

بهره کوانتومی آشکارساز نقطه کوانتومی هسته / پوسته GaN/AlGa

علی واحدی

گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: vahedi@iaut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳)

چکیده

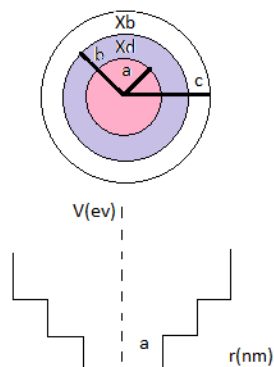
در این کار قدرت نوسان کنندگی و بهره کوانتومی آشکارساز مبتنی بر ساختار جدید نقطه کوانتومی کروی GaN/AlGa بررسی شده است. برای این منظور ابتدا معادله شرودینگر با تقریب جرم مؤثر در دستگاه مختصات کروی حل شد، با تعیین ترازهای انرژی، توابع موج و عناصر ماتریس گذار دو قطبی پارامترهای مورد مطالعه نیز به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهند با افزایش کسر مولی و اندازه نقطه کوانتومی، قدرت نوسان کنندگی کاهش می‌یابد. این کاهش برای کسرهای مولی بیشتر محسوس‌تر است. با بیشتر شدن کسر مولی ناحیه نقص، قله منحنی بهره کوانتومی جابه‌جایی آبی پیدا می‌کند. افزایش شعاع هسته و پوسته سبب می‌شود قله بهره کوانتومی جابه‌جایی قرمز داشته باشد. این جابه‌جایی‌های قرمز و آبی می‌توانند در تنظیم و کنترل طول موج کاری آشکارساز بسیار مفید باشند.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازهای فرو قرمز، بهره کوانتومی، نقاط کوانتومی، نانو ساختارهای AlGa/GaN

۱. مقدمه

می‌پوشاند. برای کاربردهای پزشکی و زیست شناسی در نهایت یک پوشش آلی برای آبدوست کردن نانوذره به کار برده می‌شود که جایگاهی برای اتصال بیومولکول‌های مختلف از جمله، پروتئین‌ها، پپتیدها و مولکول‌های کوچک نیز به شمار می‌رود [۱-۴]. ویژگی‌های نوری- فیزیکی منحصر به فرد نقاط کوانتومی محققان را بر آن داشته تا از این نانو ذرات به عنوان ردیاب‌های فلئورسانسی مؤثر، در ردیابی سلول‌های موجودات زنده، تصویربرداری و تشخیص‌های پزشکی استفاده کنند. نقاط کوانتومی قابلیت تولید نور در طول موج‌های خاص را دارند، در واقع با کنترل ابعاد، نقاط کوانتومی می‌توانند نور را در رنگ‌ها و طول موج‌های مختلف، منتشر کنند. به عنوان مثال،

نقاط کوانتومی، نانو بلورهای نیمه هادی با قطر ۲ تا ۱۰ نانومتر هستند که بعد از تحریک شدن، از خود نور ساطع می‌کنند و به طور معمول از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ اتم تشکیل شده‌اند. ساختار کلی یک نقطه کوانتومی، شامل هسته، پوسته و پوشش دهنده است. هسته از اتم‌های گروه II-VI عناصر جدول تناوبی به عنوان مثال سلنید کادمیوم (CdSe)، گالیم نیتروژن (GaN) یا گروه III-V مثل فسفات ایندیوم (InP) تشکیل شده است. یک پوسته از جنس نیمه هادی دیگر، در اغلب موارد سولفید روی (ZnS) یا آلومینیوم گالیم نیتروژن (AlGa)، به منظور بهبود ویژگی‌های نوری، افزایش پایداری و کاهش سمیت سلولی، هسته را



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع پتانسیل و طرح‌واره هندسی نقطه کوانتومی.

وابستگی برخی از مشخصه‌های آشکارساز مبتنی بر نقطه کوانتومی GaN/AlGaIn نظیر قدرت نوسان کنندگی و بهره کوانتومی به ضرابی مثل اندازه نقص، سد پتانسیل و کسرمولی ساختار جدید نقطه کوانتومی بررسی می‌شود.

۲. روش کار

برای افزایش و بهبود ویژگی‌های آشکارسازی فرو قرمز و اثرات مربوط به گذارهای بین زیر نواری (زیرباندی) فرو قرمز، ساختار جدید GaN/Al_xGa_{1-x}N نقطه کوانتومی ارائه می‌شود. این ساختار کروی جدید براساس قرار دادن یک نقص در درون یک نقطه کوانتومی است، که پتانسیل حاصل از آن همانند شکل ۱ خواهد بود.

