بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

اثر تابش لیزری قوی بر روی ضریب یکسوسازی نوری چاه کوانتومی نیمه سهموی

حامد وفایی، محمد جواد کریمی و مرتضی نظری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده - در این مقاله، اثر تابش لیزری بر روی ضریب یکسوسازی نوری یک چاه کوانتومی نیمه سهموی با ساختار GaAs-AlGaAs به‌صورت عددی بررسی شده است. عبارت تحلیلی ضریب یکسوسازی نوری با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی به دست می‌آید. ضریب یکسوسازی نوری برای پهناهای مختلف چاه و کسر مولی آلومینیوم محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تابش لیزر ی شدید به طور قابل ملاحظه ای بر روی پتانسیل تحدید کوانتومی و همچنین ضریب یکسوسازی نوری تاثیر می‌گذارد.

کلید واژه- تابش لیزری قوی، چاه کوانتومی، ضریب یکسوسازی نوری.

Intense laser field effect on the optical rectification of semi-parabolic quantum well

Hamed Vafaee, Mohammad Javad Karimi, Morteza Nazari

Department of Physics, College of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract- In this paper the effect of the intense laser field on the optical rectification coefficient of a semi-parabolic GaAs/AlGaAs quantum well is investigated numerically. The analytical expression of optical rectification is obtained by using the density-matrix approach. The optical rectification is calculated for different well widths and aluminum mole fractions. Our results show that the laser field considerably affects the confining potential as well as the optical rectification of the quantum well.

Keywords: Intense laser field, Optical rectification, Quantum well.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱-مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در رشد نیمرساناها، از جمله روش رونشستی پرتو مولکولی (MBE) و رسوب دهی شیمیایی بخار آلی- فلز (MOCVD) ساخت سیستم‌های کم بعد متنوع مانند چاه کوانتومی را ممکن ساخته است. خواص نوری این ساختارها کاربردهای وسیعی در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی از جمله آشکارسازهای مادون قرمز، سوئیچ‌های نوری و لیزر مادون قرمز دارند [۱-۳]. در سال‌های اخیر خواص نوری چاه‌های کوانتومی با شکل پتانسیل مختلف توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۶]. استفاده از تابش لیزر قوی سبب بروز ویژگی‌های جدید و جالب توجه در ساختار الکترونیکی سیستم‌های نیمرسانای کم بعد شده است. تحقیقات مختلفی در رابطه با اثر تابش لیزری قوی بر روی خواص نوری چاه‌های کوانتومی با شکل پتانسیل متفاوت انجام شده است [۷-۱۱]. در این مقاله اثر تابش لیزری بر روی ضریب یکسوسازی نوری (OR) یک چاه کوانتومی نیمه سهموی را به‌صورت عددی بررسی می‌کنیم.

۲-مبانی نظری

روش مورد استفاده در مطالعه حاضر بر اساس یک نظریه غیر اختلالی است که برای تشریح رفتار اتم تحت میدان لیزری قوی و با فرکانس بالا به‌کار برده می‌شود. برای سادگی ما یک میدان الکترومغناطیسی تک مد با فرکانس ω در نظر می‌گیریم که پتانسیل برداری این تابش به‌صورت $A(t)=A_\circ\cos(\omega t)$ می‌باشد. معادله شرودینگر برای یک ذره در حال حرکت تحت نیروهای ترکیبی ناشی از پتانسیل و تابش لیزر قوی توسط چارچوب کرامرز به دست می‌آید.

$$i\hbar\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\phi(r,t)+V\left(r+\alpha(t)\right)\phi(r,t) \quad (۱)$$

که $V(r+\alpha(t))$ انرژی پتانسیل استتار شده است[۷] و:

$$\vec{\alpha}(t)=\alpha_\circ\sin(\omega t)\hat{e},\qquad \alpha_\circ=\frac{eA_\circ}{mc\omega} \quad (۲)$$

در معادله (۲)، $\vec{\alpha}(t)$ نشان دهنده حرکت ارتعاشی الکترون در میدان لیزر است. در این رهیافت، تأثیر تابش لیزر با فرکانس بالا به طور کامل توسط پتانسیل $(V(r+\alpha(t))$ تعیین می‌شود. در معادله بالا پارامتر $\alpha_\circ$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_\circ=(I_\circ^{1/2}/\omega^2)(e/m)(8\pi/c)^{1/2} \quad (۳)$$

که در آن e بار الکتریکی، m جرم موثر الکترون، c سرعت نور در خلاء و $A_\circ$ دامنه بردار پتانسیل و $I_\circ$ شدت تابش لیزری است. با به کار بردن روش فلوکیت، معادله شرودینگر را می‌توان به شکل مستقل از زمان نوشت [۷]:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+V(r;\alpha_\circ)\right)\varphi_\circ=E\varphi_\circ \quad (۴)$$

