



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



کنترل گاف باند بلورهای فوتونی شامل نیم رساناهای چاه کوانتومی InGaAs/InAs از 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 درضریب بازتاب و گاف باند بلور فوتونی متشکل از نیم رساناهای چاه کوانتومی 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، کلیدنوری

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

۱- مقدمه

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 متشکل از حاصل ضرب ماتریس انتقال تک تک لایه ها می باشد به دامنه میدان عبوری بصورت زیر مرتبط می‌شوند:

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

که در آن E_i و E_r دامنه میدان تابشی و بازتابی و E_t 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 می‌توان میدان ورودی و خروجی از یک لایه را توسط ماتریس انتقال به همدیگر ارتباط داد. در بلور فوتونی یک بعدی متشکل از چاه و سد کوانتومی، 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 کوانتومی است:

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

فاز ϕ_b برابر است با:

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

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

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

در رابطه فوق ρ ثابت بازتاب فرنل می‌باشد. Z_w ماتریس انتقال مربوط به چاه کوانتومی است که به صورت زیر داده می‌شود:

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

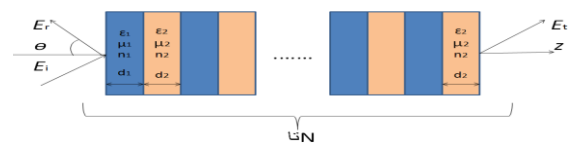
که $\tilde{\alpha}$ و $\tilde{\phi}_w$ در آن برابر است با:

بلورهای فوتونی، ساختارهایی با توزیع ضریب شکست متفاوت هستند که اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط رایلی معرفی شدند [۱-۲]. نیاز مبرم به استفاده از بلورهای فوتونی در ادوات نوری را می‌توان 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 بازه 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 میکروکاوک‌های لیزری، فیلترها و کلیدهای نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۵].

در این مقاله، گاف باند بلور فوتونی متشکل از نیم رساناهای چاه کوانتومی InGaAs/InAs در حال تشدید 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 پیوستگی مؤلفه‌های مماسی میدان و روش ماتریس انتقال استفاده شده است. برخلاف گاف باند فوتونی غیرفعال معمولی، وقتی اکسیتون‌های چاه کوانتومی با تناوب براگ، تحت تابش پالس قوی اپتیکی با فرکانس نزدیک به فرکانس اکسیتونی قرار می‌گیرد، انتظار می‌رود که موقعیت و پهنای گاف باند فوتونی از طریق پدیده اشتراک مدوله زمانی شده، بازتابندگی را از حالت تشدید با اکسیتون خارج سازد. در نتیجه با استفاده از تابش نور دمشی و فراهم‌سازی پدیده اشتراک برای ترازهای اکسیتونی، گاف باند این بلور را می‌توان 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 متشکل از N سلول شامل لایه متناوب با ضریب شکست مختلف

خواص اپتیکی سد InAs برابر است با:

$\epsilon_0 = 12.3$ ثابت دی‌الکتریک، $m_{eff} = 0.023m_0$ (جرم مؤثر، m_0 : جرم سکون الکترون) و T : دما (کلوین)
 E_g انرژی باند گاف:

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

N تعداد حاملهای ذاتی:

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

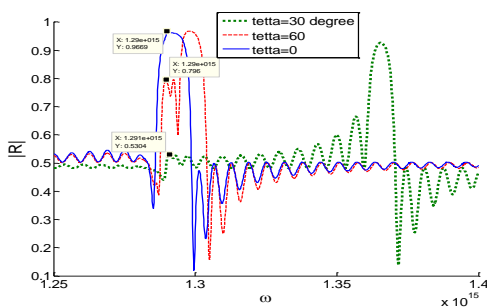
خواص اپتیکی چاه InGaAs برابر است با:

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

$$N = 2.9 \times 10^{11} (2400 - T)^{3/4} \cdot (1 + 2.7 \times 10^{-4} T)^{3/2} \cdot \exp(-0.129 - 1.5 \times 10^{-4} T / (2 \cdot K_B T))$$

مقدار فاکتور اتلاف $\gamma(T)$ را برابر $0.05\omega_p(T)$ قرار می‌دهیم.

حال بازتابندگی $R = |r|^2$ را مطابق رابطه (۱۰) برای نمونه انتخابی در محدوده فرکانسی ۰/۸۲۸ تا ۰/۸۸۵ الکترون ولت برای ۳ زاویه تابش متفاوت ($\theta = 0, \theta = 30, \theta = 60$) و $\theta = 60$ رسم می‌کنیم (شکل (۲)). اکسیتون فعال نمونه انتخابی در ۱۰ درجه کلوین در ۰/۸۶ الکترون ولت قرار دارد. همانطوری که از شکل (۲) برمی‌آید، قله بازتابندگی در غیاب دمش برای $\theta = 0$ در فرکانس ۰/۸۶ الکترون ولت (فرکانس شدید $(1.29 \times 10^{15} / \text{هرتز})$) می‌باشد. با تغییر زاویه ورودی، سیستم از حالت شدید با اکسیتون خارج شده و بازتابندگی در این فرکانس کاهش می‌یابد.



شکل ۲: بازتابندگی چاه کوانتومی InGaAs/GaAs ۲۰۰ دوره ی زاویه تابش $\theta = 0$ درجه (نمودار آبی)، $\theta = 30$ (قرمز نقطه چین) و $\theta = 60$ (نمودار سبز خط چین) می‌باشد.

