



کنترل گاف باند بلورهای فوتونی شامل نیمرساناهای چاه کوانتمومی از InGaAs/InAs طریق دمش نوری

مهشید مختارنژاد، حبیب تجلی و صمد روشن انتظار

دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز، گروه اتمی و مولکولی

چکیده - در این مقاله تأثیر زاویه تابش در ضریب بازتاب و گاف باند بلور فوتونی متشکل از نیم رساناهای چاه کوانتمومی *InGaAs/InAs* تحت تابش یک پالس قوی دمشی فمتوثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که به علت اثر اشتارک اپتیکی و کنترل فرکانس تشدید اکسیتون، گاف باند این بلور قابل کنترل می‌شود. این گاف باند قابل کنترل توسط اثر اشتارک، می‌تواند در طراحی کلیدها و فیلترهای نوری مفید باشد. به دلیل ابعاد کوچک معرفی شده، این ساختار قابلیت زیادی در مدارات مجتمع نوری و سیستم‌های مخابرات نوری دارد.

کلید واژه- بلور فوتونی، اثر اشتارک، گاف باند، کلید نوری

Using optical pulse pump to Control band gap of photonic crystals containing InGaAs/GaAs semiconductor quantum wells

Mahshid Mokhtarnejad¹, Habib Tajali¹, and Samad Roshan entezar¹

¹ Department of physics, University of Tabriz, Tabriz

Abstract- In this paper, the effect of incident angle on reflectivity and the active band gap of a one-dimensional resonant photonic crystal containing InGaAs/GaAs semiconductor quantum wells is discussed. The photonic crystal is excited by a strong external femtosecond pump pulse with a frequency close to the exciton resonance frequency. The results show that owing to the optical Stark effect and control of the exciton resonance frequency, the crystal band gap can be controlled. This band gap that is controlled by the Stark effect, can be useful to design optical switches and filters. Due to the small size of the introduced structure, it has the capacity to utilize in the optical integrated circuits and optical telecommunication systems.

Keywords: Photonic crystal, Stark effect, Band gap, Optical switch

روش ماتریس انتقال، یک روش ساده برای محاسبه و بررسی گاف باند بلورهای فوتونی یک بعدی است. با استفاده از این روش دامنه امواج تابشی و بازتابی ورودی توسط ماتریس انتقال کل، که مشتمل از حاصل ضرب ماتریس انتقال تک تک لایه ها می باشد به دامنه میدان عبوری بصورت زیر مرتبط می شود:

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن E_i و E_r دامنه میدان تابشی و بازتابی و M_{ij} دامنه میدان عبوری از ساختار است [۹]. با توجه به اینکه در مرز بین دو محیط، میدان الکتریکی و مغناطیسی باید در شرایط مرزی صدق کنند با استفاده از این شرایط مرزی می توان میدان ورودی و خروجی از یک لایه را توسط ماتریس انتقال به همدیگر ارتباط داد. در بلور فوتونی یک بعدی مشتمل از چاه و سد کوانتمومی، ماتریس انتقال به شکل زیر خواهد بود [۱۰]:

$$Z = Z_x Z_{xw} Z_w Z_{wx} Z_x \quad (2)$$

که در آن، Z_x ماتریس انتقال سد محدود به چاه کوانتمومی است:

$$Z_x = e^{i\phi_b} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

فاز ϕ_b برابر است با:

$$\phi_b = \omega n_b d_b \cos \theta_b / c \quad (4)$$

ماتریس پراکندگی موج الکترومغناطیسی در سطح مشترک بین سد و چاه پتانسیل بوده و برابر است با:

$$Z_{xw} = Z_{wx}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\rho} & \frac{\rho}{1+\rho} \\ \frac{\rho}{1+\rho} & \frac{1}{1+\rho} \end{pmatrix} \quad (5)$$

