بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

القایی الکترومغناطیسی یک سیم کوانتومی با ساختار چندگانه‌ی طولی تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی

سمیه محمدی بیگدلی، قاسم رضایی

گروه فیزیک، دانشگاه یاسوج

چکیده – در این مقاله شفافیت القایی الکترومغناطیسی سیم کوانتومی با ساختار چندگانه‌ی طولی تحت تاثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی بررسی شده است. بدین منظور، تاثیر بزرگی میدان الکتریکی خارجی و همچنین ابعاد سیم بر سرعت گروه و ضریب جذب محیط مطالعه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده دریافتیم که شفافیت القایی الکترومغناطیسی در سیستم رخ داده و فرکانس آن، دریچه شفافیت و سرعت گروه مربوط به میدان روبشی به میدان الکتریکی و پهنای چاه وابسته می‌باشد. علاوه بر این، نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در مقایسه با سیستم‌های اتمی شفافیت القایی الکترومغناطیسی را می‌توان با تغییر پهنای چاه کنترل نمود.

کلید واژه- سیم کوانتومی، شفافیت القایی الکترومغناطیسی، میدان الکتریکی .

Electromagnetically induced transparency of a quantum wire with longitudinal heterostructures under the influence of external electric and magnetic fields

Somayeh Mohammadi Bigdeli, Ghasem Rezaei

Department of Physics,Yasouj University

Abstract- In this article the electromagnetically induced transparency of a quantum wire with longitudinal heterostructures, under the influence of external electric and magnetic fields are investigated. To this end, the group velocity and absorption coefficient of the medium in the presence of external electric and magnetic fields are studied. It is found that, electromagnetically induced transparency occurs in the system and its frequency, transparency window and group velocity of the probe field strongly depend on the external electric field and the well width. In comparison with atomic system, one may control the electromagnetically induced transparency and the group velocity of light in these structures with the well width.

Keywords: Quantum wire, Electromagnetically induced transparency, Electric field.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی در زمینه فن‌آوری نانو،امکان ساخت و طراحی سیستم‌های کوانتومی نیم‌رسانا در سال‌های اخیر فراهم شده است. نانوسیم‌های نیم‌رسانا، توجهات بسیاری رابه سبب ویژگی‌های الکترونیکی و نوری منسوب به تک بعد و اثرات مقیدسازی کوانتومی در دو بعد، به خود جلب کرده است [۱]. در چند سال اخیر بسیاری از گروه‌های پژوهشی رشد نانوسیم‌های نیم‌رسانا با ساختارهای چندگانه‌ی طولی را گزارش کرده‌اند[۲و۳].

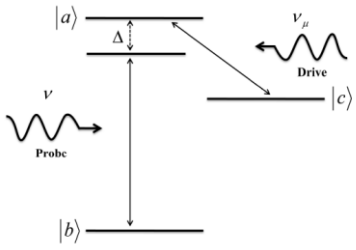
یکی از ویژگی‌های نوری جالبی که در سیستم‌های اتمی بررسی شده شفافیت القایی الکترومغناطیسی می‌باشد. به عنوان مثال پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در سال ۱۹۸۹ پیش بینی [۴] و در سال ۱۹۹۱ توسط آقای ویپر به طور تجربی مشاهده شد [۵].

با توجه به شباهت بین سیم‌های کوانتومی نیم‌رسانا و اتم-ها، امکان بررسی پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در این سیستم‌ها نیز وجود دارد. بنابراین در مقاله حاضر تلاش می‌کنیم تا شفافیت القایی الکترومغناطیسی یک سیم کوانتومی سه ترازه را در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی بدست آورده و تأثیر بزرگی میدان الکتریکی و پهنای چاه بر این ویژگی نوری را بررسی کنیم.

۲-تئوری

شفافیت القایی الکترومغناطیسی را می‌توان در یک سیستم سه ترازه لاندا شکل مشاهده کرد. (شکل ۱) پرتو ضعیف روبشی گذار از حالت $|b\rangle$ به حالت $|a\rangle$ و پرتو جفت شده قوی‌تر گذار از $|c\rangle$ به $|a\rangle$را بوجود آورده و گذار از حالت $|c\rangle$ به حالت $|b\rangle$ ممنوع می‌باشد.