$V(r;\alpha_\circ)$ پتانسیل تحدید استتار شده است که از طریق $\alpha_\circ$ به $I_\circ$ وابسته می‌باشد [۱۱]. در غیاب تابش لیزری پتانسیل تحدید یک چاه کوانتومی نیمه سهموی با راستای رشد محور z، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V(z)=V_\circ[\,\theta(z-L)+\theta(-z)] +\frac{V_\circ}{L^2}z^2\Theta((L-z)(z)) \quad (۵)$$

که $V_\circ$ عمق چاه، L پهنای چاه و $\theta(z)$ تابع پله‌ای و $\Theta(z)=1-\theta(-z)$ است. با استفاده از روش فلوکیت برای چاه کوانتومی نیمه سهموی، معادله شرودینگر مستقل از زمان یک بعدی برای الکترون درون چاه در حضور تابش لیزری به صورت زیر ارائه می‌شود [۷].

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi(z)}{\partial z^2}+V(\alpha_\circ,z)\psi(z)=E\psi(z) \quad (۶)$$

$\psi(z)$ تابع موج و $V(\alpha_\circ,z)$ پتانسیل تحدید استتار شده است که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$V(z,\alpha_\circ)=\frac{2\pi}{\omega}\int_0^{\frac{\omega}{2\pi}}V[\,z+\alpha_\circ\sin(\omega t)]\,dt \quad (۷)$$

پس از انجام محاسبات جبری و بدست آوردن $V[z+\alpha_\circ\sin(\omega t)]$ از رابطه (۵)، و جایگذاری در رابطه (۷) عبارت $V(\alpha_\circ,z)$ به‌دست می‌آید.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

$$V(\alpha_\circ,z)=V_\circ[\theta(-z-\alpha_\circ)+\theta(z-\alpha_\circ-L)]$$
$$+\frac{V_\circ}{L^2}\left(\frac{\alpha_\circ^2}{2}+z^2\right)\Theta((z+\alpha_\circ)(L+\alpha_\circ-z))$$
$$-\frac{V_\circ}{\pi L^2}\Theta(z+\alpha_\circ)\theta(\alpha_\circ-z))\left[\left(\frac{\alpha_\circ^2}{2}+z^2\right.\right.$$
$$\left.\left.-L^2\right)\arccos\left(\frac{z}{\alpha_\circ}\right)-\frac{3z}{2}\sqrt{\alpha_\circ^2-z^2}\right] \quad (8)$$
$$-\frac{V_\circ}{\pi L^2}\Theta(-z+\alpha_\circ+L)\theta(z+\alpha_\circ-L)$$
$$\times\left[\left(\frac{\alpha_\circ^2}{2}+z^2-L^2\right)\arccos\left(\frac{L-z}{\alpha_\circ}\right)\right.$$
$$\left.\times\left(\frac{3z+L}{2}\right)\sqrt{\alpha_\circ^2-(L-z)^2}\right]$$

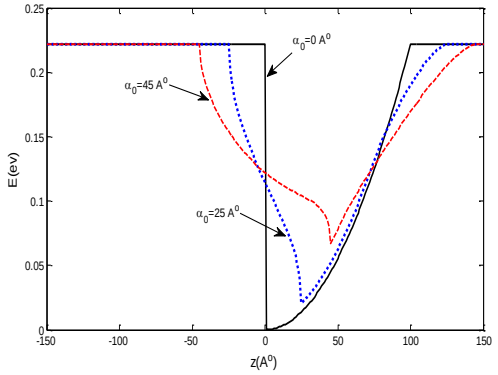
با حل معادله شرودینگر مستقل از زمان (۶) ویژه مقادیر انرژی و توابع موج را محاسبه می‌کنیم سپس با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی ضریب OR را بدست می‌آوریم. در روش ماتریس چگالی، ضریب OR از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۲].

$$\chi_\circ^2=\frac{q^3\sigma_v M_{12}^2\delta}{\varepsilon_\circ}\frac{2E_{21}{}^2}{[(E_{21}-\hbar\omega)^2+(\hbar\Gamma_\circ)^2]} \quad (9)$$
$$\times\frac{1}{[(E_{21}+\hbar\omega)^2+(\hbar\Gamma_\circ)^2]}$$

در معادله بالا σ_v چگالی حامل‌های بار، $M_{ij}=\left|\langle\psi_i|ez|\psi_j\rangle\right|$ $(ij=1,2)$ عناصر ماتریس گشتاور دو قطبی، $\psi_i(\psi_j)$ ویژه تابع و $E_{ij}=E_i-E_j$ اختلاف انرژی بین دو تراز، $\delta=|M_{22}-M_{11}|$، n_r ضریب شکست و μ تراوایی مغناطیسی است.