در رابطه فوق ρ ثابت بازتاب فرنل می باشد. Z_w ماتریس انتقال مربوط به چاه کوانتمومی است که به صورت زیر داده می شود:

$$Z_w = i \tilde{\zeta} \begin{pmatrix} e^{i\phi_w(i\tilde{\zeta}-1)} & -1 \\ 1 & e^{-i\phi_w(i\tilde{\zeta}+1)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

که $\tilde{\zeta}$ و ϕ_w در آن برابر است با:

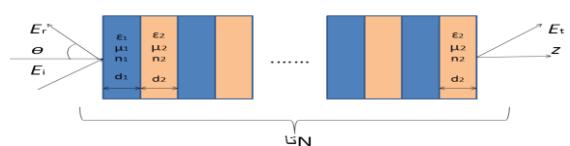
۱- مقدمه

بلورهای فوتونی، ساختارهایی با توزیع ضریب شکست متغیر هستند که اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط رایلی معرفی شدند [۱-۲]. نیاز مبرم به استفاده از بلورهای فوتونی در ادوات نوری را می توان در یک کلمه، یعنی "مهندسی فوتون" که به انتشار فوتون در مقیاس طول موج دلالت دارد، خلاصه کرد. برای بالابردن سرعت انتقال و پردازش اطلاعات، استفاده از ابزارهای تمام نوری بجای الکترون یک امر ضروری است. مهمترین ویژگی بلورهای فوتونی وجود یک بازهٔ فرکانسی از امواج الکترومغناطیسی است که اجازه انتشار در بلور را ندارند. این نواحی مجاز و غیر مجاز عبوری در ساختار بلور فوتونی در طراحی میکروکاواک های لیزری، فیلترها و کلیدهای نوری مورد استفاده قرار می گیرند [۳-۵].

در این مقاله، گاف باند بلور فوتونی مشتمل از نیم رساناهای چاه کوانتمومی InGaAs/InAs در حال تشديد با تراز اکسیتونی، در دو حالت یعنی بدون اعمال دمش و سپس تحت تابش یک پالس قوی دمشی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از معادلات ماکسول و پیوسنگی مؤلفه های مماسی میدان و روش ماتریس انتقال استفاده شده است. برخلاف گاف باند فوتونی غیرفعال معمولی، وقتی اکسیتون های چاه کوانتمومی با تناوب برآگ، تحت تابش پالس قوی اپتیکی با فرکانس نزدیک به فرکانس اکسیتونی قرار می گیرد، انتظار می رود که موقعیت و پهنه ای گاف باند فوتونی از طریق پدیده اشتارک مدوله زمانی شده، بازتابندگی را از حالت تشديد با اکسیتون خارج سازد. در نتیجه با استفاده از تابش نور دمشی و فراهم سازی پدیده اشتارک برای ترازهای اکسیتونی، گاف باند این بلور را می توان تحت کنترل قرار داد [۶-۸].

۲- محاسبه گاف باند توسط ماتریس انتقال

طرح شماتیک ساختار بلور فوتونی یک بعدی مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: بلور فوتونی مشتمل از N سلول شامل ۲ لایه متناوب با ضریب شکست مختلف

خواص اپتیکی سد InAs برابر است با:

$\epsilon_0 = 12.3$ ثابت دی الکتریکی، $m_{eff} = 0.023m_0$ جرم مؤثر، m_0 : جرم سکون الکترون) و T : دما(کلوین)

انرژی باند گاف: E_g

$$E_g = 0.415 - 2.76 \times 10^{-4} T^2 / (T + 83) (eV)$$

تعداد حاملهای ذاتی: N

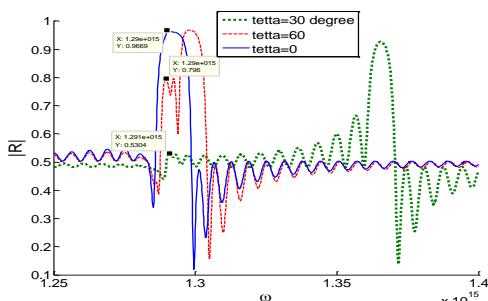
$$N = 1.46 T^{1.5} \cdot 10^{20} \cdot \exp(E_g / (2K_B T)) (cm^{-3})$$

