

Research Paper

Effect of the Incident Light Polarization and Gaussian Impurity Parameters on the Second Harmonic Generation of Quantum Dot¹

Parinaz Hosseinpour²

Received: 2019/11/21
Accepted: 2020/01/25

Abstract

The influence of impurity parameters as well as the type of incident light polarization at the disk-like quantum dot with including the Rashba spin-orbit coupling on the second harmonic generation are studied. The impurity potential is assumed to be Gaussian and its effective parameters are: potential strength, decay length, impurity type and its location at the quantum dot. The calculations are performed in the framework of the effective mass approximation. The results showed that the presence of impurity leads to changes in the second harmonic generation, and the value of the second harmonic generation can be controlled by changing the impurity parameters. For example, in both types of the impurities, by increasing the impurity distance from dot center, the maximum value of this coefficient shifts to higher energies. The role of light polarization in this coefficient is also investigated and it was shown that the type of light polarization has no effect on the peak position of the second harmonic generation and only affects its peak value.

Keywords: *Quantum Dot, Second Harmonic Generation, Gaussian Impurity, Incident Light Polarization, Rashba Spin-Orbit Interaction.*

¹ DOI: 10.22051/jap.2020.29151.1139

² Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Sahand University of Technology, 51335-1996, Tabriz, Iran. Email: phosseinpour@sut.ac.ir

مقاله پژوهشی

تأثیر قطبش نور فرودی و پارامترهای ناخالصی گاوسی در ضریب تولید هماهنگ دوم نقطه کوانتومی^۱

پریناز حسین پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

چکیده

در این مقاله، تأثیر پارامترهای ناخالصی و همچنین نوع قطبش نور فرودی در نقطه کوانتومی قرص شکل در ضریب تولید هماهنگ دوم و با در نظر گرفتن جفت شدگی اسپین-مدار راشبا مطالعه شده است. پتانسیل ناخالصی، به صورت گاوسی فرض شده و پارامترهای مؤثر آن عبارتند از: قدرت پتانسیل، طول میرایی، نوع ناخالصی و مکان آن در نقطه کوانتومی. محاسبات در قالب تقریب جرم مؤثر انجام شده‌اند. نتایج نشان دادند که حضور ناخالصی سبب ایجاد تغییراتی در ضریب تولید هماهنگ دوم می‌شود و با تغییر دادن پارامترهای ناخالصی، می‌توان مقدار ضریب تولید هماهنگ دوم را کنترل کرد. برای مثال، در هر دو نوع ناخالصی با افزایش فاصله ناخالصی از مرکز نقطه کوانتومی، بیشینه مقدار این ضریب به سمت انرژی‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود همچنین نقش قطبش نور فرودی در مقدار این ضریب نیز بررسی شده و نشان داده شد که نوع قطبش تأثیری در مکان بیشینه ضریب ندارد و فقط مقدار آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: نقطه کوانتومی، ضریب تولید هماهنگ دوم، ناخالصی گاوسی، قطبش نور فرودی، اندرکنش اسپین-مدار راشبا.

^۱ DOI: 10.22051/jap.2020.29151.1139

^۲ استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. Email: phosseinpour@sut.ac.ir

۱. مقدمه

در چند سال اخیر، نقاط کوانتومی به خاطر کاربردشان در شاخه‌های متنوع علم، موضوع مهم بسیاری از مطالعات نظری و تجربی بوده است. این ساختار کوانتومی مزیت‌هایی از قبیل عناصر ماتریسی گذار بزرگ بین ترازهای کوانتومی مختلف [۱] و طیف انرژی مشابه با سیستم‌های اتمی یا ملکولی دارد. همچنین نقاط کوانتومی به سبب طیف نشر باریکشان، نامزد ایده آلی برای رمزگذاری نوری هستند. دستکاری این ساختارها توسط اختلالات کوچک، موجب استفاده آن‌ها در سامانه‌هایی از قبیل ترانزیستورهای یاخته خورشیدی، LEDها، تصویربرداری پزشکی و محاسبات کوانتومی می‌شود. یک روش دستکاری نقاط کوانتومی و تنظیم خواص نوریشان، افزودن ناخالصی به آن‌هاست [۲-۷]. عموماً، دو مدل برای توصیف پتانسیل ناخالصی در نقاط کوانتومی استفاده می‌شود: (۱) پتانسیل هیدروژن‌گونه، (۲) پتانسیل گاوسی. انرژی بستگی و خواص نوری غیرخطی ناخالصی هیدروژن‌گونه در نانو ساختارها به طور گسترده بررسی شده است [۸-۱۵] ولی تعداد مطالعات ناخالصی گاوسی اندک است.

