

بررسی اثر همزمان تابش لیزری و ناخالصی هیدروژنی بر خواص اپتیکی یک نقطه کوانتومی کروی

نویسندگان

مجتبی ثروت خواه
دکترای تخصصی
نیلوفر خواجه ای
کارشناسی ارشد

چکیده

در این مقاله، هدف بررسی خواص اپتیکی خطی و مرتبه سوم غیر خطی یک ناخالصی هیدروژنی قرارداده شده در مرکز یک نقطه کوانتومی از جنس GaAs/GaAlAs است. فرض می‌شود، سیستم تحت تأثیر یک تابش لیزری با فرکانس بالا قرار دارد. ویژه توابع و ویژه مقادیر مربوطه، با استفاده از روش المان‌های محدود محاسبه می‌گردند. به علاوه: خواص اپتیکی خطی، مرتبه سوم غیر خطی به ازای مقادیر متفاوت شعاع نقطه کوانتومی، شدت فوتون‌های فرودی و مقادیر متفاوت تابش لیزری مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ تا ببینیم که آیا با افزایش شدت فوتون‌های فرودی ضریب جذب کل و تغییرات ضریب شکست کل کاهش می‌یابد؟ همچنین با افزایش شعاع نقطه کوانتومی و تابش لیزری جابه‌جایی سیستم به سمت انرژی‌های کمتر را می‌توان مشاهده کرد یا خیر؟ کلیدواژه: نقاط کوانتومی، تابش لیزری، ناخالصی هیدروژنی، خواص اپتیکی خطی و غیر خطی

۱- مقدمه

نقطه‌های کوانتومی ساختارهای نانو می‌باشند که از هر سه جهت محدود شده‌اند و یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم در حال توسعه با میزان رشد زیاد می‌باشند. در واقع نقاط کوانتومی نانو کریستال‌هایی هستند که هرچه اندازه کریستال کوچکتر شود، فاصله میان سطوح انرژی نیمه رسانا و همچنین اندازه مؤثر باند ممنوعه افزایش می‌یابد. یکی از بارزترین مشخصات نقاط کوانتومی این است که ساختار الکترونی آنها بوسیله ترازهای انرژی گسسته مشخص می‌گردد.

در سالهای اخیر، مطالعه خواص الکترونی ساختارهای نیمه رسانا که در آنها تکرانه حامل‌های بار، در هر

سه جهت، کوانتیده است؛ توجه زیادی را به خود معطوف داشته‌اند. از طرف دیگر به دلیل کاربرد گسترده این ساختارها در وسایل اپتوالکترونی در سالهای اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر خواص اپتیکی خطی و غیر خطی این نانو ساختارها انجام شده است؛ از جمله این تحقیقات می‌توان به بررسی تأثیرات شدت فوتون‌های فرودی بر خواص اپتیکی، محاسبه اثر وجود ناخالصی و اندازه نقاط کوانتومی بر خواص نوری نقاط کوانتومی اشاره کرد (Hassanabadi, Voss, 2009; 2006). در این تحقیق ضرایب جذب خطی و غیرخطی مرتبه سوم و همچنین تغییرات ضریب شکست خطی و غیر خطی مرتبه سوم یک نقطه کوانتومی در حضور میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین اثر وجود ناخالصی بر خواص نوری نقطه کوانتومی در حضور میدان مغناطیسی بررسی می‌گردد.

۲- تئوری

هامیلتونی یک الکترون در یک نقطه کوانتومی کروی با شعاع R در تقریب جرم مؤثر کاهش یافته در حضور همزمان ناخالصی هیدروژنی و یک تابش لیزری با پتانسیل برداری (که Ω فرکانس میدان لیزری است) به صورت معادله (۱) می‌باشد (Herbert, 2000).

$$H = \frac{p^2}{2m^*} + \frac{1}{2} m^* \omega_0^2 r^2 + V \quad (1)$$

ابتدا لازم به ذکر است که، در منابع متفاوت فرم‌های متفاوتی برای پتانسیل محدود کننده نقطه کوانتومی پیشنهاد شده است که در این مقاله از تقریب پتانسیل هارمونیک استفاده شده است (Herbert, 2000) که در این رابطه جرم مؤثر الکترون، فرکانس پتانسیل هارمونیک و پتانسیل کولنی استتار شده توسط تابش لیزری می‌باشد و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$V = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(r^2 + a_0^2)^{3/2}} \quad (2)$$

در این رابطه $a_0 = \frac{eA}{m^*c\Omega}$ است.