خواص اپتیکی چاه InGaAs برابر است با:

$$E_g = 0.15 + (0.43 \times 10^{-3}) / T (eV), m_{eff} = 0.014m_0, \epsilon_0 = 15.7$$

$N = 2.9 \times 10^{11} (2400 - T)^{3/4} \cdot (1 + 2.7 \times 10^{-4}) T^{3/2} \cdot \exp(-0.129 - 1.5 \times 10^{-4} T) / (2K_B T)$ مقدار فاکتور اتلاف (γ) را برابر $0.05\omega_p(T)$ قرار می‌دهیم.

حال بازتابندگی $|R| = |r|^2$ را مطابق رابطه (۱۰) برای نمونه انتخابی در محدوده فرکانسی $0.828 \text{--} 0.885$ تا $\Theta=30^\circ, \Theta=60^\circ$ و $\Theta=0^\circ$ رسم می‌کنیم (شکل (۲)). اکسیتون فعل نمونه انتخابی در 10° درجه کلوین در 0.86 الکترون ولت قرار دارد. همانطوری که از شکل (۲) برمی‌آید، قله بازتابندگی در غیاب دمش برای $\Theta=0^\circ$ در فرکانس 0.86 الکترون ولت (فرکانس تشديد 1.29×10^{15} هرتز) می‌باشد. با تغيير زاويه ورودی، سيستم از حالت تشديد با اکسیتون خارج شده و بازتابندگی در اين فرکانس کاهش می‌يابد.



شکل ۲: بازتابندگی چاه کوانتمی چاه InGaAs/GaAs در دوره ۲۰۰ دوره ای برای زاویه تابش $\theta=0^\circ$ (نمودار آبی)، $\theta=30^\circ$ (قرمز نقطه چین) و $\theta=60^\circ$ (نمودار سبز خط چین) می‌باشد.

شکل (۳) وضعیت بازتابندگی سیستم را به همراه پالس دمش برای 3° زاویه تابش متفاوت ($\Theta=0^\circ, \Theta=30^\circ, \Theta=60^\circ$ و $\Theta=90^\circ$) مشاهده می‌شود که با اعمال دمش،

$$\phi_w = \omega n_w d_w \cos \theta_w / c \quad \text{و} \quad \Im = \frac{\Gamma_0}{\omega + \omega_0 + i\gamma} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ω فرکانس نور ورودی، ω_0 فرکانس تشديد اکسیتون، Γ_0 نرخ واپاشی تابشی و γ نرخ واپاشی غيرتابشی اکسیتون است [۱۱-۱۲].

اگر هر دو سمت ساختار شکل (۱) به سد منتهی شود، ماتریس انتقال کل بلور فوتونی یک بعدی برای ساختار N لایه‌ای عبارت خواهد بود از:

$$Z_N = Z_x Z^N Z_x \quad (8)$$

در نتیجه، ماتریس انتقال کل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z_N = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \quad (9)$$

باتوجه به رابطه (۸) ضریب بازتابش برابر خواهد بود با:

$$r = -Z_{21}/Z_{22} \quad (10)$$

برای زاویه تابشی ورودی صفر، ضریب بازتابش قبل محاسبه شده است [۱۳]. در اینجا می‌خواهیم تأثیر تغيير زاویه تابش در ضریب بازتابش و لذا کنترل گاف باند توسط پالس پمپاز را بررسی کنیم.

۳- نتایج و بررسی

در این مقاله فرض شده است که ساختار مورد بررسی شامل ۲۰۰ دوره از چاههای InGaAs و سدهای InAs است که به ترتیب دارای پهنای 7 نانومتر $233/3$ نانومتر می‌باشند. گذردهی نسبی InGaAs و InAs مقداری مختلط و وابسته به دما است که به وسیله مدل درود تعريف می‌شود [۱۴-۱۵].