ساختار نقاط کوانتومی به طور معمول به صورت هسته/پوسته می‌باشد. بسته به گاف نواری و محل نسبی سطوح انرژی الکترونی در نیم‌رساناهای مورد استفاده، پوسته و هسته می‌توانند نقش‌های مختلفی در نانو بلورداشته باشند. سه نوع ساختار کلی متفاوت را می‌توان برای سیستم‌های هسته/پوسته در نظر گرفت [۱۰-۱۱].

در ساختار نوع اول گاف نواری ماده پوسته از گاف نواری هسته بزرگ‌تر بوده و هر دوی الکترون‌ها و حفره‌ها در هسته محبوس می‌شوند. در ساختار دومی گاف نواری ماده پوسته از گاف نواری هسته کوچک‌تر بوده و بسته به ضخامت پوسته، حفره‌ها و الکترون‌ها به طور نسبی یا کامل در پوسته محبوس

نقاط کوانتومی از جنس آرسنید کادمیوم با ابعاد ۳ نانومتر نور سبز منتشر می‌کند؛ در حالی که ذراتی به بزرگی ۵/۵ نانومتر از همان ماده، نور قرمز منتشر می‌کند. نقاط کوانتومی به خاطر اندازه منحصر به فردشان از قابلیت‌های مهمی برای برقراری تعامل نوری با منبع نور، برخوردار هستند. نقاط کوانتومی به هنگام قرار گرفتن در معرض نور ماوراء بنفش، به ازای هر فوتون تابشی می‌توانند بیش از یک الکترون تولید کنند، و این در حالی است که سلول‌های خورشیدی سیلیکونی رایج، توانایی تولید یک الکترون دارند [۳-۸].

در سال‌های اخیر آشکارسازهای فرو قرمز ساخته شده بر پایه چاه‌های کوانتومی بسیار مورد توجه بوده‌اند، اما این آشکارسازها به دماهای پایین در حدود ۸۰ کلوین نیازمند هستند، زیرا میزان گسیل حرارتی بالایی دارند. یکی دیگر از مشکلات این آشکارسازها ناتوانی آنها برای آشکارسازی تابش‌های عادی با توجه به وجود قاعده گزینش قطبش است. بنابراین نیاز به اسباب کمکی و جانبی دارند که باعث حجیم شدن آشکارساز و بالا رفتن قیمت آنها می‌شود [۹]. تحقیقات جدید نشان می‌دهد ساختارهای جدید نقطه کوانتومی به علت دارا بودن ترازهای گسسته و گذارهای بین نواری و زیرنواری می‌توانند جایگزین خوبی برای آشکارسازی در ناحیه فرو قرمز باشند. مزیت آشکارسازهای حاصل از نقاط کوانتومی به سه دلیل زیر است [۱۰-۱۲]:

۱- حساسیت بالا به نورهای تابشی ۲- پایین بودن پراکندگی الکترون-فونون و بهره جریان بالا ۳- توانایی کار در دماهای بالا. اندازه شکاف انرژی در نقاط کوانتومی همواره بزرگ‌تر از حالت توده ماده است. این خاصیت باعث ایجاد قابلیت تنظیم طول موج تابشی می‌شود، بنابراین با کنترل اندازه نانو ذرات می‌توان طول موج‌های تابشی را مشخص کرد. پژوهشگران نقاط کوانتومی را در ترانزیستورها، دیودهای نورگسیل، دیودهای لیزری، آشکارسازهای فرو قرمز، سلول‌های خورشیدی و تصویر برداری پزشکی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳-۱۶]. در کارهای قبلی مؤلف و همکاران ترازهای انرژی، توابع موج و ماتریس گذار دوقطبی ساختار نقطه کوانتومی کروی GaN/AlGaIn بررسی شده است [۸]. در مقاله حاضر

و مشتق آن در مرزها و بهنجارش به دست می‌آید. پس از تعیین توابع موج حالت‌های پایه ψ_i و برانگیخته اول ψ_f ماتریس گذار دو قطبی r_{if} را پیدا می‌کنیم.

$$r_{if} = \langle \psi_i | r | \psi_f \rangle$$

از روی ماتریس گذار دو قطبی قدرت نوسان کنندگی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$f_{if} = \frac{\gamma m^*}{\hbar^2} (E_i - E_f) |r_{if}|^2 \quad (۳)$$