به منظور محاسبه خواص اپتیکی سیستم، ابتدا لازم است ویژه مقادیر انرژی و ویژه توابع متناظر با آنها، با در نظر گرفتن ثابت‌های زیر محاسبه شود:

که $m_0 = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ (kg)}$ و $m^* = 0.067m_0$ جرم الکترون در خلأ است، $\epsilon = 12.4$ ثابت دی الکتریک، شعاع مؤثر بوهر برای GaAs/GaAlAs برابر $a_B = 9.8 \text{ nm}$ است.

(Rezaei, 2011). $R = 0.5a_B$ and $1a_B \text{ (m)}$ شعاع نقطه کوانتومی می‌باشد.

جدول ۱. ممان‌های دو قطبی (M_{ij}) و اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته (E_{21}) به ازای $R = 0.5a_B$ و $a_0 = 0.5, 2a_B$

$R(nm)$	$a_0(nm)$	$M_{11}(C.M)$	M_{22}	M_{12}	$E_{21}(J)$
$0.5a_B$	$0.5a_B$	1.55683×10^{-42}	1.51017×10^{-43}	5.38345×10^{-28}	8.0018×10^{-21}
$0.5a_B$	$2a_B$	6.54188×10^{-43}	3.74276×10^{-42}	5.53482×10^{-28}	7.6135×10^{-21}
$1a_B$	$0.5a_B$	3.18663×10^{-40}	1.73216×10^{-29}	9.79713×10^{-28}	2.3422×10^{-21}
$1a_B$	$2a_B$	2.3422×10^{-21}	4.7526×10^{-29}	10.8998×10^{-28}	1.9599×10^{-21}

در شکل (۱) نمودارهای ضریب جذب خطی، مرتبه سوم غیر خطی و ضریب جذب کلی و تغییرات ضریب شکست خطی مرتبه سوم غیرخطی و تغییرات ضریب شکست کل نقطه کوانتومی با شعاع $R = 0.5a_B$ به صورت تابعی از انرژی فوتون تابشی و به ازای مقادیر متفاوت تابش لیزری رسم شده‌اند.

با توجه به این نمودارها، مشاهده شد که ضریب جذب خطی همواره مثبت است؛ در حالی که ضریب جذب غیر خطی منفی می باشد. پس در این صورت در نظر گرفتن ضریب جذب غیر خطی باعث کاهش ضریب جذب کل می شود. علاوه بر این با افزایش تابش لیزری کمینه مقدار ضریب جذب غیر خطی کاهش یافته و بیشینه مقدار ضریب جذب خطی افزایش پیدا میکند؛ درحالی با افزایش تابش لیزری میزان تغییرات ضریب شکست کل افزایش می‌یابد، این پدیده به دلیل افزایش ممان دو قطبی با افزایش تابش لیزری می باشد.

همانطور که می‌بینیم با افزایش تابش لیزری طیف جذبی و تغییرات ضریب شکست، کل سیستم به سمت انرژی‌های کمتر جابه‌جایی پیدا می‌کند. این روند به دلیل آن است که افزایش تابش لیزری در واقع هم‌ارز کاهش اثر ناخالصی هیدروژنی بر طیف انرژی سیستم می‌باشد؛ بنابراین با افزایش تابش لیزری اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته کاهش پیدا می‌کند که باعث به وجود آمدن این جابه‌جایی در سیستم می‌شود.

به منظور محاسبه خواص اپتیکی خطی و مرتبه سوم غیر خطی از روش ماتریس چگالی و روش اختلال استفاده شده است. ابتدا فرض بر آن است که سیستم مورد نظر در یک میدان الکترومغناطیسی $E(t) = \vec{E}e^{-i\omega t} + \vec{E}^*e^{i\omega t}$ قرار دارد. در اثر این میدان یک گذار اپتیکی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته رخ می‌دهد. با استفاده از روش‌های ذکر شده روابط حاکم بر ضریب جذب و تغییرات ضریب شکست خطی و مرتبه سوم غیر خطی از روابط زیر به دست می‌آیند:

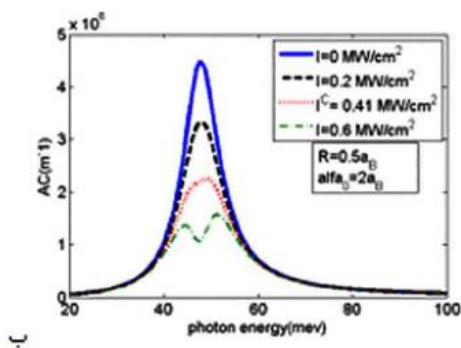
$$d(I, \omega) = d^{(1)}(\omega) + d^{(3)}(I, \omega) = \left(\omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0}} \frac{|M_{21}|^2 \sigma_v \hbar \Gamma_{12}}{[E_{21} - \hbar\omega]^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} \right) + \left(-\omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0}} \frac{2|M_{21}|^4 \sigma_v \hbar \Gamma_{12}}{n_r \epsilon_0 c [(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2]^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta n(I, \omega)}{n_t} = \frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_t} + \frac{\Delta n^{(3)}(I, \omega)}{n_t} = \frac{1}{2\epsilon_0 n_t^2} \frac{\sigma_v |M_{21}|^2 (E_{21} - \hbar\omega)}{(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} + \left\{ -\frac{\mu c I}{4\epsilon_0 \hbar^2} \frac{\sigma_v |M_{21}|^2}{[(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2]^2} \times \left\{ 4(E_{21} - \hbar\omega)|M_{21}|^2 - \frac{(M_{22} - M_{11})^2}{E_{21}^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} \right\} \times \left[\frac{(E_{21} - \hbar\omega)(E_{21}(E_{21} - \hbar\omega) - (\hbar\Gamma_{12})^2)}{-(\hbar\Gamma_{12})^2 (2E_{21} - \hbar\omega)} \right] \right\} \quad (4)$$

در محاسبات انجام شده چگالی حامل‌های بار برابر $n_r = 3.2 \times 10^{24} m^{-3}$ ، ضریب شکست نیمه هادی $n_t = 3.2$ و زمان واهلش برابر با $\tau_{12} = 0.14 ps$ می‌شد. در روابط بالا $E_{21} = E_2 - E_1$ اختلاف انرژی بین حالت‌هایی است که گذار بین آنها اتفاق می‌افتد $M_{21} = \langle 2|e|1 \rangle$ عناصر ماتریس چگالی ممان دو قطبی می‌باشند (Xie, ۲۰۱۱; Safarpour, ۲۰۱۲). لازم به ذکر است که به دلیل پیچیدگی در ساختار مورد نظر از روش المان محدود برای بدست آوردن ویژه توابع و ویژه مقادیر انرژی استفاده شده است.

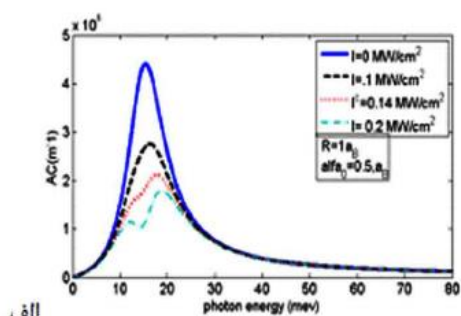
۳- شبیه سازی عددی

به منظور محاسبه خواص اپتیکی سیستم لازم است که ابتدا ممان‌های دو قطبی (M_{21}) و همچنین اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته (E_{21}) را محاسبه کنیم. در جدول (۱) این کمیتها برای دو نقطه کوانتومی به شعاعهای؟؟؟؟ و $R = 1a_B$ و به ازای تابش‌های مختلف میدان لیزری $a_0 = 0.5, 2a_B$ گزارش شده‌اند.

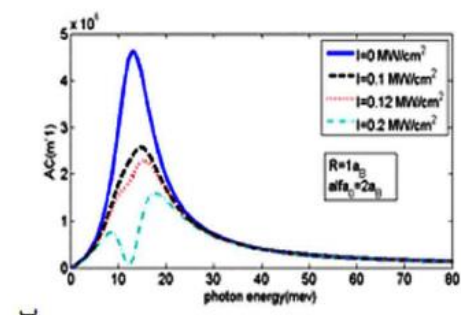


ب

شکل ۲ نمودار ضریب جذب کل برای نقطه کوانتومی با شعاع $R = 0.5a_B$ بر حسب انرژی فوتون-های تابشی رسم شده-اند به ازای مقادیر متفاوت تابش لیزری الف) $a_0 = 0.5a_B$ ب) $a_0 = 2a_B$