برای محاسبه انرژی سیستم، هامیلتونی الکترون محبوس در سیم کوانتمی در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی در راستای محور z را می‌توان به‌شکل زیر نوشت



شکل ۱: حالت لاندا شکل که گذار از تراز $|c\rangle$ به تراز $|b\rangle$ ممنوع می‌باشد.

$$H=\frac{1}{2m^*}\left[\hat{\vec{P}}+\frac{e}{c}\vec{A}\right]^2+V(\vec{r})-eFz \qquad (۱)$$

که e و m^* و c مقادیر مطلق بار الکترون، جرم مؤثر الکترون و سرعت نور هستند. A پتانسیل برداری و F بزرگی میدان الکتریکی است. پتانسیل تحدید کوانتمی، $V(\vec{r})$، ترکیبی از یک پتانسیل سهموی و یک پتانسیل ناشی از ساختار چندگانه در راستای محور z می‌باشد.

$$V(\vec{r})=\frac{1}{2}m^*(z)\omega^2\rho^2+V^{het}(z) \qquad (۲)$$

ω فرکانس محصورسازی در صفحه x-y را مشخص می‌کند.

$$V^{het}(z)=Q_e\left[\varepsilon_1\chi(z)+\varepsilon_2\chi^2(z)\right] \qquad (۳)$$

و

$$m^*(z)=m_{GaP}\chi(z)+m_{GaAs}[1-\chi(z)] \qquad (۴)$$

که در آن، $m_{GaP}=0.33m_0$ و $m_{GaAs}=0.068m_0$ به‌ترتیب جرم‌های گالیم فسفاید و گالیم آرسناید می‌باشند که m_0 جرم سکون الکترون است. همچنین $Q_e=0.5$ تفاوت نوار رسانش و $\varepsilon_1=-1.473\,eV$ و $\varepsilon_2=0.146\,eV$ پارامترهای درون‌یابی هستند. لازم به ذکر است که $\chi(z)$ به‌صورت زیر به z بستگی پیدا می‌کند.

$$\chi(z)=\begin{cases}1 & z\le z_1, z_4\le z\\ \frac{1}{w_1}(z_2-z) & z_1\le z\le z_2\\ 0 & z_2\le z\le z_3\\ \frac{1}{w_2}(z-z_3) & z_3\le z\le z_4\end{cases} \qquad (۵)$$

که در رابطه‌ی بالا $z_1=-\frac{L}{2}-(1-\alpha)w_1$، $z_2=-\frac{L}{2}+\alpha w_1$، $z_3=\frac{L}{2}+\alpha w2$ و $z_4=\frac{L}{2}+(1-\alpha)w_2$. L عرض چاه کوانتومی و $w_1=w_2$ ضخامت فصل مشترک بین نواحی مختلف سیم کوانتومی نیم‌رسانا می‌باشند.

با توجه به رابطه‌های بالا معادله‌ی شعاعی شرودینگر را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*}\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\rho\frac{\partial}{\partial\rho}\right)+\frac{\hbar^2 l^2}{2m^*\rho^2}+\frac{l}{2}\hbar\omega_c+\frac{1}{2}m^*\Omega^2\rho^2\right]R_{n,l}(\rho)=E_{n,l}^{(\rho)}R_{n,l}(\rho) \quad (۶)$$

که در آن $\Omega=\sqrt{\omega^2+\frac{1}{4}\omega_c^2}$. با حل معادله‌ی شعاعی، ویژه حالت‌ها و ویژه مقدارهای شعاعی زیر نتیجه می‌شوند

$$R_{n,l}(\rho)=N\left(\frac{m^*\Omega\rho^2}{\hbar}\right)^{\frac{l+1}{2}}\times F\left(-n,l+1,\frac{m^*\Omega\rho^2}{\hbar}\right) \quad (۷)$$

و

$$E_{n,l}^{(\rho)}=(2n+|l|+1)\hbar\Omega+\frac{1}{2}l\hbar\omega_c \quad (۸)$$

$F(a,b,x)$ تابع فوق هندسی، N ضریب بهنجارش، n و l به ترتیب اعداد کوانتمی شعاعی و سمتی می‌باشند.