با پیشرفت‌هایی در ساخت نقاط کوانتومی، شکل و اندازه مختلف نقاط می‌تواند صورت‌بندی شود [۱۶-۲۰]. به این منظور، پتانسیل‌های محبوس‌سازی نظری متنوعی پیشنهاد و بررسی شده است، که در میان آن‌ها پتانسیل سهمی وار مناسب‌تر است. همچنین، در نقاط کوانتومی، اندرکنش‌های اسپین‌مدار از جمله اندرکنش راشبا که به دلیل نامتقارنی ساختاری در نانو ساختارها به وجود می‌آید، اندرکنش‌های اساسی هستند که با جزئیات دقیق بررسی نشده‌اند [۲۱، ۲۲]. در میان خواص نوری غیرخطی، تولید هماهنگ دوم (SHG) در ساختارهای نامتجانس کوانتومی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲۳-۲۵]. SHG در چاه‌های کوانتومی به طور گسترده و همچنین در نقاط کوانتومی مطالعه شده است. برای مثال در تحقیقی، تولید هماهنگ دوم در چاه کوانتومی با حل معادله شرودینگر با جرم وابسته به مکان مطالعه شده است [۲۶]. SHG در چاه کوانتومی تحت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی نیز بررسی شده است [۲۷]. در مقاله دیگری، خواص نوری غیرخطی در چاه کوانتومی دوگانه نیز مطالعه شده است [۲۸]. همه مطالعات نشان داده‌اند که عوامل بیرونی مانند ناخالصی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، فشار و دما می‌توانند خواص نوری غیرخطی نانو ساختارها را تغییر دهند و شدت خروجی ادوات فوتونیک نیز می‌تواند توسط این عوامل، تنظیم و اصلاح شود.

با این همه، در میان مقالات موجود، تأثیر ناخالصی گاوسی در نقطه کوانتومی سهمی وار و جهت قطبش نور فرودی در SHG با جزئیات دقیق بررسی نشده است. به این منظور در این مقاله، نقطه کوانتومی InAs به صورت قرصی با پتانسیل محبوس‌سازی جانبی نوسانگر هماهنگ فرض

شده و محاسبات با در نظر گرفتن اندرکنش اسپین مدار راشبا و ناخالصی گاوسی در چارچوب تقریب جرم مؤثر و صورت بندی ماتریس چگالی انجام شده است. هدف بررسی تأثیر پارامترهای ناخالصی گاوسی از جمله مکان، قدرت، طول میرایی و نوع ناخالصی و قطبش نور فرودی در تولید هماهنگ دوم است. در واقع، نشان می دهیم که از پارامترهای ناخالصی همراه با اندرکنش اسپین مدار راشبا می توان برای تنظیم پاسخ نوری نقاط کوانتمی به منظور کاربردهای عملی از جمله تولید نور با فرکانس دو برابر (SHG) استفاده کرد.

۲. تئوری و روش های محاسباتی

نقاط کوانتمی نیم رسانا که محبوس سازی حاملین در آنها توسط گیت های الکتروستاتیکی ایجاد می شود، با فرض اینکه جهت Z را می توان صفر در نظر گرفت، به صورت پتانسیل سهمی وار مدلبندی می شوند. هامیلتونی نهایی توصیف کننده الکترون در این نقطه با در نظر گرفتن اندرکنش اسپین مدار راشبا و ناخالصی به صورت زیر خواهد بود،

$$H = \frac{1}{2m^*} (\vec{p} - \frac{e}{c} \vec{A}) + \frac{1}{2} m^* \omega_0^2 (x^2 + y^2) + \frac{\alpha_R}{\hbar} [\sigma \times (\vec{p} - \frac{e}{c} \vec{A})]_z + V_{imp}(x, y), \quad (1)$$

که در آن، جمله اول انرژی جنبشی، جمله دوم پتانسیل محبوس سازی سهمی وار در صفحه قرص ($\hbar\omega_0$ نشان دهنده قدرت پتانسیل محبوس سازی است) و جمله سوم اندرکنش اسپین مدار راشباست. همان طور که می دانیم اسپین مؤلفه اساسی و جدانشدنی الکترون هاست و به دلایل زیادی ویژگی جالبی برای الکترون ها محسوب می شود. یکی از این دلایل امکان تزویج اسپین با تکانه مداری الکترون است. در بیشتر سیستم های ماده چگال، الکترون ها از پتانسیل بلوری تأثیر می پذیرند و اگر گرادیان پتانسیل وجود داشته باشد، اندرکنش های مؤثر اسپین مدار ایجاد می شوند. از طرفی، فقدان تقارن وارونی در نانو ساختارها به جفت شدگی اسپین مدار نوع راشبا (جمله سوم) می انجامد [۲۹] که در آن α_R قدرت جفت شدگی و σ ماتریس های پائولی هستند.

جمله آخر در رابطه (۱) نیز پتانسیل ناخالصی گاوسی است که با رابطه زیر بیان می شود،

$$V_{imp}(x, y) = V_0 e^{-[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]/d^2}, \quad (2)$$

که در آن، V_0 قدرت پتانسیل ناخالصی است که $V_0 > 0$ ($V_0 < 0$) برای ناخالصی نوع دافع (جاذب) می باشد و d پارامتر ناخالصی است که میزان توزیع فضایی ناخالصی را مشخص می کند. مقدار کوچک d نشان دهنده آن است که توزیع فضایی ناخالصی به شدت محدود است، حال آنکه مقدار بزرگ آن بیانگر پخش شدگی بیشتر ناخالصی است [۳۰]. (x_0, y_0) نیز مکان مرکز ناخالصی واقع در نقطه کوانتمی را نشان می دهد.