شکل (۳) وضعیت بازتابندگی سیستم را به همراه پالس دمش برای ۳ زاویه تابش متفاوت ($\theta = 0, \theta = 30, \theta = 60$) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با اعمال دمش،

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

در رابطه (۷)، ω فرکانس نور ورودی، ω_0 فرکانس تشدید اکسیتون، Γ_0 نرخ واپاشی تابشی و γ نرخ واپاشی غیرتابشی 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 قبلاً محاسبه شده است [۱۳]. در اینجا می‌خواهیم تأثیر تغییر زاویه تابش در ضریب بازتابش و لذا کنترل گاف باند توسط پالس پمپاژ 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 ۷ نانومتر $233/3$ نانومتری - باشند. گذردهی نسبی InGaAs و InAs مقداری مختلط و وابسته به دما است که به وسیله مدل درود تعریف می‌شود [۱۴-۱۵].

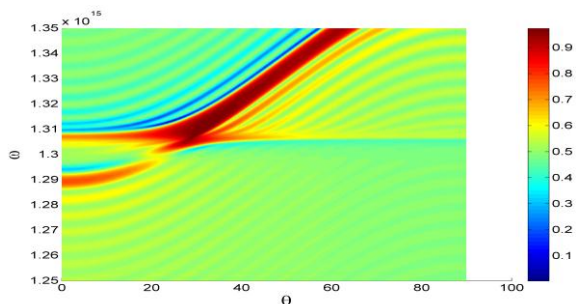
$$\epsilon(\omega, T) = \epsilon_\infty - \frac{(\omega_p(T))^2}{\omega^2 - i\omega\gamma(T)} \quad (11)$$

که در آن:

$$\omega_p(T) = 2\pi f_p(T) = \sqrt{\frac{N(T)e^2}{\epsilon_0 m^*}} \quad (12)$$

ϵ_∞ گذردهی الکتریکی در فرکانسهای بالا، m^* جرم مؤثر، e بار الکتریکی و $N(T)$ چگالی حاملهای ذاتی می‌باشد. ارتباط دمایی در گذردهی به وسیله فاکتور اتلاف $\gamma(T)$ و فرکانس پلاسما $\omega_p(T)$ بیان می‌شود.

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



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

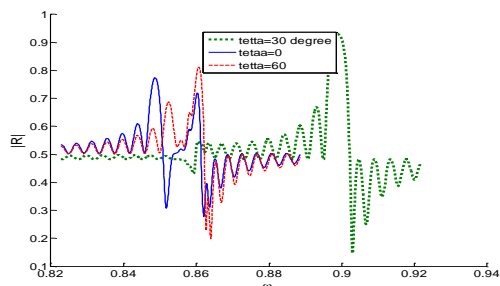
۴- نتیجه‌گیری

با بررسی گاف باند فوتونیک بلور فوتونی متشکل از نیم رساناهای چاه کوانتومی InGaAs/InAs و اعمال اثر اشتراک اپتیکی، نشان داده شد که گنجاندن بلور شامل چاه کوانتومی و بررسی تغییرات فرکانسی و زاویه تابش، منجر به مکانیزم جدیدی برای ایجاد و کنترل گاف‌باند های فوتونیک می‌شود. پس از اعمال دمزش نوری توسط لیزر فمتوثانیه، 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

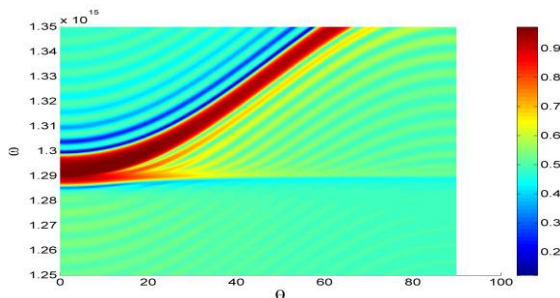
- [1] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2059.
- [2] S. John, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2486.
- [3] Y. Chen, *Appl. Phys.* 42 (2009) 3727.
- [4] M. D. Javid, A. Ghaffari, F. Monifi, M. S. Abrishamian, *Journal of Applied Science* 53 (2008) 1891.
- [5] S. V. Zhokovsky, A. G. Smirnov, *Phys. 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. Jarasunas, 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, *Chiness Science Bulltin*, 54 (2009) 3664.
- [12] T. wang, G. Li, Zh. 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 در این زوایا از حالت تشدید با اکسیتون خارج شده و بازتابندگی در این فرکانس کاهش می‌یابد و سیستم به عنوان عبور دهنده نور عمل می‌کند.



شکل ۳: طیف بازتابندگی پس از اعمال دمزش برای زاویه تابش $\theta=0$ درجه (نمودار آبی)، $\theta=30$ (قرمز نقطه چین) و $\theta=60$ (نمودار سبز خط چین) می‌باشد.

بارسم گاف باند برای بلور متشکل از نیم رساناهای چاه کوانتومی InGaAs/InAs توسط ضریب بازتابش (رابطه ۱۰) مناطق ممنوعه فرکانسی مطابق شکل (۴) بدست می‌آیند. تأثیر زاویه ورودی در گاف باند این بلور در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۴: نواحی قرمز، نمودار گاف باند فوتونیک بلور فوتونی متشکل از نیم رساناهای چاه کوانتومی InGaAs/InAs است.

نواحی رنگی گاف باندهای غیرمجاز و نواحی سفید باندهای مجاز می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای زاویه ورودی صفر ($\theta=0$) شاهد منطقه ممنوعه فرکانسی در بازه $\omega = 1/287 \times 10^{15}$ تا $\omega = 1/298 \times 10^{15}$ هرتر هستیم. حال اگر سیستم را تحت پالس دمزش قرار دهیم با توجه به اثر اشتراک 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 دمزش می‌باشد که نواحی تیره رنگ، گاف باندهای غیرمجاز و نواحی روشن باندهای مجاز می‌باشند. به ازای زاویه ورودی صفر ($\theta=0$) دو منطقه ممنوعه