حال معادله‌ی ویژه مقداری مربوط به حرکت در راستای محور z به‌صورت زیر نتیجه می‌شود

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{m^*(z)}\frac{\partial}{\partial z}\right)+V_{eff}(z)\right]Z(z)=E_z Z(z) \quad (۹)$$

که در آن

$$V_{eff}(z)=V^{het}(z)+E_{n,l}^{\rho}(z)-eFz \quad (۱۰)$$

ازآنجا که معادله‌ی بالا را نمی‌توان به صورت تحلیلی حل نمود، از روش قطری کردن ماتریس‌ها استفاده می‌کنیم. ازاین‌روی، نمایش ماتریسی معادله‌ی (۹) را در پایه‌های زیر بدست می‌آوریم.

$$\phi_i(z)=\sqrt{\frac{2}{L_1}}\sin\left(\frac{n_i\pi z}{L_1}+\frac{n_i\pi}{2}\right) \quad (۱۱)$$

پس از قطری کردن ماتریس هامیلتونی ویژه مقادیر و ویژه حالت‌های سیستم در حضور میدان الکتریکی به‌دست می‌آید. با استفاده از این ویژه حالت‌ها و ویژه مقادیر و همچنین استفاده از فرمول بندی ماتریس چگالی عنصر ماتریسی ρ_{21} عملگر چگالی را به‌صورت زیر بدست می‌آوریم [۶].

$$\rho_{21}=-E_P\frac{i\mu_{21}/2\hbar}{\gamma_{21}-i\Delta_1+\frac{\Omega_c^2}{\gamma_{31}-i(\Delta_1+\Delta_2)}} \quad (۱۲)$$

که $\gamma_{ij}=(\gamma_i+\gamma_j)/2$ ، $\Omega_c=\mu_{32}E_c/\hbar$ فرکانس رابی، $\Delta_1=\omega_p-\omega_{ab}$ و $\Delta_2=\omega_c-\omega_{ca}$ ناکوکی از حالت تشدید می‌باشند. حال پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به پرتو روبشی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت که

$$\chi(\omega_p)=-\frac{2\mu_{21}N\rho_{21}}{\varepsilon_0 E_p} \quad (۱۳)$$

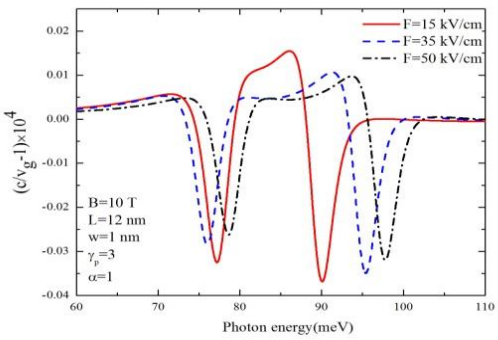
که قسمت موهومی رابطه‌ی بالا متناظر با ضریب جذب و قسمت حقیقی آن ضریب شکست را نتیجه می‌دهد علاوه براین سرعت گروه را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد

$$v_g=\frac{c}{n(\omega_p)+\omega_p\frac{dn(\omega_p)}{\omega_p}} \quad (۱۴)$$

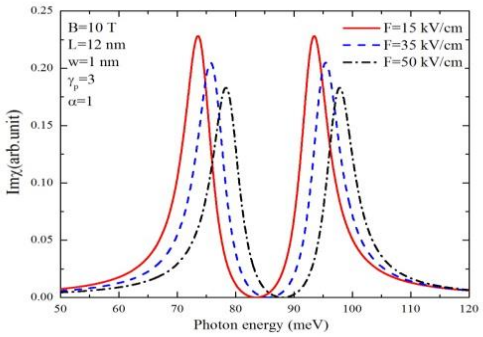
که $n(\omega_p)=1+\frac{1}{2}\mathrm{Re}[\chi(\omega_p)]$ می‌باشد. برای بررسی سرعت گروه $\left(\frac{c}{v_g}-1\right)$ را تعریف می‌کنیم که اگر بزرگتر از صفر باشد سرعت گروه پالس نوری از سرعت نور کوچکتر و انتشار فروتابش و اگر کوچکتر از صفر باشد سرعت گروه پالس نوری روبشی بزرگتر از سرعت نور و انتشار ابرتابش داریم.

۳-محاسبات عددی و نتایج

در این بخش محاسبات عددی خود را برای سیم کوانتومی مورد نظر به‌ازای مقادیر $\gamma_{31}=0$، $\gamma_{21}=\frac{\gamma_2}{2}=5.54(meV)$، $E_c=5\times10^7(V/m)$ و $\Delta_2=0$ ارائه داده‌ایم. بدین منظور، تاثیر میدان الکتریکی و پهنای چاه بر ضرایب جذب و ضریب گروه را در نگاره‌های (۲) و (۳) بررسی نموده‌ایم.