با بسط هامیلتونی برحسب توابع موج نوسانگر هماهنگ دوبعدی، به روش قطری سازی ماتریس هامیلتونی، می توان ویژه مقادیر انرژی و ویژه توابع را محاسبه کرد. بعد از به دست آوردن این مقادیر، ضریب تولید هماهنگ دوم $(\chi_{2\omega}^{(2)})$ با استفاده از روش ماتریس چگالی و فرایند تکرار محاسبه می شود که در زیر آورده شده است [۳۱، ۳۲]،

$$\chi_{2\omega}^{(2)} = \frac{e^3 N M_{01} M_{12} M_{20}}{\epsilon_0 \hbar^2 (\omega - \omega_{10} + i\Gamma_{10})(2\omega - \omega_{20} + i\Gamma_{20})} \quad (3)$$

که در آن، ϵ_0 ثابت گذردهی فضای آزاد، N چگالی حامل، ω فرکانس نور فرودی و $\Gamma_{10} = \Gamma = \Gamma_{20}$ آهنگ واهلش است. $\omega_{ji} = E_j - E_i/\hbar$ فرکانس گذار و $M_{ij} = |\langle \psi_i | e \cdot r | \psi_j \rangle|$ عناصر غیرقطری ماتریس ممان دوقطبی بین حالات مختلف است ($i, j = 0, 1, 2$ که 0 و 1 و 2 به ترتیب نشان دهنده حالت پایه و اولین حالت برانگیخته و دومین حالت برانگیخته هستند). در این رابطه، Γ نشان دهنده قطبش نور فرودی (جهت x قطبش افقی یا y قطبش عمودی) و Ψ_i ویژه توابع می باشند. با توجه به رابطه فوق، ملاحظه می شود که ضریب تولید هماهنگ دوم، دو مقدار بیشینه دارد که مکان آن ها شدیداً وابسته به انرژی گذار بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته و انرژی گذار بین حالت پایه و دومین حالت برانگیخته است. همچنین حاصلضرب ممان دوقطبی بین سه حالت مذکور مقدار بیشینه SHG را تعیین خواهد کرد.

۳. نتایج محاسبات

در این بخش نتایج محاسبات عددی مربوط به نقطه کوانتومی InAs بیان شده است. مقدار پارامترهای استفاده شده در این محاسبات عبارتند از: $m^* = 0.023m_e$ [۳۳] (جرم الکترون می باشد)، $\Gamma = 0.5 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ و $\Gamma_{10} = \Gamma_{20} = \Gamma$ و $N = 3.59 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$. همچنین، قدرت پتانسیل محبوس سازی و قدرت اندرکنش راشبا به ترتیب $\hbar\omega_0 = 4 \text{ meV}$ و $\alpha_R = 20 \text{ meV.nm}$ در نظر گرفته شده اند [۳۵].

ابتدا تأثیر طول میرایی ناخالصی گاوسی برای هر دو نوع آن یعنی جاذب و دافع در ضریب تولید هماهنگ دوم بررسی شده است. در شکل های ۱ و ۲، SHG برحسب انرژی نور فرودی به ترتیب با قطبش افقی و عمودی و به ازای طول های میرایی مختلف و هر دو نوع ناخالصی رسم شده است. شکل ها نشان می دهند که برای هر منحنی دو مقدار بیشینه وجود دارد که بیشینه تیز و با اندازه بزرگ تر مربوط به انرژی گذار از حالت پایه به اولین حالت برانگیخته و بیشینه کوچک تر مربوط به انرژی گذار از حالت پایه به دومین حالت برانگیخته است. شکل ۱ بیانگر آن است که با افزودن ناخالصی نوع جاذب با طول میرایی 2 nm به نقطه کوانتومی سهمی وار می توان مقدار تولید هماهنگ دوم را افزایش داد و با افزایش طول میرایی ناخالصی جاذب، مکان مقدار بیشینه SHG

نسبت به حالت بدون ناخالصی به سمت انرژی‌های بزرگ‌تر جابه‌جا شده و اندازه آن کاهش می‌یابد، به طوری که در طول میرایی 8nm آن قدر کوچک است که ۱۰۰ برابر بزرگ‌تر رسم شده است. حال آنکه برعکس ناخالصی نوع جاذب، در ناخالصی دافع با افزایش طول میرایی، مکان مقدار بیشینه تولید هماهنگ دوم به سمت انرژی‌های کوچک‌تر جابه‌جا شده و اندازه آن افزایش می‌یابد. علت جابه‌جایی مکان مقدار بیشینه مربوط به تغییرات انرژی گذار بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته و انرژی گذار بین حالت پایه و دومین حالت برانگیخته برحسب پارامترهای ناخالصی است، که در جدول ۱ برای پارامترهای مختلف ناخالصی گزارش شده است. با توجه به اینکه در ناخالصی نوع دافع، مقادیر انرژی بستگی مثبت ولی در ناخالصی نوع جاذب منفی هستند، رفتار SHG در هر دو نوع ناخالصی متفاوت است.