در رابطه فوق E_i و E_f به ترتیب انرژی حالت‌های پایه و تحریکی می‌باشند. این کمیت بدون بعد میزان جذب یا گسیل الکترومغناطیسی بین ترازهای اتمی و مولکولی را تعیین می‌کند. از روی این کمیت می‌توان ضرایب بسیار مهمی مثل ضریب جذب و همچنین بهره کوانتومی که در آشکارسازها اهمیت زیادی دارند را به دست آورد. ضریب جذب نیز که پارامتر بسیار مهمی است با رابطه داده می‌شود.

$$\alpha = \frac{\pi \hbar N_d n_{op} e^2}{m^* \epsilon \epsilon_c} (n_i - n_f) f_{if} \frac{\Gamma}{(\hbar\omega - \hbar\omega_{if})^2 + \Gamma^2}, \quad (۴)$$

که Γ پهنای طول عمر تراز، N_d چگالی حجمی نقاط کوانتومی، n_{op} ضریب شکست ماده، ϵ و ϵ_c به ترتیب گذردهی الکتریکی محیط و خلأ می‌باشد. n_i و n_f نیز به ترتیب احتمال پر شدن ترازهای اولیه و نهائی هستند. برای دماهای پایین $n_i = 1$ و $n_f = 0$ می‌باشد. برای کاربردهای آشکارسازی فرو قرمز نانو ساختارها، ضریب بهره کوانتومی اهمیت زیادی دارد، زیرا پاسخ دهی که یکی از مهم‌ترین پارامترهای آشکارسازهای نوری می‌باشد و به صورت میزان سیگنال الکتریکی خروجی (جریان خروجی I_{out} یا ولتاژ خروجی V_{out} می‌باشد) به سیگنال نوری ورودی تعریف می‌شود با رابطه زیر به ضریب بهره وابسته است:

$$R = \frac{eg\eta}{\hbar\omega}, \quad (۵)$$

که g بهره است و به صورت نسبت زمان باز ترکیب بر زمان گذار تعریف می‌شود.

$$g = \frac{\mu F}{LC_{be}}, \quad (۶)$$

بهره کوانتومی به صورت میزان الکترون تولیدی به ازای فوتون

می‌شوند. در ساختار نوع آخر، لبه نوار ظرفیت یا لبه نوار رسانش ماده پوسته در میان گاف نواری هسته قرار می‌گیرد. با برانگیختگی نانو بلور، آرایش نواری به وجود آمده منجر به تفکیک فضایی حفره و الکترون و قرار گیری آنها در ناحیه‌های مختلف ساختار هسته / پوسته می‌شود. در نانوبلورهای هسته / پوسته، پوسته برای غیرفعال کردن سطح هسته با هدف و بهبود خواص اپتیکی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از یک پوسته میانی کاهش دهنده تنش که بین هسته نانو بلور و پوسته خارجی ساندویچ می‌شود، برای اولین بار در سیستم هسته / پوسته / پوسته CdSe/ZnSe/ZnS پیشنهاد شده است [۱۰]. این گونه سیستم‌ها پایداری بالاتری در مقابل اکسیداسیون نوری نسبت به سیستم هسته / پوسته داشته و بهره‌های کوانتومی بالاتری دارند [۱۱]. با توجه به اینکه گاف انرژی نیم‌رسانای GaN زیاد است و بسیاری از ویژگی‌های اپتیکی آن مورد مطالعه قرار گرفته است، بنابراین در مقاله حاضر ساختار کروی با قراردادن هسته GaN در مرکز دو پوسته $Al_xGa_{1-x}N$ ضخامت‌های داخلی x_d و خارجی x_b متغیر پایه ریزی شده است، که x نشان دهنده کسر مولی آلومینیوم می‌باشد [۸، ۱۹]. انرژی پتانسیل حاصل از این نمونه همانند شکل ۱ خواهد بود. معادله شرودینگر در دستگاه مختصات کروی با در نظر گرفتن جرم مؤثر الکترون m_i^* و توزیع پتانسیل در نواحی مختلف به روش جداسازی متغیرها به صورت تحلیلی حل می‌شود. جواب بخش زاویه‌ای هماهنگ‌های کروی بوده و بخش شعاعی نیز معادله بسل کروی است [۱۷-۱۸]:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + 2r \frac{dR}{dr} + \left\{ \frac{\gamma m_i^*}{\hbar^2} [E - V_i(r)] r^2 - l(l+1) \right\} R = 0, \quad (۱)$$