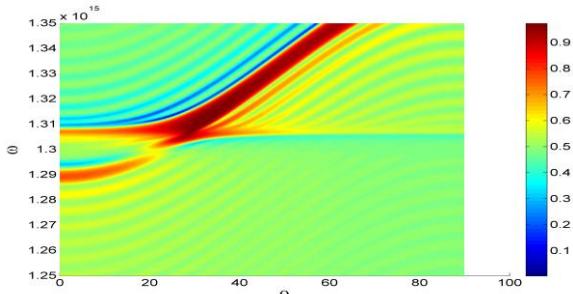
$$\varepsilon(\omega, T) = \varepsilon_\infty - \frac{(\omega_p(T))^2}{\omega^2 - i\omega\gamma(T)} \quad (11)$$

که در آن:

$$\omega_p(T) = 2\pi f_p(T) = \sqrt{\frac{\bar{N}(T)e^2}{\varepsilon_0 m^*}} \quad (12)$$

ω_p گذردهی الکتریکی در فرکانسهای بالا، m^* جرم موثر، e بار الکتریکی و $\bar{N}(T)$ چگالی حاملهای ذاتی می‌باشد. ارتباط دمایی در گذردهی به وسیله فاکتور اتلاف ($\gamma(T)$) و فرکانس پلاسمای $\omega_p(T)$ بیان می‌شود.

فرکانسی در بازه $\Omega = 1/292 \times 10^{15}$ تا $\Omega = 1/29 \times 10^{15}$ و همچنین $\Omega = 1/306 \times 10^{15}$ تا $\Omega = 1/309 \times 10^{15}$ هرتز وجود دارد. با اعمال پالس دمش، یک جابجایی قابل ملاحظه در گاف باند اپتیکی بلور فوتونی مطابق شکل(۵) مشاهده می‌شود. پس از اعمال دمش نوری، گاف باند بلور کنترل شده و مکان نواحی فرکانسی غیرمجاز و مجاز تغییر می‌یابد.



شکل ۵: نواحی قرمز، گاف باند بلور فوتونی متشكل از نیم رساناهای چاه کوانتمومی InGaAs/InAs که تحت پالس دمش قرار دارد، می‌باشد.

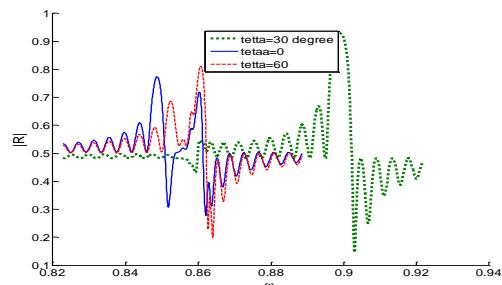
۴- نتیجه‌گیری

با بررسی گاف باند فوتونیکی بلور فوتونی متشكل از نیم رساناهای چاه کوانتمومی InGaAs/InAs و اعمال اثر اشتارک اپتیکی، نشان داده شد که گنجاندن بلور شامل چاه کوانتمومی و بررسی تغییرات فرکانسی و زاویه تابش، منجر به مکانیزم جدیدی برای ایجاد و کنترل گاف‌باندهای فوتونیکی می‌شود. پس از اعمال دمش نوری توسط لیزر فوتونیکی، مکان نواحی فرکانسی غیرمجاز و نواحی مجاز تغییر می‌یابد که بدین صورت از این روش برای ساخت و گسترش فیلترها و کلیدهای نوری فوق سریع می‌توان بهره جست.