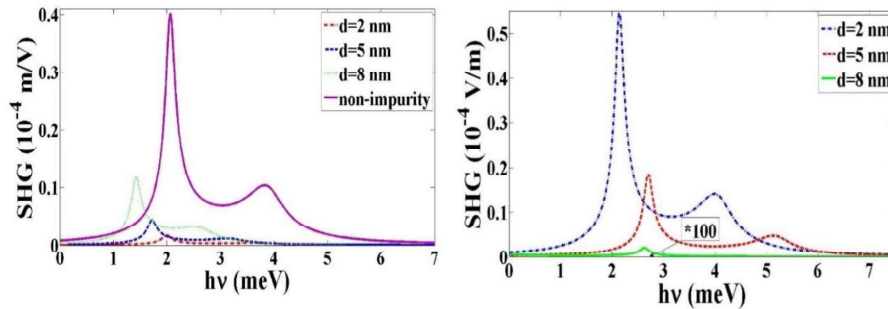
جدول ۱ انرژی گذار بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته، انرژی گذار بین حالت پایه و دومین حالت برانگیخته، انرژی بستگی برحسب پارامترهای مختلف ناخالصی گاوسی در نقطه کوانتمی با در نظر گرفتن اندرکنش اسپین‌مدار راشبا.

پارامترهای ناخالصی		انرژی بستگی	$E_2 - E_0$	$E_1 - E_0$
$V_0 = +32 \text{ meV}$ ناخالصی نوع دافع واقع در مرکز نقطه	$d=2 \text{ nm}$	0,144793272	3,971361	3,743413
	$d=5 \text{ nm}$	0,710662852	3,431113	3,203216
	$d=8 \text{ nm}$	1,423369284	2,834796	2,607206
$V_0 = -32 \text{ meV}$ ناخالصی نوع جاذب واقع در مرکز نقطه	$d=2 \text{ nm}$	- 0,163980624	4,278643	4,050705
	$d=5 \text{ nm}$	- 1,315207532	5,401823	5,173841
	$d=8 \text{ nm}$	- 1,54346495	5,260535	0,020317
$d=5 \text{ nm}$ ناخالصی نوع جاذب واقع در مرکز نقطه	$V_0 = -10 \text{ meV}$	- 0,323642104	4,430342	4,202385
	$V_0 = -40 \text{ meV}$	- 1,809202162	5,888106	5,66012
	$V_0 = -50 \text{ meV}$	- 2,568387684	6,637224	6,409239
$d=5 \text{ nm}$ ناخالصی نوع دافع واقع در مرکز نقطه	$V_0 = +10 \text{ meV}$	0,267106456	3,856779	3,62885
	$V_0 = +40 \text{ meV}$	0,83575178	3,312288	3,084403
	$V_0 = +55 \text{ meV}$	1,032955988	3,12653	2,89867
$V_0 = +32 \text{ meV}$ $d=5 \text{ nm}$ ناخالصی نوع دافع	$x_0 = 2 \text{ nm}$	0,654805476	3,642851	3,325685
	$x_0 = 4 \text{ nm}$	0,511888536	4,264853	3,498287
	$x_0 = 7,5 \text{ nm}$	0,212198432	4,634608	3,794313
$V_0 = -32 \text{ meV}$ $d=5 \text{ nm}$ ناخالصی نوع جاذب	$x_0 = 2 \text{ nm}$	- 1,460033022	5,465021	5,05067
	$x_0 = 4 \text{ nm}$	-2,397305646	6,375726	4,930003
	$x_0 = 8 \text{ nm}$	- 3,0197473152	6,969603	3,216738

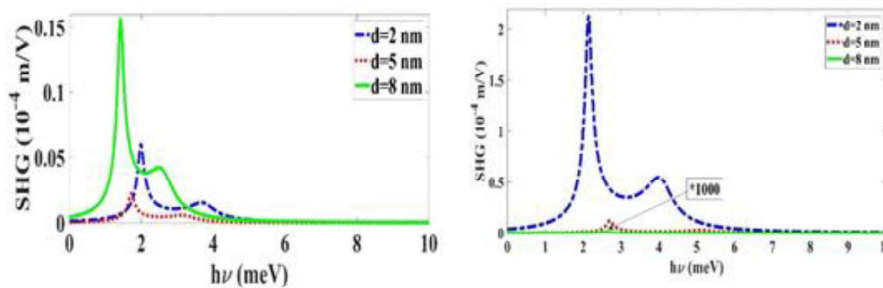
از مقایسه شکل‌های ۱ و ۲ نیز مشاهده می‌کنیم که مقدار ضریب هماهنگ دوم در طول میرایی کوچک در قطبش عمودی بزرگ‌تر از قطبش افقی است و همچنین تأثیر نوع قطبش در ناخالصی

۴۶ / تأثیر قطبش نور فرودی و پارامترهای ناخالصی گاوسی در ضریب تولید هماهنگ دوم نقطه کوانتومی

نوع جاذب بیشتر از نوع دافع است. همان طور که انتظار می‌رود نوع قطبش نور فرودی بر روی ویژه مقادیر تأثیری ندارد و تنها اثر آن بر روی عناصر غیر قطری ماتریس ممان دوقطبی می‌باشد. در نتیجه مکان بیشینه SHG در هر دو نوع قطبش یکسان و فقط مقدار آن متفاوت خواهد بود.

