$ و $a / \lambda = .4513$ قرار مي گيرد. براي مثال در شكل ۳-b با انتخاب ثابت شبكه برابر $a = 0.5\,\mu m$ طول موج قابل تنظيم در محدوده $1.1463\,\mu m$ و $1.1079\,\mu m$ تغيير مي كند.



شكل۳ : تغييرات موقعيت فركانسي مدهاي موجبري برحسب زاويه دوران θ بازاي **(a)** $k_y = 0.1(2\pi / a)$ و **(b)** $k_y = 0.5(2\pi / a)$

نتيجه گيري

با بكارگيري بلور مايع ناهمسانگرد براي ايجاد خط نقص در بلور فوتوني دو بعدي اين امكان فراهم مي شود كه با اعمال ميدان الكتريكي خارجي بتوان مدهاي موجبري را كنترل كرد. نتايج مدل بندي نشان مي دهد كه وابستگي موقعيت فركانسي مدهاي موجبري به سمتگيري بلور مايع قابل ملاحظه است. اين موضوع مي تواند بعنوان فيلترهاي نوري در سيستمهاي ارتباطات نوري بكار گرفته شود.

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”, *Appl. Phys. Lett.* **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. C. Chen, X. Li, H. Li, K. Xu, J. Wu and J. Lin, “Bandpass filters based on phase-shifted photonic crystal waveguide gratings”, *Optics Express* 15 (2007) 11278.
5. F. Ramos-Mendieta, P. Halevi, “Surface electromagnetic waves in two-dimensional photonic crystals: Effect of the position of the surface plane”, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 15112.
6. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton), 1995.
7. H. Takeda and K. Yoshino, “Tunable refraction effects in two-dimensional photonic crystals utilizing liquid crystals”, *Phys. Rev. E* **67** (2003) 056607.