با معرفی $k_i^2 = \frac{\gamma m_i^*}{\hbar^2} [E - V_i(r)]$ جواب معادله (۱) برای ساختار فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R(r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{r}{\pi}} [C_1 j_\ell(k_i r) + C_2 n_\ell(k_i r)] & 0 < r < a \\ \sqrt{\frac{r}{\pi}} [C_3 i_\ell(k_i r)] & a < r < b \\ \sqrt{\frac{r}{\pi}} [C_4 K_\ell(k_i r)] & b < r, \end{cases} \quad (۲)$$

که برای دو حالت $\langle V_1 \rangle E$ و $\langle V_1 \rangle E$ جواب‌های متفاوتی خواهیم داشت. ضرایب C_i با اعمال شرایط پیوستگی تابع موج

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی ساختار مورد نظر [۸].

پارامترها	مقدار
جرم مؤثر الکترون	$0.752x + 0.228(m_0)$
گاف انرژی $E_g(x)$	$6.13x + (1-x) \times 3.42 - x(1-x)(eV)$
نوار آفست $\Delta E_c(x)$	$0.7 \times [E_g(x) - E_g(0)](eV)$
چگالی حاملین بار N_d	$1 \times 10^{24}(m^{-3})$
ضریب شکست n_{op}	$(0.2 - 1.5x)^{1/2}$
گذردهی الکتریکی ϵ	$(-0.3x + 10.4)\epsilon_0$
ثابت واهلش $\hbar\Gamma$	$0.3(MeV)$

۳. نتایج

در این بخش ابتدا نتایج مربوط به تغییرات قدرت نوسان کننده با اندازه نقص (a) و نقطه کوانتومی (b) به ازای کسرهای مولی متفاوت AI رسم می‌شود. لازم به ذکر است این کمیت از روی پارامترهای تابع موج و ماتریس گذار دوقطبی به دست می‌آید که در کارهای قبلی آورده شده است [۸، ۱۹، ۲۰]. شکل ۲ وابستگی قدرت نوسان کننده را به اندازه نقص به ازای کسرهای مولی متفاوت نقص (xd) نشان می‌دهد.

شکل ۲ نشان دهنده وابستگی قدرت نوسان کننده به اندازه نقص به ازای کسرهای مولی سد کوانتومی (xb) می‌باشد. با توجه به این شکل با افزایش مقدار کسر مولی ناحیه سد و اندازه نقص، قدرت نوسان کنندگی ابتدا کمتر و سپس بیشتر می‌شود. این تغییرات در چاه‌های با عرض تقریباً ۳۰-۲۰ آنگستروم بارزترند، که مربوط به رفتار غیر عادی تابع موج و پیرو آن ماتریس گذار دو قطبی است [۱۹].

در شکل ۳ تغییرات بر حسب اندازه نقطه کوانتومی به ازای کسرهای مولی متفاوت سد ترسیم شده است. مطابق شکل افزایش کسر مولی سد سبب افزایش قدرت نوسان کننده می‌شود، و با افزایش اندازه نقص ابتدا قدرت نوسان کننده کاهش یافته طوری که در حوالی $a = 30$ آنگستروم به کمینه مقدار خود رسیده و سپس رو به افزایش می‌گذارد. علت این رفتار کم شدن هم‌پوشانی توابع موج ترازهای پایه و برانگیخته اول در این نواحی است که آن هم متأثر از پدیده محصور

تابشی تعریف می‌شود و با فرمول زیر بیان می‌شود [۱۸-۱۹]:

$$\eta = \alpha(\omega)L \left[V_{ec} e^{-E_{ec}/K_B T} / (v_0 + V_{ec} e^{-E_{ec}/K_B T}) \right]. \quad (7)$$

در رابطه فوق v_0 میزان واهلش از حالت برانگیخته فوتونی به بقیه حالات است و در اینجا تقریباً برابر 10^6 است. L طول ساختار، E_{ec} اختلاف انرژی بین حالت پیوسته و برانگیختگی نوری وابسته به میدان است. V_{ec} در این ساختار تقریباً برابر 10^{13} است [۱۷]. این کمیت وابستگی ضعیفی به دما دارد و ضریب رهایی فونون به حالت پیوسته را نشان می‌دهد. برای رهایی $E_{ec} = 0.1eV$ مقدار داخل کروشه در رابطه بهره تحت شرایطی در دمای اتاق تقریباً برابر واحد می‌باشد، یعنی می‌توان نوشت:

$$\eta \approx \alpha(\omega)L. \quad (8)$$

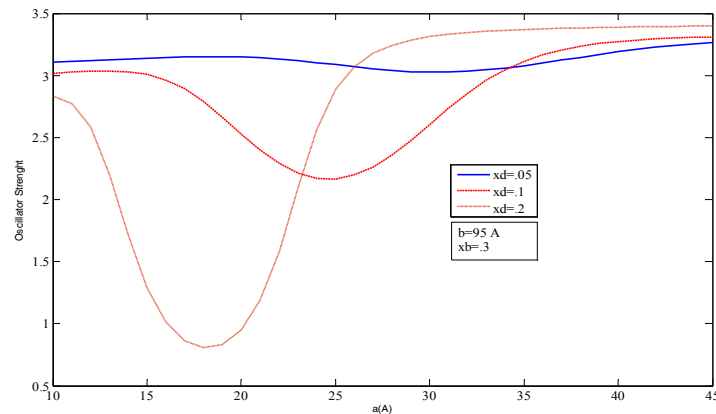
وابستگی دمایی پاسخ دهی بهنجار شده $\frac{R}{R_0}$ تحت میدان‌های الکتریکی اعمالی مختلف از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$R = \frac{eg\eta}{\hbar\omega} = \frac{e\mu F}{\hbar\omega LC b e}, \quad (9)$$

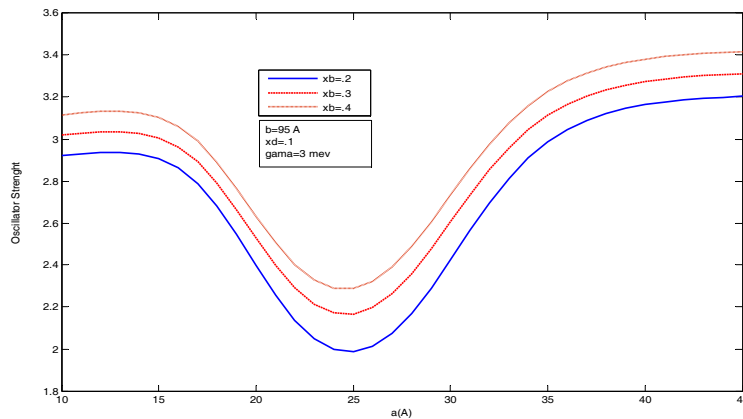
$$\alpha(\omega)L \left[V_{ec} e^{-E_{ec}/K_B T} / (v_0 + V_{ec} e^{-E_{ec}/K_B T}) \right],$$

$$\frac{R}{R_0} = n_i \left[V_{ec} e^{-E_{ec}/K_B T} / (v_0 + V_{ec} e^{-E_{ec}/K_B T}) \right] F, \quad (10)$$

در رابطه اخیر T دمای سیستم، K_B ثابت بولتزمن، F میدان الکتریکی اعمالی و μ تحرک پذیری الکترونی می‌باشد. پارامترها و ضرایب مورد استفاده در این ساختار در جدول ۱ آورده شده است [۸، ۱۹].



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات قدرت نوسان کننده با اندازه نقص به ازای کسرهای مولی متفاوت نقص.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات قدرت نوسانگر با اندازه نقص به ازای کسرهای مولی متفاوت سد.

[۱۷]. در ادامه کار بهره کوانتومی ساختار مورد نظر بر حسب

تعدادی از پارامترهای مهم و تأثیر گذار رسم می شود.

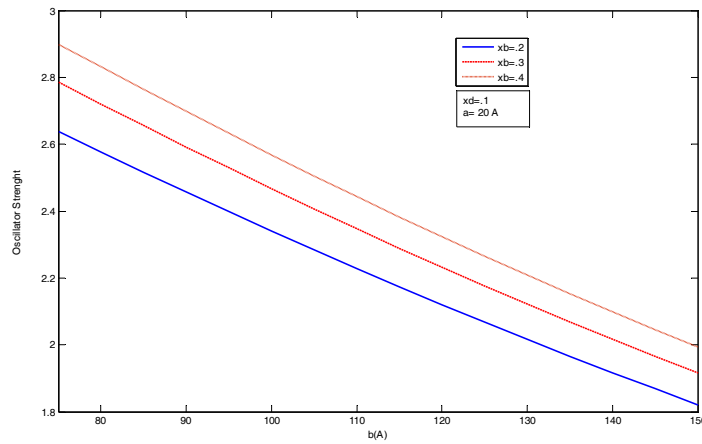
شکل ۶ تغییرات بهره کوانتومی بر حسب انرژی فوتون تابشی به ازای کسرهای مولی متفاوت نقص را نشان می دهد. مشاهده می شود با بیشتر شدن کسر مولی ناحیه نقص، قله منحنی بهره کوانتومی به سمت انرژی های بیشتر سوق پیدا می کند. این انتقال آبی تأثیر زیادی در تنظیم و کنترل ناحیه طول موج کاری آشکارساز می تواند داشته باشد.