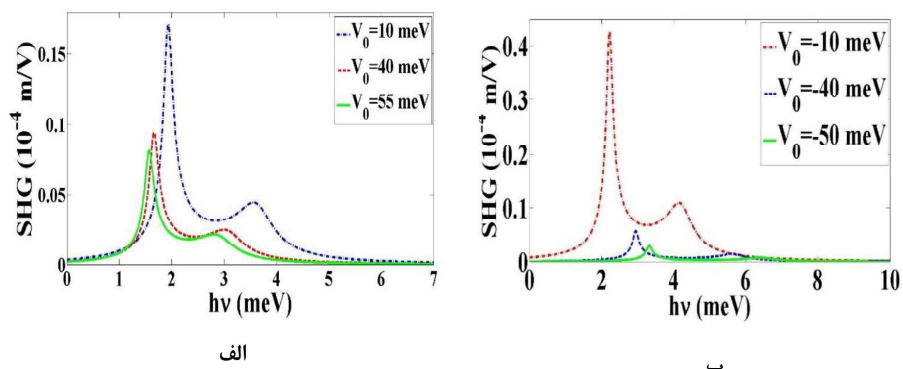


شکل ۱ ضریب تولید هماهنگ دوم برحسب انرژی فوتون فرودی با قطبش افقی در نقطه کوانتومی با ناخالصی نوع الف) دافع ($V_0 = +32$ meV) (منحنی پررنگ مربوط به حالت بدون ناخالصی است) و ب) جاذب ($V_0 = -32$ meV) واقع در مرکز نقطه به ازای طول‌های میرایی مختلف ناخالصی.



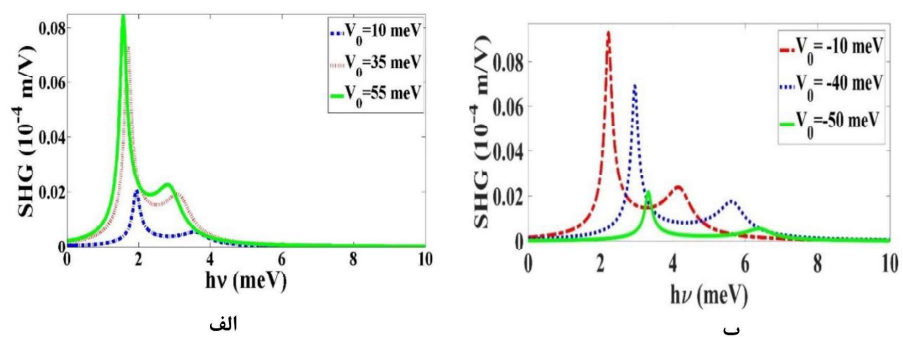
شکل ۲ ضریب تولید هماهنگ دوم برحسب انرژی فوتون فرودی با قطبش عمودی در نقطه کوانتومی با ناخالصی نوع الف) دافع ($V_0 = +32$ meV) و ب) جاذب ($V_0 = -32$ meV) واقع در مرکز نقطه به ازای طول‌های میرایی مختلف ناخالصی.

ضریب SHG برای نقطه کوانتومی در حضور هر دو نوع ناخالصی دافع و جاذب واقع در مرکز نقطه به ازای قدرت‌های مختلف ناخالصی برحسب انرژی نور فرودی با قطبش افقی و عمودی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان طور که می‌بینید در ناخالصی نوع دافع، با افزایش قدرت ناخالصی، مقدار بیشینه SHG به سمت انرژی‌های کمتر و در ناخالصی نوع جاذب، به سمت انرژی‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود.

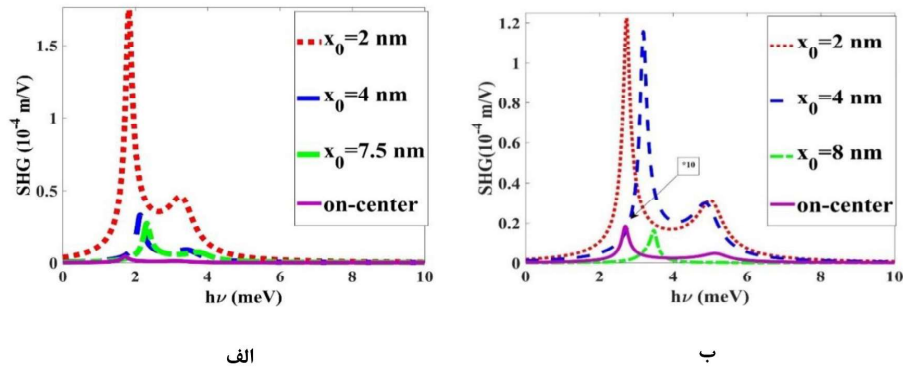


شکل ۳ ضریب تولید هماهنگ دوم برحسب انرژی فوتون فرودی با قطبش افقی در نقطه کوانتومی با ناخالصی نوع الف) دافع و ب) جاذب واقع در مرکز نقطه به ازای قدرت‌های مختلف ناخالصی ($d=5 \text{ nm}$).

