



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



بلور فوتونی تک بعدی تشدیدی تنظیم پذیر بر پایه نقاط کوانتومی InAs

سپهر رازی^۱، مهدی خلیلی هزارجریبی^۲

^۱ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، sepehr.razi@gmail.com

^۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده - ساختار بلور فوتونی تشدیدی نقص دار جدید با قابلیت پاسخ دهی اپتیکی در ناحیه فرسرخ پیشنهاد گردیده است. این بلور متشکل از تناوبی از لایه‌های شامل نقاط کوانتومی InAs و سد های از جنس GaAs می‌باشد. رهیافت ماتریس انتقال به منظور مطالعه مشخصه‌های اپتیکی ساختارهای پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته و برای افزایش دقت شبیه سازی، برخلاف مطالعات قبلی تاثیر اختلالات ناشی از افت و خیز اندازه نقاط کوانتومی و لایه‌ها نیز در محاسبات وارد گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که از بین بردن نظم ساختاری بلور، منجر به خلق یک مد نقص در باند توقف طیف بازتاب آن می‌گردد. با توجه به کاربردهای وسیعی که ساختار نقص دار در ادوات فوتونیکي همچون سویچ‌ها و فیلترهای تمام نوری می‌تواند داشته باشد، تنظیم پذیری پاسخ اپتیکی آن با توجه به دمای بلور، زاویه تابش پرتو به بلور و همچنین با استفاده از یک باریکه کنترل بیرونی مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلید واژه- بلور فوتونی تشدیدی، نقاط کوانتومی، باند توقف، مد نقص، تنظیم پذیری

Tunable resonant 1D photonic crystal based on InAs Quantum dots

Sepehr Razi¹, Mahdi Khalili hezarjaribi²

¹ Faculty of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, sepehr.razi@gmail.com

² Faculty of physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract- New defective resonant photonic crystals with optical response in infrared frequency range is proposed. This crystals is composed of periodic layers of slabs containing InAs quantum dots (QDs) and GaAs as barriers. Transfer matrix approach is utilized for investigation of the optical features of the proposed structures and in order to increase the simulation accuracy, despite of the previous studies, the effect of the disorders caused by fluctuations of the sizes of the layers/QDs are considered. Results show that disrupting the structural order of the crystal causes a defect mode generation in the band gap of the reflection spectrum. Due to the possible potentials of the defective structures in photonic devices such as optical filters/switches, tunability of its optical response is also investigated with taking into consideration of the crystal temperature, light incident angle and using an external control wave.

Keywords: resonant photonic crystal, quantum dot, stop band, defect mode, tunability

مقدمه

امروزه به خوبی اثبات گردیده است که طیف پیوسته یک موج الکترومغناطیسی در حین عبور از یک بلور فوتونی بصورت جدی تحت تاثیر قرار می‌گیرد و نواحی که تحت عنوان باندهای توقف شناخته می‌شوند در طیف عبور بلور تشکیل می‌گردند. در دو دهه اخیر انواع مختلفی از بلورهای فوتونی یک، دو و سه بعدی پیشنهاد گردیده اند که اغلب آن‌ها از لایه‌های متناوب مواد نیمه‌رسانا، دی-الکتریک و یا ترکیبی از این دو تشکیل شده‌اند [۱]. در سال‌های اخیر نسل جدیدی از بلورهای فوتونی پیشنهاد شده‌اند که به بلورهای تشدید فوتونی معروف هستند. در این ساختارهای منحصر به فرد که دارای توانایی بالایی برای ساخت المان‌های مختلف فوتونیک از جمله سوئیچ‌ها و فیلترهای تمام نوری می‌باشند، از مواد با دوقطبی فعال استفاده می‌گردد. بنابراین این بلورها علاوه بر اینکه دارای مشخصه‌های اپتیکی همانند دیگر بلورهای فوتونی هستند، بنا به امکان بالای کوپلاژ با نور تابیده، احتمال تحقق گذارهای تشدید نیز در آن‌ها کاملاً ممکن است. در سال‌های اخیر رهیافت‌های با ارزشی برای توصیف و بررسی این ساختارها پیشنهاد گردیده است. با این حال عمده پژوهش‌های انجام یافته بر روی بلورهای متشکل از چاه‌های کوانتومی بوده است [۲]. بنابراین بنظر می‌رسد که انجام پژوهش‌های مرتبط با بلورهای تشدید نقص‌دار که تا به حال کمتر مورد توجه بوده‌اند از دیدگاه علم و مهندسی می‌تواند حائز اهمیت باشد.