شکل ۷ تغییرات بهره کوانتومی بر حسب انرژی فوتون تابشی به ازای اندازه های متفاوت هسته را نشان می دهد. شکل بیان می کند با افزایش شعاع هسته (نقص) بهره کوانتومی جابه جایی قرمز دارد، اما یک برگشت غیرمرسوم برای

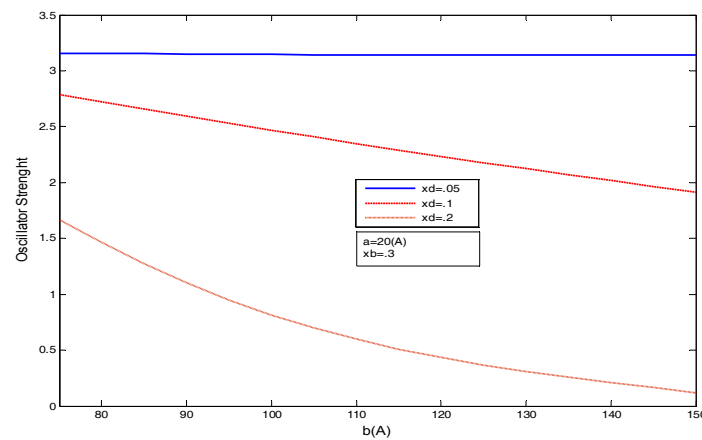
شدگی کوانتومی می باشد [۱۹].

شکل ۴ نشان می دهد افزایش کسر مولی سد، سبب بیشتر شدن قدرت نوسان کنندگی می شود زیرا هم پوشانی توابع موج حالت پایه و برانگیخته اول بهتر می شود. در حالی که افزایش اندازه سد اثر معکوس داشته و به علت کاهش هم پوشانی توابع موج، باعث کم شدن قدرت نوسان کنندگی می شود [۱۹].

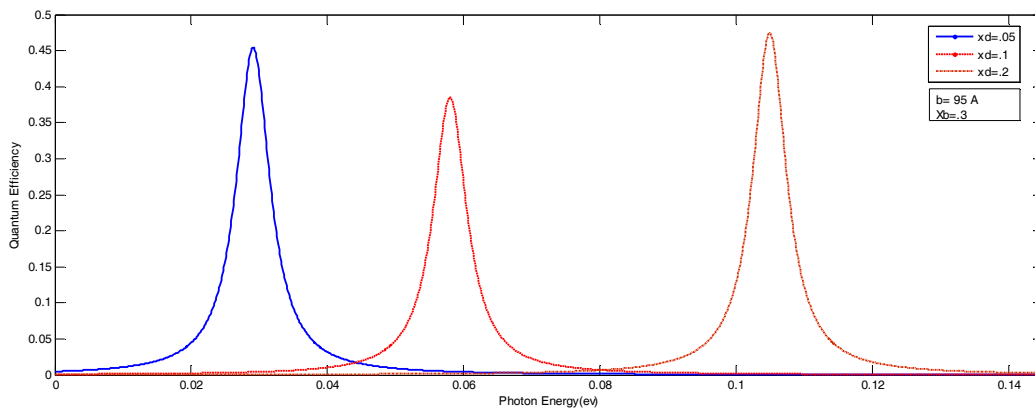
با افزایش اندازه نقطه کوانتومی قدرت نوسان کننده کمتر می شود (شکل ۵). این کاهش برای کسرهای مولی بیشتر بارزتر است. انتظار می رفت با توجه به افزایش ماتریس گذار دو قطبی با افزایش اندازه نقطه کوانتومی قدرت نوسان کننده نیز افزایش یابد اما کاهش فاصله بین ترازهای پایه و برانگیخته اول بر این اثر غلبه کرده و باعث کم شدن قدرت نوسان کننده می شود