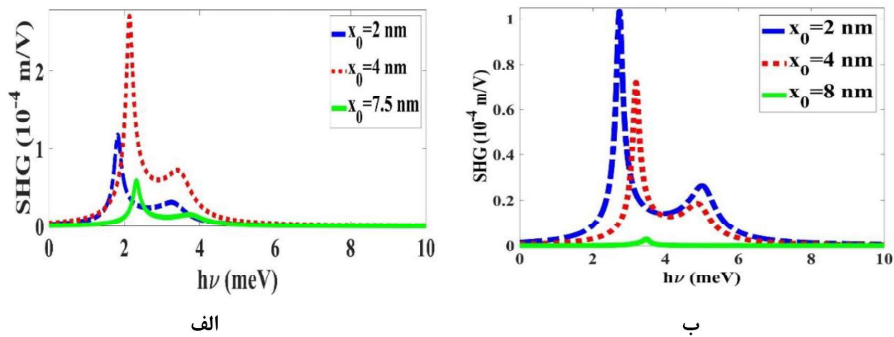
دلیل این رفتار افزایش انرژی گذار بین سه تا از پایین‌ترین ترازهای انرژی در ناخالصی نوع جاذب (به دلیل منفی بودن انرژی بستگی) و کاهش آن در ناخالصی نوع دافع (به دلیل مثبت بودن انرژی بستگی) است، که در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در هر دو نوع ناخالصی، با افزایش پتانسیل ناخالصی، مقدار تولید هماهنگ دوم برای نور با قطبش افقی کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار آن است که با افزایش قدرت پتانسیل ناخالصی، محبوس‌سازی و در نتیجه فاصله ترازهای انرژی افزایش یافته و مقدار ممان دوقطبی و به تبع آن مقدار بیشینه تولید هماهنگ دوم کاهش می‌یابد. حال آنکه رفتار SHG برای نور با قطبش عمودی برای ناخالصی نوع دافع و جاذب متفاوت است. همچنین از مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ مشخص می‌شود که به ازای پتانسیل‌های مختلف ناخالصی، مقدار SHG برای قطبش عمودی کمتر از قطبش افقی است.



شکل ۴ ضریب تولید هماهنگ دوم برحسب انرژی فوتون فرودی با قطبش عمودی در نقطه کوانتومی با ناخالصی نوع الف) دافع و ب) جاذب واقع در مرکز نقطه به ازای قدرت‌های مختلف ناخالصی ($d=5 \text{ nm}$).



شکل ۵ ضریب تولید هماهنگ دوم برحسب انرژی فوتون فرودی با قطبش افقی در نقطه کوانتومی با ناخالصی نوع الف) دافع $V_0 = +32$ meV و ب) جاذب $V_0 = -32$ meV به ازای مکان‌های مختلف ناخالصی در نقطه کوانتومی ($d=5$ nm) (منحنی پررنگ برای ناخالصی واقع در مرکز رسم شده است).



شکل ۶ ضریب تولید هماهنگ دوم برحسب انرژی فوتون فرودی با قطبش عمودی در نقطه کوانتومی با ناخالصی نوع الف) دافع $V_0 = +32$ meV و ب) جاذب $V_0 = -32$ meV به ازای مکان‌های مختلف ناخالصی در نقطه کوانتومی ($d=5$ nm).

همچنین، تأثیر مکان ناخالصی (x_0) در نقطه کوانتومی در تولید هماهنگ دوم در شکل‌های ۵ و ۶ برای هر دو نوع ناخالصی و به ترتیب برای قطبش افقی و عمودی نور فرودی نشان داده شده است. در شکل ۵، منحنی پررنگ به منظور مقایسه بهتر برای ناخالصی واقع در مرکز نقطه کوانتومی رسم شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو نوع ناخالصی، با جابه‌جایی اندک ناخالصی از مرکز نقطه کوانتومی، مقدار تولید هماهنگ دوم افزایش می‌یابد، به طوری که در $x_0 = 2$ nm بیشترین مقدار را خواهد داشت، سپس با افزایش فاصله، بیشینه مقدار SHG به سمت انرژی‌های بزرگ‌تر جابه‌جا شده و اندازه آن کاهش می‌یابد. این جابه‌جایی به سمت انرژی‌های بزرگ‌تر، به رفتار انرژی گذار از حالت پایه به اولین حالت برانگیخته ($E_1 - E_0$) و نیز دومین حالت برانگیخته ($E_2 - E_0$) وابسته

