



بررسی نوری کوانتومی فاکتور کیفیت و شکافتگی ترازها برای یک نقطه کوانتومی درون کاواک نوری

محمد رضا محبی فر*، طاهره کمری

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر

چکیده: نانوسیستم شامل نقطه کوانتومی درون کاواک نوری بستری برای مطالعه پدیده های مهم کوانتومی نظیر جمع نشدگی فوتون، درهمتنیدگی، تولید تک فوتون و اطلاعات کوانتومی است. استفاده از چنین سیستمی در این فناوری ها منوط به دستیابی به حالت تزویج قوی بین نقطه کوانتومی و کاواک نوری است. در این پژوهش با استفاده از رویکرد نوری کوانتومی، ویژه مقادیر انرژی مربوط به سیستمی شامل یک نقطه کوانتومی درون یک کاواک نوری محاسبه شد. سپس، به ازای نقاط کوانتومی و کاواک های نوری متفاوت، شرایط آستانه برای دستیابی به حالت تزویج قوی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ثابت جفت شدگی، شکافتگی ترازها بیشتر شده و آستانه برای دستیابی به حالت تزویج قوی مهیاتر می شود. آستانه شکافتگی ترازها برای نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکروالکترون ولت درون کاواک های نوری با سرعت های واهلش ۴۵ تا ۲۰۵ میکرو الکترون ولت در ثوابت تزویج ۱۰/۷۵ تا ۵۰/۷۵ میکروالکترون ولت رخ داد. در واقع مشاهده شد به منظور دستیابی به حالت تزویج قوی در چنین سیستم هایی، باید به سراغ مهندسی کاواک هایی با سرعت واهلش کمتر رفت زیرا تغییر در نقاط کوانتومی تاثیر چشمگیری در رسیدن به این هدف ندارد. همچنین، در سیستمی با چنین نقطه کوانتومی که با ثابت تزویج ۳۵ میکروالکترون ولت در تزویج با کاواک نوری با انرژی های ۲۰ تا ۱۴۰ میکروالکترون ولت است، فاکتور کیفیت در بازه ۴۹۳۰ تا ۵۰۶۰ است.

واژگان کلیدی: نقطه کوانتومی، کاواک نوری، فاکتور کیفیت، شاخص شکافتگی ترازها

*mmohebfar@gmail.com

هر سه راستا جایگزیده می شوند و منجر به ایجاد یک طیف گسسته در نقاط کوانتومی می شود. با توجه به اینکه این خصوصیات در سیستم های اتمی وجود دارند، به نقاط کوانتومی اتم انفرادی نیز می گویند. خصوصیات منحصر بفرد نقاط کوانتومی باعث شده تا بتوان آنها را مطابق نیاز و کاربرد خود ساخت به عبارتی این نانو ساختارها قابلیت تطبیق پذیری بسیاری دارند. در نقاط کوانتومی امکان تغییر اندازه گاف انرژی وجود دارد. می توان با این امکان، طول موج نور تابش شده را تنظیم کرد. در واقع با

۱- مقدمه

نقاط کوانتومی نیم رساناهای صفر بعدی هستند که حاملین در هیچ جهتی به عنوان حامل آزاد رفتار نمی کنند. وقتی کاهش می یابد، چگالی حالت ها به طور محسوسی تغییر می کند و در صفر بعد چگالی حالت های ماده بسیار شبیه به اتم می شود. وقتی حامل در سه راستا محدود می شود، ترازهای انرژی گسسته و در

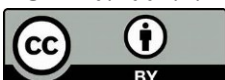
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۸

زمستان ۱۴۰۰ | شماره ۴ | سال هشتم

۷۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷

DOR: 20.1001.1.24235628.1400.8.4.9.4

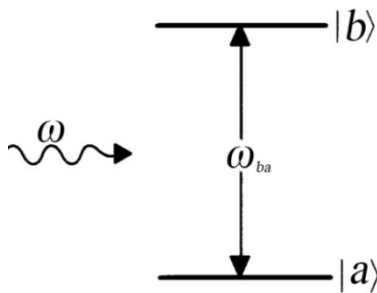


[۱۶]، ساخت نانولیزرها [۱۵]، رمزنگاری کوانتومی [۱۷]، محاسبات کوانتومی [۱۸] و ...، این سیستمها مورد توجه طیف وسیعی از پژوهشگران قرار دارند.

در این پژوهش، نانوسیستم فوتونیک شامل یک نقطه کوانتومی درون یک کاواک نوری در نظر گرفته شد. با استفاده از رویکرد نوری کوانتومی، هامیلتونی سیستم نوشته و پس از اعمال تقریب موج چرخان، ویژه مقادیر انرژی محاسبه و پارامترهای فاکتور کیفیت و شاخص شکافتگی ترازهای این سیستم با تغییر نقطه کوانتومی و تغییر کاواک نوری به منظور دستیابی به شرایط تزویج قوی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- بررسی تحلیلی

از آنجایی که در این سیستمها اتم در تشدید یا نزدیک به یکی از مدهای کاواک قرار می گیرد، تنها آن دو تراز اهمیت پیدا می کنند که بسامد گذار بین آنها برابر با بسامد مد کاواک است. در چنین شرایطی می توان از برانگیختگی اتم به ترازهای دیگر صرف نظر کرد و آن را بر اساس سیستم اتمی دو تراز مدلسازی کرد. طرحواره ای از این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۱: سیستم اتمی دو تراز تحت تابش میدانی با فرکانس ω