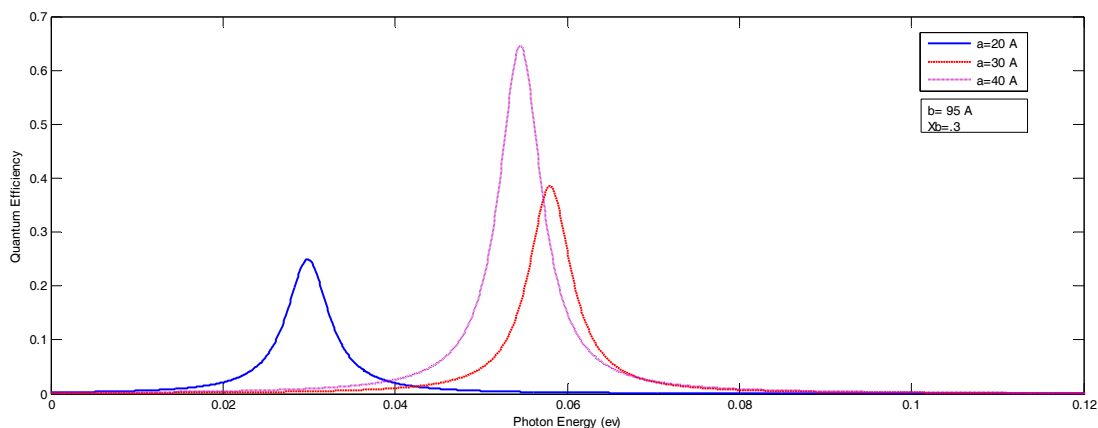
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات قدرت نوسان کننده بر حسب اندازه نقطه کوانتومی به ازای کسرهای مولی متفاوت سد.



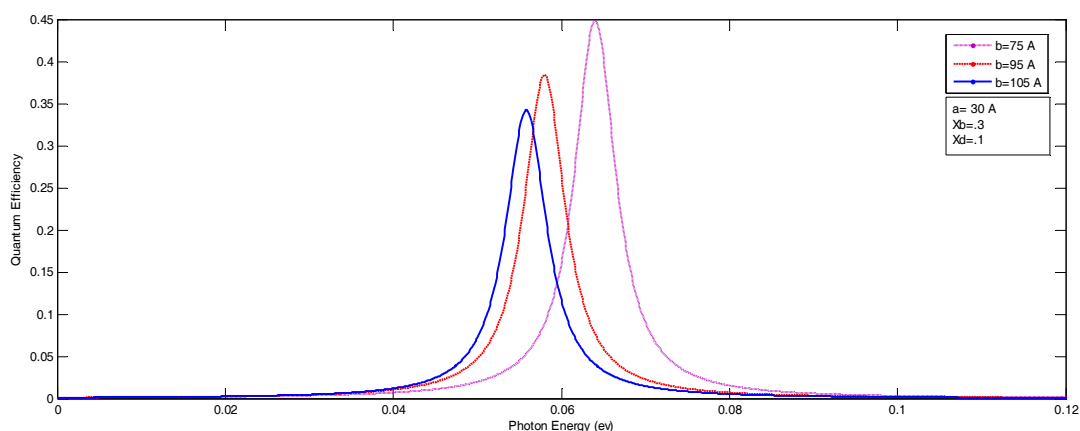
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات قدرت نوسان کننده بر حسب اندازه نقطه کوانتومی به ازای کسرهای مولی متفاوت نقص.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات بهره کوانتومی بر حسب انرژی فوتون تابشی به ازای کسرهای مولی متفاوت نقص.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات بهره کوانتومی بر حسب انرژی فوتون تابشی به ازای اندازه‌های متفاوت هسته.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات بهره کوانتومی بر حسب انرژی فوتون تابشی به ازای اندازه‌های متفاوت پوسته.

کننده و بهره کوانتومی براساس نقطه کوانتومی کروی دارای نقص ارائه شد. قدرت نوسان کننده با افزایش اندازه نقص رفتار دوگانه دارد که به علت اثرات محصور شدگی و رفتار تابع موج است. افزایش اندازه نقطه کوانتومی در تمامی حالات منجر به کاهش قدرت نوسان کننده می‌شود. این رفتار نیز به دلیل کم شدن فاصله بین ترازهای انرژی حالت پایه و برانگیخته اول به وجود می‌آید. همچنین با افزایش کسر مولی x_d و x_b به ترتیب قدرت نوسان کننده کاهش و افزایش می‌یابد این اثرات نیز به رفتار متفاوت توابع موج و فاصله بین ترازهای انرژی حالت پایه و برانگیخته اول مربوط می‌شود [۱۷، ۲۰]. با بیشتر شدن کسر مولی ناحیه نقص، قله منحنی بهره کوانتومی انتقال آبی پیدا

افزایش بیشتر از $a=30$ اتفاق می‌افتد طوری که نمودار مربوط به $a=40$ ، بین نمودارهای $a=20$ و $a=30$ آنگستروم قرار گرفته است. این رفتار غیر عادی نیز به رفتار غیر عادی تابع موج و ماتریس گذار دوقطبی مربوط می‌شود [۱۹].