است که داده‌های مربوطه در جدول ۱ آورده شده‌اند. همانگونه که داده‌ها نشان می‌دهند با افزایش فاصله، انرژی‌های گذار نیز افزایش یافته است و تنها تفاوت موجود بین دو نوع ناخالصی آن است که در ناخالصی نوع جاذب، انرژی گذار از حالت پایه به اولین حالت برانگیخته با فاصله گرفتن ناخالصی از مرکز نقطه، کاهش می‌یابد که به همین دلیل بیشینه دوم منحنی SHG به سمت انرژی‌های کمتر جابه‌جا می‌شود. از مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ نیز مشاهده می‌شود که رفتار SHG برحسب فاصله ناخالصی از مرکز نقطه در هر دو نوع قطبش یکسان است و در ناخالصی نوع جاذب برخلاف نوع دافع، مقدار ضریب تولید هماهنگ دوم برای نور با قطبش عمودی کمتر از نور با قطبش افقی است، که علت آن مربوط به تغییرات حاصلضرب گشتاور دو قطبی‌ها $(M_{01}M_{12}M_{20})$ است. با توجه به اینکه مکان ناخالصی در راستای محور Xها تغییر داده می‌شود، وقتی که جهت قطبش نور فرودی افقی باشد، مسلماً میزان تأثیر آن در گشتاور دو قطبی بیشتر از تأثیر نور با قطبش عمودی خواهد بود. همچنین در ناخالصی نوع دافع، مقدار SHG برای نور دارای قطبش عمودی بزرگ‌تر از نور دارای قطبش افقی است و بزرگ‌ترین مقدار برای فاصله 2nm ناخالصی از مرکز است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای ناخالصی گاوسی در نقطه کوانتومی قرص شکل با پتانسیل محبوس‌سازی نوسانگر هماهنگ و با در نظر گرفتن اندرکنش اسپین‌مدار در ضریب تولید هماهنگ دوم مطالعه شده است. نتایج نشان دادند که در هر دو نوع ناخالصی با افزایش فاصله آن از مرکز نقطه کوانتومی، بیشینه مقدار SHG به سمت انرژی‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود ولی با افزایش طول میرایی و قدرت ناخالصی، جابه‌جایی بیشینه مقدار SHG در دو نوع ناخالصی متفاوت است. همچنین، مقدار ضریب تولید هماهنگ دوم با افزایش طول میرایی، قدرت و فاصله ناخالصی از مرکز نقطه، در ناخالصی نوع جاذب کاهش و در ناخالصی نوع دافع افزایش می‌یابد. این تفاوت رفتاری برحسب نوع ناخالصی به مثبت (منفی) بودن انرژی بستگی در نقطه کوانتومی دارای ناخالصی نوع دافع (جاذب) برمی‌گردد. نتیجه جالب دیگر، وابستگی ضریب تولید هماهنگ دوم به قطبش نور فرودی است، به طوری که به ازای طول‌های میرایی مختلف، تغییر قطبش در ناخالصی نوع جاذب و به ازای مکان‌های مختلف ناخالصی در نقطه کوانتومی، تغییر قطبش در ناخالصی نوع دافع تأثیر شدیدی در SHG دارد و مقدار ضریب تولید هماهنگ دوم برای نور با قطبش عمودی بزرگ‌تر از قطبش افقی است. حال آنکه در مورد قدرت پتانسیل‌های مختلف ناخالصی در هر دو نوع، عکس نتیجه فوق اتفاق می‌افتد.

منابع

- [1] Karabulut I., and Baskoutas S., "Linear and nonlinear optical absorption coefficients and refractive index changes in spherical quantum dots: effects of impurities, electric field, size, and optical intensity", *Applied Physics*, **103**, 073512, 2008.
- [2] Sachrajda A. S., Feng Y., Taylor R. P., Kirczenow G., Henning L., Wang J., Zawadzki P., and Coleridge P. T., "Magneto-conductance of a nanoscale anti-dot", *Physical Review B*, **50**, 10856, 1994.
- [3] Margulis V., and Shorokhov A. V., "Hybrid-impurity resonances in anisotropic quantum dots", *Physica E*, **41**, 483, 2009.
- [4] Jovanovic V. D., Indjin D., Vukmirovic N., Lkonic Z., Harrison P., Linfield E. H., Page H., Marcadet X., Sirtori C., Worall C., Beere H.A., and Ritchie D.A., "Mechanisms of dynamic range limitations in GaAs/AlGaAs quantum-cascade lasers: Influence of injector doping", *Applied Physics Letter*, **86**, 211117, 2005.
- [5] Mujagic E., Austerer M., Schartner S., Nobile M., Hoffmann L. K., Schrenk W., Strasser G., Semtsiv M. P., Bayrakli I., Wienold M., and Masselink W. T., "Impact of doping on the performance of short-wavelength InP-based quantum-cascade lasers", *Applied Physics*, **103**, 033104, 2008.
- [6] Bolcatto P. G., and Proetto C. R., "Shape and dielectric mismatch effects in semiconductor quantum dots", *Physical Review B*, **59**, 12487, 1999.
- [7] Kwasniowski A., and Adamowski J., "Effect of confinement potential shape on exchange interaction in coupled quantum dots", *Journal of Physics Condensed Matter*, **20**, 215208, 2008.
- [8] Baskoutas S., Paspalakis E., and Terzis A. F., "Electronic structure and nonlinear optical rectification in a quantum dot: effects of impurities and external electric field", *Journal of Physics Condensed Matter*, **19**, 395024, 2007.
- [9] Cakir B., Yakar Y., Ozmen A., Sezer M. O., and Sahin M., "Linear and nonlinear optical absorption coefficients and binding energy of a spherical quantum dot", *Superlattices and Microstructure*, **47**, 556, 2010.
- [10] Shojaei S., and Soltani Vala A., "Nonlinear optical rectification of hydrogenic impurity in a disk-like parabolic quantum dot: the role of applied magnetic field", *Physica E*, **70**, 108, 2015.
- [11] Yuan J.H., Zhang Y., Guo X., Zhang J., and Mo H., "The low-lying states and optical absorption properties of a hydrogenic impurity in a parabolic quantum dot modulation by applied electric field", *Physica E*, **68**, 232, 2015.
- [12] Chen T., Xie W., and Liang S., "Optical and electronic properties of a two-dimensional quantum dot with an impurity", *Journal of Luminescence*, **139**, 64, 2013.
- [13] Liang S., Xie W., Li X., and Shen H., "Photoionization and binding energy of a donor impurity in a quantum dot under an electric field: Effects of the hydrostatic pressure and temperature", *Superlattices and Microstructures*, **49**, 623, 2011.
- [14] Sugirtham L.C., Peter A.J., and Lee C.W., "Electric field-induced nonlinear optical properties of a hydrogenic impurity in a GaAs/GaAlAs quantum dot: effects of spin-orbit interactions", *Phase Transitions*, **88**, 407, 2015.
- [15] Raigoza N., Morales A. L., Montes A., Porras-Montenegro N., and Duque C. A., "Stress effects on shallow-donor impurity states in symmetrical GaAs/Al_xGa_{1-x}As double quantum wells", *Physical Review B*, **69**, 045323, 2004.
- [16] Ashoori R. C., "Electrons in artificial atoms", *Nature*, **379**, 413, 1996.
- [17] Kastner M. A., "Artificial Atoms", *Physics Today*, **46**, 24, 1993.
- [18] Shao S., Guo K. X., Zhang Z. H., Li N., and Peng C., "Studies on the second-harmonic generations in cubical quantum dots with applied electric field", *Physica B*, **406**, 393, 2011.
- [19] Martynenko I. V., Litvin A. P., Milton F. P., Baranov A. V., Fedorov A. V., and Gunko Y. K., "Application of Semiconductor Quantum Dots in Bioimaging and Biosensing", *Journal of Materials Chemistry B*, **5**, 6701, 2017.