رهیافت ریاضی

میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در دو سمت یک لایه از ساختار متناوب را می‌توان با ماتریس‌های انتشار و دینامیکی برای هر لایه و استفاده از رهیافت ماتریس انتقال به یکدیگر ربط داد [۳]:

$$M_{unitcell} = M_b^{1/2} M_\rho M_d M_\rho^{-1} M_b^{1/2}, \quad M_b^{1/2} = \begin{pmatrix} e^{i\phi_b/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_b/2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه $M_b^{1/2}$ نشانگر ماتریس انتقال برای نصف سد بوده و $\phi_b = \omega n_b L_b \cos \theta_b / c$ می‌باشد. M_ρ ماتریس پراکندگی موج الکترومغناطیسی در فصل مشترک لایه-های مجاور است. ماتریس انتقال برای لایه نقاط کوانتومی InAs بصورت زیر تعریف می‌گردد [۳]:

$$M_d = \begin{pmatrix} e^{i\phi_d} [1 - iS(\omega)] & -iS(\omega) \\ iS(\omega) & e^{-i\phi_d} [1 + iS(\omega)] \end{pmatrix} \quad (2)$$

در اینجا $S(\omega)$ پذیرفتاری اکسایتون است. در محاسبات ما پهن شدگی ناهمگن که ناشی از نوسانات فرکانس گذار اکسایتون به علت وجود ناخالصی‌ها و یا ناهمگنی در اندازه لایه‌ها و نقاط کوانتومی در طول رشد می‌باشد نیز لحاظ شده است. متوسط پذیرفتاری نسبت به تابع توزیع فرکانس اکسایتون بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_0}{\hbar\omega - (E_0 + \Delta E + \Delta E_s) + i\gamma} G(\Delta E / E_0) d(\Delta E / E_0) \quad (3)$$

انرژی حالت پایه اکسایتون در تقریب کروی می‌تواند بصورت زیر تعیین گردد:

$$E_0 = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{eh} a^2} \quad (4)$$

m_{eh} و a به ترتیب جرم کاهیده الکترون و حفره سنگین و شعاع نقاط کوانتومی می‌باشند. بنابراین با در نظر گرفتن مقدار متوسط شعاع نقاط بصورت a_0 رابطه بین انحراف معیار انرژی و تغییرات در اندازه بصورت مقابل خواهد بود:

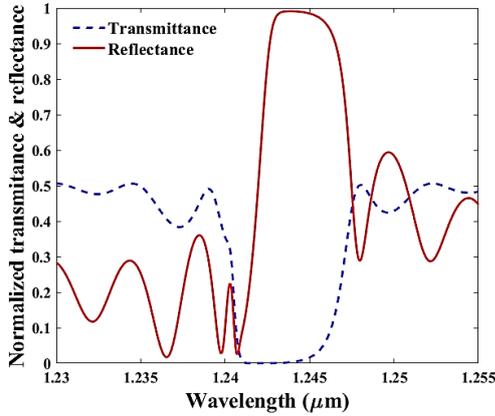
$$\sigma = \frac{m_{eh} a_0^2 e E_0}{\hbar^2 \pi^2} \sigma_E \quad (5)$$

شیفت استارک و نرخ واهلش غیر تابشی γ که مترادف با پراکندگی فونون - حامل در نقاط کوانتومی می‌باشد با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند [۴]:

$$\Delta E_s = -\beta F^2 \quad (6)$$

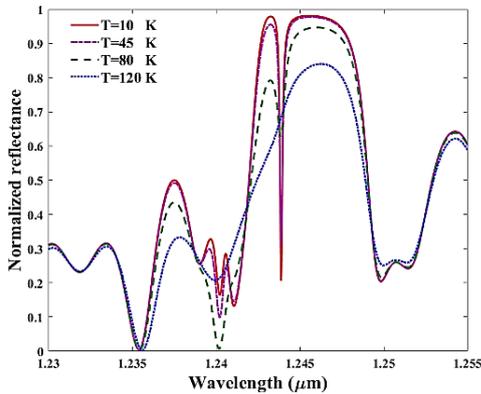
$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_{AC} T + \frac{\gamma_{LO}}{\exp(\Delta E_{ph} / k_B T) - 1}$$

نتایج نشان می‌دهند که بازتاب تا حد تقریباً ۱۰٪ در ناحیه باند توقف طیف قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲. طیف بازتاب و عبور نرمالیزه شده برای بلور ایده‌آل.