[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]



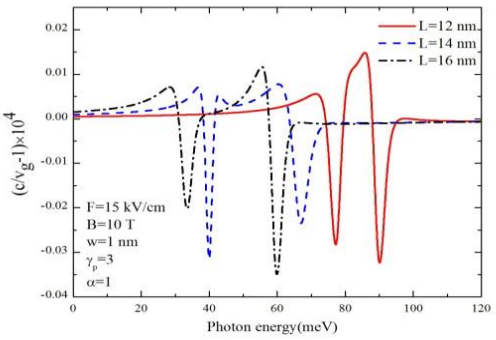
شکل ۲: ضریب گروه و ضریب جذب به ازای مقادیر مختلف میدان الکتریکی.

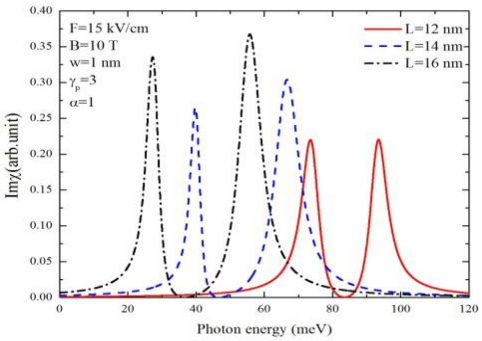
ملاحظه می‌شود که با افزایش میدان الکتریکی قله‌های ضریب جذب کاهش یافته و مکان آنها را به سمت انرژی-های بیشتر سوق می‌یابد. شفافیت القایی در فرکانس‌های بالاتر رخ داده و باعث افزایش ناچیز دریچه‌ی شفافیت و بازه‌ی فرکانسی ابر تابش و فروتابش می‌شود.

با توجه به شکل (۳) می‌بینیم که با افزایش پهنای چاه، قله‌های ضریب جذب افزایش یافته و شفافیت القایی الکترومغناطیسی در فرکانس‌های کوچکتر رخ می‌دهد. علاوه بر این، دریچه‌ی شفافیت و بازه‌ی فرکانسی ابر تابش و فروتابش افزایش می‌یابد.

۴-نتیجه‌گیری

درمجموع تاثیر میدان الکتریکی و پهنای چاه را بر ضریب جذب و ضریب گروه یک سیم کوانتمی بررسی نموده و نتایج زیر بدست آمد. ملاحظه نمودیم که شفافیت القایی در سیستم رخ داده و میدان الکتریکی و پهنای چاه تاثیر زیادی بر دریچه شفافیت، بازه‌ی فرکانسی ابر تابش و فرو تابش و سرعت گروه مربوط به میدان روبشی دارد.





شکل ۳: ضریب گروه و ضریب جذب به ازای مقادیر مختلف پهنای چاه.

۵-مراجع

[1] Law M., Goldberger J., and Yang P., Semiconductor nanowires and nanotubes, **Annu. Rev. Mater. Res.** 34 (2004) 83-122.

[2] Solanki R., Huo J., Freeouf J. L., and Miner B., Atomic layer deposition of ZnSe/CdSe superlattice nanowires, **Appl. Phys. Lett.** 81 (2002) 3864.

[3] Gudiksen M. S., Lauhon L. J., Wang J., Smith D. C., and Lieber C. M., Growth of nanowire superlattice structures for nanoscale photonics and electronics, **Nature** 415 (2002) 617-620.

[4] Imamoglu A., Harris S. E., *Lasers without inversion: Interference of dressed lifetime-broadened states*, **Opt. Lett.** 14 (1989) 1344.

[5] Boller K. J., Imamoglu A., Harris S. E., Observation of electromagnetically induced transparency, **Phys. Rev. Lett.** 66 (1991) 2593.

[6] Rezaei G., Shogaeian Kish S., Vaseghi B., Taghizadeh S. F., Electromagnetically induced transparency in a two-dimensional quantum dot: Effects of impurity, external fields, hydrostatic pressure and temperature, **Physica E** 62 (2014) 104-110.

* **Electronic address**: grezaei@yu.ac.ir

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]