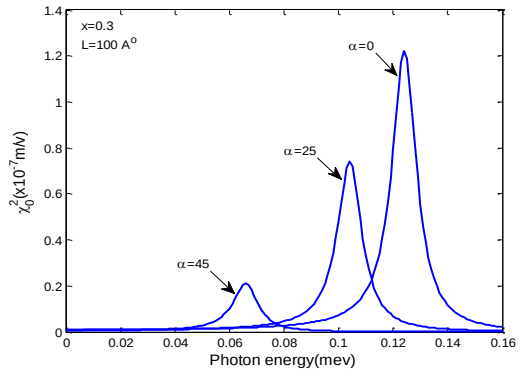
۳-نتایج

در این مقاله ضریب OR چاه کوانتومی نیمه سهموی با مقادیر عددی: $n_r=3.2$، $\mu=4\pi\times10^{-7}\,Hm^{-1}$، $\Gamma_\circ=1/T_\circ$ با $T_\circ=0.14\,ps$، $\sigma_v=3.0\times10^{22}m^{-3}$، $V_\circ=228meV$ محاسبه می‌گردد. در شکل ۱ تغییرات نمایه پتانسیل تحدید برای سه مقدار مختلف پارامتر $\alpha_\circ$ بر حسب مکان نشان داده شده است. از روی این شکل دیده می‌شود که با افزایش پارامتر α_0، عمق چاه پتانسیل کاهش و پهنای آن افزایش می‌یابد. این دو عامل سبب کاهش محدودیت حرکت الکترون می‌شوند و در نتیجه اختلاف انرژی ترازها $(E_{21}=E_2-E_1)$ کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر α_0، شکل چاه کوانتومی حالت متقارن‌تری پیدا می‌کند و در نتیجه عناصر ماتریسی M_{11} و M_{22} کاهش می‌یابند. این عناصر ماتریسی به دلیل پاریته توابع موج برای چاه کوانتومی کاملا متقارن صفر می‌باشند. بنابراین با افزایش پارامتر α_0، مقدار کمیت $\delta=|M_{22}-M_{11}|$ کاهش می‌یابد.



شکل ۱: نمایه پتانسیل تحدید برحسب مکان، برای مقادیر مختلف پارامتر α_0.

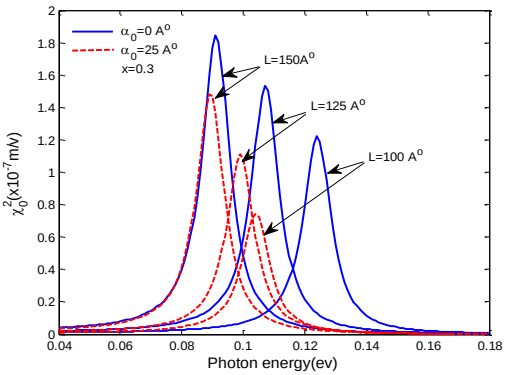
شکل ۲ ضریب OR را بر حسب انرژی فوتون فرودی برای سه مقدار مختلف پارامتر α_0 نمایش می‌دهد. این شکل نشان می دهد که با افزایش پارامتر $\alpha_\circ$، قله ضریب OR به سمت انرژی‌های کمتر منتقل می‌شود و اندازه آن نیز کاهش می‌یابد. دلیل این نتیجه در پاراگراف قبل توضیح داده شده است.



شکل ۲: تغییرات ضریب OR برحسب انرژی فوتون فرودی، برای مقادیر مختلف پارامتر α_0.

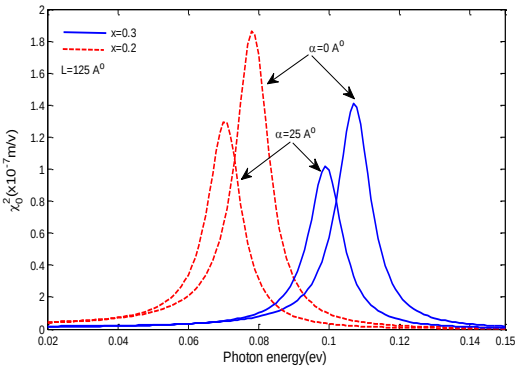
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

ضریب OR بر حسب انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف پهنای چاه و $\alpha_{\circ}$, در شکل ۳ رسم شده است. با افزایش پهنای چاه محدودیت حرکت الکترون کاهش می-یابد و این سبب می شود که اختلاف انرژی ترازها کمتر شده و گستردگی تابع موج و در نتیجه M_{21} افزایش یابد. بنابراین با افزایش پهنای چاه، قله OR به سمت انرژی‌های فوتونی کمتر جابجا شده و اندازه آن افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج شکل ۳ همخوانی دارد.