این رفتار می‌تواند کاربردهای قابل توجهی در ساخت آینه‌های ایده‌آل در این ناحیه طیفی داشته باشد. با از بین بردن تقارن ساختاری بلور در میانه آن، یک مد نقص تشدیدی در باند توقف بلور ظاهر می‌گردد.



شکل ۳. طیف بازتاب بلور تک نقص برای چهار دمای مختلف. زاویه تابش ۵ درجه در نظر گرفته شده است.

علیرغم اینکه نقص ایجاد شده در بلور دقیقاً در مرکز آن قرار دارد، مد تشدیدی القا شده توسط آن در فاصله مقارنی از دو لبه باند توقف ظاهر نمی‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دمای بلور بازتابندگی ناحیه باند توقف کاهش یافته و به تبع آن شدت (عمق) پیک تشدیدی نیز کمتر می‌گردد، شکل ۳. در دمای ۱۲۰ K این ناحیه، شکل مربعی خود را از دست می‌دهد. با این حال در

γ_0 و $\gamma_{AC}T$ به ترتیب نرخ واهلش تابشی و پهن شدگی فونون آکوستیکی می‌باشند و β قطبش پذیری اکسایتون است. ماتریس انتقال کل توصیف کننده تحول میدان در طول بلور متشکل از N تناوب از لایه‌ها می‌تواند بصورت زیر توصیف گردد:

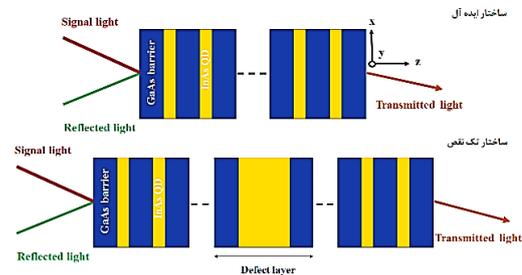
$$M(\omega) = M_b^{1/2} (M_{unit\ cell})^N M_b^{1/2} = \begin{pmatrix} M_{11}(\omega) & M_{12}(\omega) \\ M_{21}(\omega) & M_{22}(\omega) \end{pmatrix} \quad (7)$$

بازتابندگی را می‌توان از رابطه زیر استخراج کرد:

$$R(\omega) = \left| \frac{r_{01} + r(\omega)}{1 + r_{01}r(\omega)} \right|^2, \quad r(\omega) = -\frac{M_{21}(\omega)}{M_{22}(\omega)} \quad (8)$$

$$r_{01} = -(n_b \cos \theta_b - \cos \theta_a) / (n_b \cos \theta_b + \cos \theta_a)$$

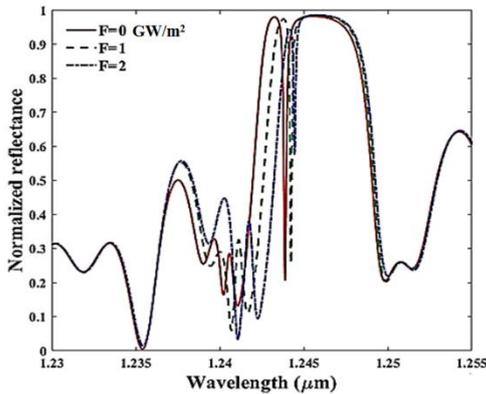
مقادیر عددی بکار گرفته شده در طول شبیه سازی عبارتند از: $E_0=0.999$ eV, $\gamma_0=12$ μ eV, $\gamma_{AC}=0.8$ μ eV/K, $\gamma_{LO}=47$ meV, $\Delta E_{ph}=36$ meV, $L_b=179.5$ nm, $L_d=8$ nm, $n_b=3.302$, $n_d=3.5$.



شکل ۱. بلور فوتونی ایده‌آل شامل لایه‌های متناوب GaAs و لایه متشکل از نقاط کوانتومی InAs و ساختار دارای یک نقص در وسط بلور، شامل لایه نقاط کوانتومی با ضخامت متفاوت می‌باشد.

نتایج و بحث

شماتیک ساختارهای پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. محیط اطراف بلور هوا انتخاب شده و زاویه تابش پرتو به بلور نسبت به عمود بر سطح سنجیده می‌شود. شکل ۲ طیف‌های بازتاب و عبور بلور ایده‌آل را نمایش می‌دهد که در آن تعداد تناوب لایه‌ها، دمای بلور و زاویه تابش به ترتیب ۲۴۰ K، ۱۰ K و ۵^o انتخاب گردیده‌اند.