- [20] Reimann S. M., and Manninen M., "Electronic structure of quantum dots", *Reviews of Modern Physics*, **74**, 1283, 2002.
- [21] Karabulut I., and Baskoutas S., "Linear and nonlinear optical absorption coefficients and refractive index changes in spherical quantum dots: Effects of impurities, electric field, size, and optical intensity", *Journal of Applied Physics*, **103**, 073512, 2008.
- [22] Kirak M., Yilmaz S., Sahin M., and Gencaslan M., "The electric field effects on the binding energies and the nonlinear optical properties of a donor impurity in a spherical quantum dot", *Journal of Applied Physics*, **109**, 094309, 2011.
- [23] M-Ramos M. E., Duque C. A., Kasapoglu E., Sari H., and Sokmen I., "Linear and nonlinear optical properties in a semiconductor quantum well under intense laser radiation: Effects of applied electromagnetic fields", *Journal of Luminance*, **132**, 901, 2012.
- [24] Yildirim H., and Tomak M., "Third-harmonic generation in a quantum well with adjustable asymmetry under an electric field", *Physics Status Solidi B*, **243**, 4057, 2006.
- [25] Khordad R., and Mirhosseini B., "Optical properties of GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs ridge quantum wire: Third-harmonic generation", *Optical Communication*, **285**, 1233, 2012.
- [26] Qiucheng Y., Kangxian G., Meilinm H., Zhongmin Z., Keyin L., and Dongfeng L., "Study on the optical rectification and second-harmonic generation with position-dependent mass in a quantum well", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **119**, 50, 2018.
- [27] Restrepo R. L., Kasapoglu E., Sakiroglu S., Ungan F., Morales A. L., and Duque C. A., "Second and third harmonic generation associated to infrared transitions in a Morse quantum well under applied electric and magnetic fields", *Infrared Physics and Technology*, **85**, 147, 2017.
- [28] Martínez-Orozco J. C., Rojas-Brisenoa J. G., Rodriguez-Magdalenoa K. A., Rodriguez Vargasa I., Mora-Ramosb M. E., Restrepoc R. L., Ungand F., Kasapoglue E., and Duque C. A., "Effect of the magnetic field on the nonlinear optical rectification and second and third harmonic generation in double δ -doped GaAs quantum wells", *Physica B*, **525**, 30, 2017.
- [29] Rashba E. I., "Properties of semiconductors with an extremum loop. 1. Cyclotron and combinational resonance in a magnetic field perpendicular to the plane of the loop", *Sov. Physics Solid State*, **2**, 1109, 1960.
- [30] Kumar Datta N., and Ghosh M., "Oscillatory impurity potential induced dynamics of doped quantum dots: Analysis based on coupled influence of impurity coordinate and impurity influenced domain", *Chemical Physics*, **372**, 82, 2010.
- [31] Karabulut I., Atav U., and Safak H., "Comment on "Electric field effect on the second-order nonlinear optical properties of parabolic and semi-parabolic quantum wells", *Physical Review B*, **72**, 207301, 2005.
- [32] Wangjian Z., "A study of electric-field-induced second-harmonic generation in asymmetrical Gaussian potential quantum wells", *Physica B*, **454**, 50, 2014.
- [33] Landolt-Bornstein, New Series, edited by O. Madelung, M. Schultz, and H. Weiss (Springer-Verlag, Berlin, 1982), Vol. 17a, b, Group III.
- [34] Seilmeier A., Hubner H. J., Abstreiter G., Weimann G., Schlapp W., "Intersubband relaxation in GaAs-Al_xGa_{1-x}As quantum well structures observed directly by an infrared bleaching technique", *Phys. Rev. Lett.* **59** 1345, 1987.
- [35] Nitta J., Akazaki T., Takayanagi H. and Enoki T., "Gate Control of Spin-Orbit Interaction in an Inverted In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As Heterostructure", *Phys. Rev. Lett.* **78**, 1335, 1997.