شکل ۳: تغییرات ضریب OR برحسب انرژی فوتون فرودی، برای مقادیر مختلف طول چاه و پارامتر α_0.

در شکل ۴ تغییرات OR برای مقادیر مختلف غلظت آلومینیوم (x) و پارامتر $\alpha_{\circ}$ رسم شده است. با افزایش غلظت آلومینیوم ارتفاع سد پتانسیل افزایش می‌یابد و در نتیجه محدودیت حرکت الکترون بیشتر می‌شود. این سبب می‌شود که قله OR به سمت انرژی‌های بیشتر جابجا شود. همچنین افزایش محدودیت حرکت الکترون منجر به کاهش گستردگی تابع موج می‌شود و در نتیجه عناصر ماتریس گشتاور دو قطبی کاهش می‌یابند و این سبب کاهش اندازه قله OR می‌شود.



شکل ۴: تغییرات ضریب OR برحسب انرژی فوتون فرودی، برای مقادیر مختلف α_0 و غلظت آلومینیوم.

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر تابش لیزری قوی $(\alpha_{\circ})$، طول چاه کوانتومی (L) و غلظت ناخالصی در سد (x) بر روی ضریب یکسوسازی نوری (OR) یک چاه کوانتومی نیمه سهموی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که اندازه قله OR با افزایش L افزایش می یابد ولی با افزایش α_0 یا x کاهش پیدا می کند. همچنین با افزایش α_0 و L قله OR به سمت انرژی‌های فوتونی کمتر جابجا می‌شود، اما با افزایش x قله OR به سمت انرژی‌های فوتونی بیشتر جابجا می‌شود. به طور خلاصه، با انتخاب مناسب پارامترهای α_0، Lو x می‌توان ضریب OR یک چاه کوانتومی نیمه‌سهموی را برای یک طول موج دلخواه بهینه‌سازی کرد.

مراجع

[1] Kristaedter N., et al., Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers, **Appl. Phys. Lett.** 69 (1996) 1226-1228.

[2] Miller D.A.B., Quantum well optoelectronic switching devices, **Internat. J. High Speed Electron.** 1 (1991) 19-46.

[3] Jiang X., Li S.S., Tidrow M.Z., Study of intersubband transition in quantum dots and quantum dot infrared photodetectors, **Physica E.** 5 (1999) 27-35**.**

[4] Nazari M., Karimi M.J., Keshavarz A., Linear and nonlinear optical absorption coefficients and refractive index changes in modulation-doped quantum wells: Effects of the magneticfield and hydrostatic pressure, **Physica B.** 428 (2013) 30–35**.**

[5] Karimi M.J., Keshavarz A., Second harmonic generation in asymmetric double semi-parabolic quantum wells: effects of electric and magnetic fields, hydrostatic pressure and temperature, **Physica E.** 44 (2012) 1900–1904.

[6] Li S., et al, Polarization induced pn-junction without dopant in graded AlGaN coherently strained on GaN, **Appl. Phys. Lett.** 101 (2012) 122103-122106**.**

[7] Gavrilla M., Kaminski J.Z., *Free-Free Transitions in Intense High-Frequency Laser Fields*, **Phys. Rev. Lett.** 52 (1984) 613-616.

[8] Burileanu L.M., Radu A., THz laser field effect on the optical properties of cylindrical quantum well wires, **Opt Commun.** 284 (2011) 2050–2055**.**

[9] Mora-Ramos M.E., Duque C.A., Kasapoglu E., Sari H., Sokmen I., Electron-related nonlinearities in GaAs-GaAlAs double quantum wells under the effects of intense laser field and applied electric field, **J Lumin.** 135 (2013) 301–311.

[10] Ozturk E., Sari H., Sokmen I., The dependence of the intersubband transitions in square and graded QWs on intense laser fields, **Solid State Commun.** 132 (2004) 497–502.

[11] Kasapoglu E., Sokmen I., *The effects of intense laser field and electric field on intersubband absorption in a double-graded quantum well*, **Physica B.** 403 (2008) 3746–3750.

[12] Rezaei G., Vaseghi B., Sadri M., *External electric field effect on the optical rectification coefficient of an exciton in a spherical parabolic quantum dot*, **Physica B.** 406 (2011) 4596–4599.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]