شکل ۵. طیف بازتاب بلور تک نقص برای شدت های مختلف باریکه کنترل خارجی

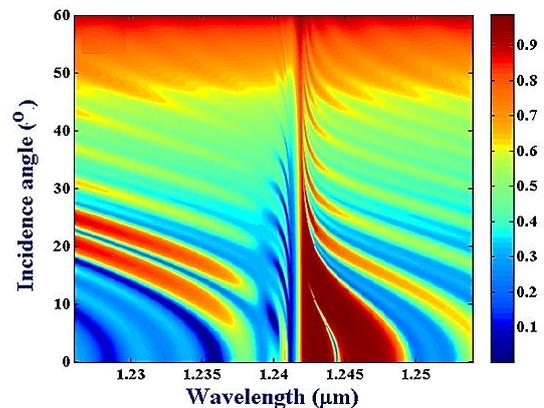
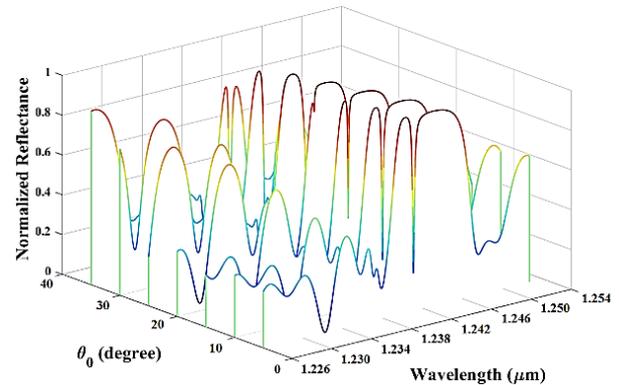
نتیجه گیری

ساختار بلور فوتونی تشدیدی نقص دار جدید با پاسخ دهی اپتیکی تنظیم پذیر پیشنهاد گردیده است که در ساختار آن از نقاط کوانتومی InAs استفاده شده است. نتایج توانایی خوب این ساختارها در خلق باند توقف در ناحیه فرسرخ نزدیک را نشان می دهند که می توانند کاربردهای خوبی در مباحث مخابراتی داشته باشند. باند توقف و مد نقص موجود در طیف بلور نقص دار بعد از 120 K از بین رفته و با افزایش زاویه تابش، پهنای باند کاهش یافته و بعد از 30° از بین می رود. این ساختار با استفاده از یک تابش کنترل بیرونی نیز قابل تنظیم است.

مرجع ها

- [1] X.Dai, "thermally tunable omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb", J. Appl. Phys. Fund. Vol. 109, pp. 053104, 2011.
- [2] L. I. Deych, M. V. Erementchouk, "Effects of inhomogeneous broadening on reflection spectra of Bragg multiple quantum well structures with a defect", Phys. Rev. B. Vol. 69. PP. 075308, 2004.
- [3] T. Wang, "The theoretical investigation of all-optical polarization switching based on InGaAs(P) Bragg-spaced quantum wells", Opt. Express, Vol.16, pp. 127, 2008.
- [4] Zh. Hu, "Controllable transmission photonic band gap and all-optical switching behaviors of 1-D InAs/GaAs quantum-dot photonic crystal", Opt. Mater. Vol.62, pp. 419, 2016

حد فاصل دماهای 10 الی 80 کلوین فرکانس مرکزی و پهنای مد نقص تفاوت چشمگیری نمی کنند.



شکل ۴. وابستگی بازتابندگی بلور تک نقص به زاویه تابش. نمودار رنگی بازتابندگی بر حسب طول موج برای زاویه های مختلف را نمایش می دهد. دمای بلور 10 K در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی دقیق تر تنظیم پذیری پاسخ اپتیکی ساختار، وابستگی طیف بازتاب به زاویه تابش نور مورد بررسی قرار گرفت. بنابه نتایج شکل ۴، با افزایش زاویه تابش، پهنای ناحیه باند توقف کاهش یافته و بعد از حدود 30° درجه ناحیه باند توقف به کل از بین می رود. از طرف دیگر با افزایش زاویه پهنای مد نقص کاهش یافته و به سمت طول موج های کوتاه تر شیفت می یابد و در $15^\circ \sim$ از بین می رود.

در نهایت، تنظیم پذیری مشخصه های اپتیکی ساختار نقص دار با بهره مندی از یک تابش کنترل خارجی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می دهند که با تابش عمود این باریکه خارجی، شدت پیک تشدیدی کاهش یافته و به طول موج بالاتر شیفت می یابد. این رفتار در شدت های بالاتر هرچه بیشتر قابل مشاهده است.