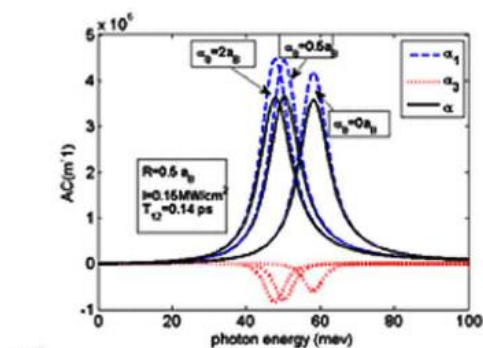


الف

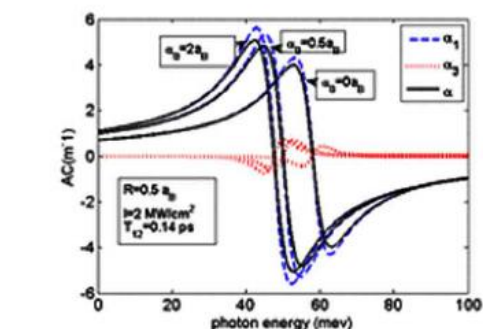


ب

شکل ۳ نمودار ضریب جذب کل برای نقطه کوانتومی با شعاع $R = 1a_B$ بر حسب انرژی فوتون-های تابشی به ازای مقادیر متفاوت تابش لیزری الف) $a_0 = 0.5a_B$ ب) $a_0 = 2a_B$. در شکل-های (۴) الف و ب و شکل (۵) الف و ب نمودار ضریب شکست کل، برای مقادیر متفاوت شعاع نقطه کوانتومی، شدت فوتون-های فرودی و تابش لیزری به صورت تابعی از انرژی فوتون-های تابشی رسم شده است. همان طور که مشاهده می-کنیم با افزایش شدت فوتون-های فرودی تغییرات ضریب شکست کل، کاهش پیدا می-کند و همچنین با افزایش تابش لیزری و شعاع نقطه کوانتومی تغییرات ضریب شکست کل افزایش یافته است و سیستم به سمت انرژی-های کمتر جابه-جایی دارد که این به دلیل کاهش اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین

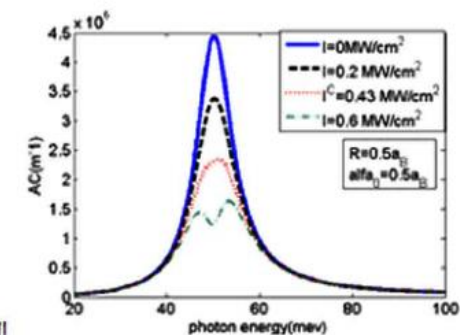


الف



ب

شکل ۱ الف) نمودارهای ضریب جذب خطی، مرتبه سوم غیر خطی و ب) ضریب جذب کلی و تغییرات ضریب شکست خطی مرتبه سوم غیرخطی و تغییرات ضریب شکست کل نقطه کوانتومی با شعاع $R = 0.5a_B$ به صورت تابعی از انرژی فوتون-ها و به ازای مقادیر متفاوت تابش لیزری. در شکل (۲) الف و ب نمودار ضریب جذب کل به ازای $R = 0.5a_B$ و $R = 1a_B$ و به ازای شدت-های مختلف $a_0 = 0.5, 2a_B$ رسم شده است. همانطور که مشاهده می-شود با افزایش شدت فوتون-های فرودی ضریب جذب کل کاهش پیدا می-کند. بیشینه مقدار ضریب جذب کل به ازای شدت-های بیشتر از یک شدت ویژه به دو قله شکسته می شود. شدت ویژه با افزایش تابش لیزری و شعاع نقطه کوانتومی کاهش می-یابد و همچنین افزایش شعاع و تابش لیزری باعث جابه-جایی طیف اپتیکی سیستم به سمت انرژی های کمتر می-شود.



الف

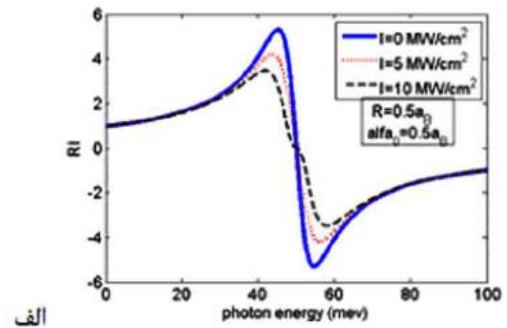
۴- نتیجه گیری:

در این مقاله خواص اپتیکی خطی و مرتبه سوم غیر خطی یک نقطه کوانتومی کروی مورد بررسی قرار گرفت. در مرکز نقطه کوانتومی یک ناخالصی هیدروژنی در نظر گرفته شد، با فرض بر آنکه این سیستم تحت تأثیر یک تابش لیزری قرار گرفته است. وجود همزمان تابش لیزری و ناخالصی هیدروژنی باعث به وجود آمدن یک پتانسیل کولنی استتار شده گردید که اثر قابل ملاحظه بر خواص اپتیکی سیستم داشت. به منظور محاسبه خواص اپتیکی سیستم ویژه مقادیر انرژی و ویژه توابع متناظر با آن را از روش المان محدود محاسبه شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت فوتون-های تابیده شده به سیستم خواص اپتیکی مرتبه سوم افزایش پیدا کرد و در نتیجه خواص اپتیکی کل کاهش یافت و به ازای یک شدت بحرانی طیف جذبی، سیستم به حالت اشباع رسید.

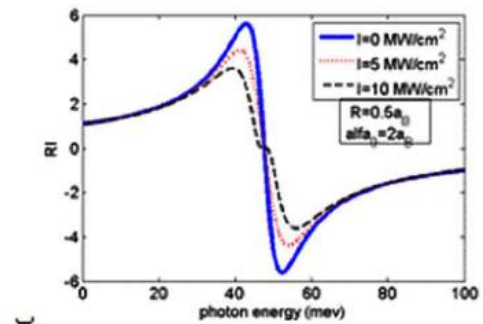
با افزایش تابش لیزری و شعاع نقطه کوانتومی طیف جذبی و تغییرات ضریب شکست سیستم، به سمت انرژی-های کمتر، جابه جایی پیدا کرد. طیف جذبی سیستم به ازای نقاط کوانتومی با شعاع های بزرگتر در شدت-های پایین-تری به حالت اشباع رسید.

مراجع

- Journal of Crystal Growth (۲۰۰۲), Chen L., Stoleru V. G., Pan D., Towe E
۲۶۳, P. ۲۴۲
۲۹۸, P. ۲۵ Physica E (۲۰۰۴), Ferry D. K., Bird J. P., Akis R
۶۷۹, P. ۳۷۳ Physics Letters A (۲۰۰۹), Hassanabadi H., Rajabi A. A
۲۱۵, P. ۵ Physica E (۲۰۰۰), Herbert Li E
۱۱۲۸, P. ۴۰۷ Physica B (۲۰۱۲), Khordad R
۴۰۶, Physica B (۲۰۱۱), Rezaei G., Vahdani M. R. K., Vaseghi B
۱۴۸۸
Superlattices and Microstructures (۲۰۱۲), Safarpour Gh., Moradi M., Barati M
۶۸۷, P. ۵۲
۴۴۱, P. ۱۷۴ Computer Physics Communications (۲۰۰۶), Voss H
۱۴۱۱, P. ۴۳ Physica E (۲۰۱۱), Xie W

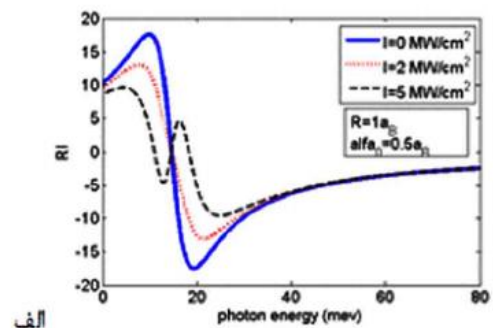


الف

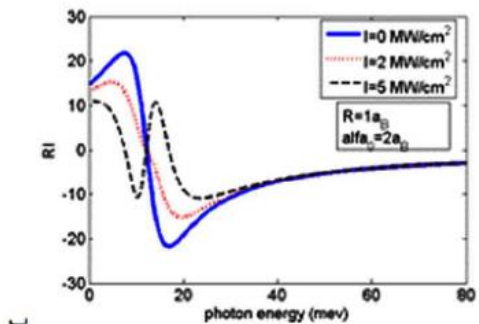


ب

شکل ۴ نمودار تغییرات ضریب شکست کل برای نقطه کوانتومی با شعاع $R = 1a_B$ بر حسب انرژی فوتون-های تابشی به ازای مقادیر متفاوت تابش لیزری الف) $a_0 = 0.5a_B$ ، ب) $a_0 = 2a_B$



الف



ب

شکل ۵ نمودار تغییرات ضریب شکست کل برای نقطه کوانتومی با شعاع $R = 1a_B$ بر حسب انرژی فوتون-های تابشی به ازای مقادیر متفاوت تابش لیزری الف) $a_0 = 0.5a_B$ ، ب) $a_0 = 2a_B$