مراجع

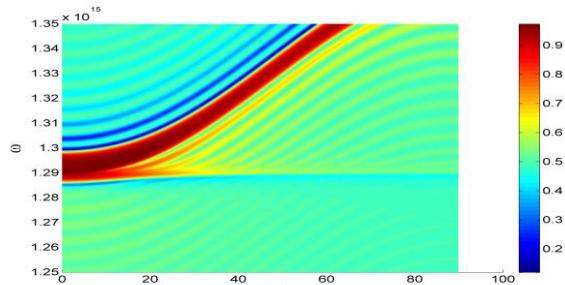
- [1] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2059.
- [2] S. John, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2486.
- [3] Y. Chen, *Appl. Phys.* 42 (2009) 3727.
- [4] M. D. Javid, A. Ghaffari, F. Monifi, M. S. Abrishamian, *Journal of Applied Science* 53 (2008) 1891.
- [5] S. V. Zhokovsky, A. G. Smirnov, *Phys. Rev. A*, 83 (2011) 023818.
- [6] E. Waks, J. vuckovic, *Optics Express*, 13 (2005) 5064.
- [7] W. J. Johnson, *Appl. Phys.* 101 (2007) 461.
- [8] J. Gansen, K. Jarasinskas, L. Smirl, *Appl. Phys. Lett.* 6 (2002) 11.
- [9] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, (1988), John Wiley and sons, NewYork .
- [10] H. Ch. Hung, Ch. J. Wu, Sh. J. Chang, *App. Phys.* 110 (2011) 093110.
- [11] T. Wang, D. Sh. Gao, *Chinese Science Bulletin*, 54 (2009) 3664.
- [12] T. wang, G. Li, Zhi Chen, *Optics Express*, 16 (2008) 127.
- [13] M. Mokhtarnejad, S. Roshan entezar, H. Tajali, *Annual Physics Conference of Iran*, 30 (2013) 894.
- [14] V. Kumar, Kh. S. Singh, *Indian. J. Phys.* 85 (2011) 1811.
- [15] H. Ch. Hung, Ch. J. Wu, *Appl. Phys.* 110 (2011) 093110

سیستم درین زوایا از حالت تشدید با اکسیتیون خارج شده و بازتابندگی در این فرکانس کاهش می‌یابد و سیستم به عنوان عبور دهنده نور عمل می‌کند.



شکل ۶: طیف بازتابندگی پس از اعمال دمش برای زاویه تابش $\Theta = 0^\circ$ (نمودار آبی)، $\Theta = 30^\circ$ (قرمز نقطه چین) و $\Theta = 60^\circ$ (نمودار سبز خط چین) می‌باشد.

بارسم گاف باند برای بلور متشكل از نیم رساناهای چاه کوانتمومی InGaAs/InAs توسط ضریب بازتابش (رابطه ۱۰) مناطق متنوعه فرکانسی مطابق شکل(۴) بدست می-آیند. تأثیر زاویه ورودی در گاف باند این بلور در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۷: نواحی قرمز، نمودار گاف باند فوتونیکی بلور فوتونی متشكل از نیم رساناهای چاه کوانتمومی InGaAs/InAs است.

نواحی رنگی گاف باندهای غیرمجاز و نواحی سفید باندهای مجاز می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای زاویه ورودی صفر ($\Theta = 0^\circ$) شاهد منطقه متنوعه فرکانسی در بازه $\Omega = 1/298 \times 10^{15}$ تا $\Omega = 1/287 \times 10^{15}$ هرتز هستیم. حال اگر سیستم را تحت پالس دمش قرار دهیم با توجه به اثر اشتارک اپتیکی، جابجایی فرکانسی محسوسی در نمودار گاف باند مشاهده می‌شود و بدین ترتیب سیستم قابلیت پیدا می‌کند تا به عنوان فیلتر یا کلید نوری عمل کند. شکل(۵) وضعیت گاف باند سیستم تحت پالس دمش می‌باشد که نواحی تیره رنگ، گاف باندهای غیرمجاز و نواحی روشن باندهای مجاز می‌باشند. به ازای زاویه ورودی صفر ($\Theta = 0^\circ$) دو منطقه متنوعه