شکل ۸ تغییرات بهره کوانتومی بر حسب انرژی فوتون تابشی به ازای اندازه‌های متفاوت پوسته را نشان می‌دهد. افزایش اندازه پوسته باعث کاهش قله منحنی بهره کوانتومی می‌شود و همچنین جابه‌جایی قرمز دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله پتانسیل جدیدی برای بهبود و تنظیم قدرت نوسان

کننده و بهره کوانتومی را به دنبال دارد و می تواند زمینه ساز استفاده از این سیستم برای کنترل و مدیریت پارامترهای آشکارسازی در آشکارسازهای فرو قرمز مبتنی بر چاه کوانتومی استفاده کرد.

می کند. افزایش شعاع هسته و پوسته سبب می شود قله بهره کوانتومی جابه جایی قرمز داشته باشد. این جابه جایی های قرمز و آبی می تواند در تنظیم و کنترل طول موج کاری آشکارساز بسیار مفید باشند. محاسبات انجام گرفته در این کار برای ساختار پیشنهادی GaN/AlGaIn مقادیر مناسب قدرت نوسان

مراجع

11. A Aharoni, T Mokari, T Popov, and U Banin, *J. Am. Ch. Soc.* **128** (2006) 257.
12. P K Kandaswamy and F Guillot and *et al.*, *J. Appl. Phys.* **104** (2008) 093501.
13. K Chang, W H Sung, K Sung, and *et al.*, *Scientific Reports* **4** (2014) 5603.
14. S Siontas, P Liu, A Zaslavsky, and D Pacifici, *Appl. Phys. Lett.* **109** (2016) 053508.
15. T Abdul Kareem, *Iranian Journal of Physics Research*, **16**, **3** (2016) 55.
۱۵. ت عبدالکریم، *مجله پژوهش فیزیک ایران*، **۱۶**، **۳** (۱۳۹۵) ۵۵.
16. G Huang, J Y Bhattacharya, P Ariyawansa, and G Perera, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 011117.
17. A Asgari and S Razi, *Optic Express* **14** (2010) 14604.
18. M Kalafi and L Faraone, *Physica E* **25** (2005) 431.
19. A Vahedi, M kouhi, and A Rostami, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **124** (2013) 6669.
20. A Vahedi, M kouhi and A Akbarzade, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **136** (2017) 265.
۱. م ح قربانی و ع داورپناه، *مجله پژوهش فیزیک ایران*، **۱۷**، **۱** (۱۳۹۶) ۱۴۵.
1. M H Ghorbani and A Davarpanah, *Iranian Journal of Physics Research*, **17**, **1** (2016) 145.
2. A Y Liu, Ch Zhang, J Norman, A Snyder, D Lubyshev, J M Fastenau, A W K Liu, and A C Gossard, *J E Bowers, Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 041104.
3. N Chen, Y He, Y Su, X Li, Q Huang, H Wang, X Zhang, R Tai, and Ch Fan, *Biomaterials* **33** (2012) 1238.
4. V Wood and V Bulovic, *Nano Rev.* **1** (2010) 5202.
5. A D Iacovo, C Venettacci, L Colace, L Scopa, and S Foglia, *Scientific Reports* **6** (2016) 37913.
6. Ch H M Chuang, P R Brown, V Bulovic, and M G Bwindi, *Nat. Mater.* **13** (2015) 796.
7. A W Walker, O Theriault, J F Wheeldon, and K Hinzer, *IEEE J. Photovoltaics* **3** (2013) 1118.
8. M Kouhi, A Vahedi, A Akbarzadeh, Y Hanifehpour, and S W Joo, *Nanoscale Research Letters* **9** (2014) 9.
9. K K Choi, "The physics of Quantum Well Infrared Photodetectors", World Scientific, (1997).
10. J Bleuse, S Carayon, and P Reiss, *Physica E* **21** (2004) 331.