تراز پایه چنین سیستمی دارای انرژی E_a و تراز برانگیخته آن دارای انرژی E_b است. با توجه به این مدل، هامیلتونی اتم را بر اساس تراز پایه $|a\rangle$ و تراز برانگیخته $|b\rangle$ می توان بسط داد.

$$H_{atom} = E_a |a\rangle\langle a| + E_b |b\rangle\langle b| \quad (1)$$

با تعریف $|a\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ و $|b\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ و همچنین، ماتریس پائولی σ_z بصورت رابطه (۲) هامیلتونی اتم بصورت رابطه (۳) بدست می آید:

کوچکتر شدن قطر نقطه کوانتومی، تعداد اتمهای تشکیل دهنده آن کاهش می یابد و در نتیجه ترازهای مربوط به آن اتمها نیز کم می شود. کم شدن ترازهای انرژی نیز به افزایش گاف انرژی در نقاط کوانتومی می انجامد از این رو این نوساختارها کاربردهای گسترده ای در سیستمهای الکتروپدینامیک کوانتومی [۱] اپتوالکترونیک [۲-۷]، پزشکی [۸]، سلولهای خورشیدی [۹] و به تازگی در مبارزه با ویروس کوید-۱۹ [۱۰] دارند.

نانوسیستم نقطه کوانتومی-کاواک نوری یکی از سیستمهایی است که در فناوری های پیشرفته اخیر نظیر جمع نشدگی فوتون، درهم تنیدگی، تولید تک فوتون، رمزنگاری کوانتومی، اطلاعات کوانتومی و ... [۱۱-۱۶] مورد توجه دانشمندان فراوانی قرار گرفته است. اگر ضریب جفت شدگی بین نقطه کوانتومی (به عنوان گسیلنده) و کاواک نوری خیلی بیشتر از سرعت واپاشی آنها باشد، سیستم در حالت جفت شدگی قوی [۱۱ و ۱۲] قرار دارد. این حالت برای انجام آزمایشهای مربوط به حوزه اطلاعات کوانتومی بستری مناسب است. همچنین، پدیده جمع نشدگی [۱۱] که در حالت جفت شدگی قوی اتفاق می افتد ساخت گسیل کننده های تک فوتون [۱۴] را امکانپذیر می سازد که در رمزنگاری کوانتومی [۱۷]، محاسبات کوانتومی [۱۸] و تکرارکننده های کوانتومی [۱۹] کاربرد دارد. ویژگی کلیدی این حالت این است که هیچ گاه مدهای کاواک و گسیلنده یکدیگر را قطع نمی کنند. این امر باعث بروز پدیده ی جمع نشدگی فوتون می شود. در این پدیده کاملاً کوانتومی، فاصله ی زمانی بین دریافت دو فوتون پشت سر هم افزایش می یابد و احتمال اینکه دو فوتون هم زمان به آشکارساز برسند نزدیک به صفر می شود. ویژه انرژی ها در این حالت دیگر تبهگن نخواهند بود و از هم جدا می شوند. شکاف بین انرژی ها متناسب با مقدار ثابت جفت شدگی است. توانایی ساخت کاواکهایی با کیفیت بالا امکان قراردادن سیستم در این رژیم و مشاهده ی رفتار آن را میسر ساخته است.

جفت شدگی قوی نخستین بار در یک سیستم اتم-کاواک توسط تامسون و همکارانش در سال ۱۹۹۲ گزارش شد [۲۰]. معادل چنین سیستمی در حالت جامد، یک نقطه کوانتومی نیمه هادی در تزویج با یک میکروکاواک نیم رسانا است. با توجه به کاربردهای مهم این سیستم فوتونیک در حوزه های جمع نشدگی فوتونی [۱۱]، افزایش بازده کوانتومی چشمه های تک فوتون [۱۳، ۱۴] و

با ساده سازی روابط، هامیلتونی برهم کنش به صورت رابطه (۱۰) در می آید.

$$H_{interaction} = \hbar(g\delta^+ + g^*\delta^-)(a - a^\dagger) \quad (10)$$

در صورت استفاده از تقریب موج چرخان (چشم پوشی از دو جمله $a^\dagger \Lambda^+$ و $a\Lambda^-$)، هامیلتونی برهمکنش بصورت رابطه (۱۱) در می آید.

$$H_{interaction} = \hbar(g\delta^+ a + g^*\delta^- a^\dagger) \quad (11)$$

در نهایت، هامیلتونی کلی سیستم که حاصل جمع تمام هامیلتونی ها است، بصورت رابطه (۱۲) شکل می گیرد.

$$H_{total} = \hbar\omega a a^\dagger + \hbar\omega_0 \sigma_z / 2 + \hbar(g\delta^+ + g^*\delta^-)(a - a^\dagger) \quad (12)$$

با جایگذاری این هامیلتونی در معادله مستقل از زمان شرودینگر (معادله ویژه مقدری)، ویژه مقادیر انرژی برای سیستم اتم (نقطه کوانتومی)-کاوک بصورت روابط (۱۳) و (۱۴) بدست می آیند.

$$E_1 = \left(E_{cavity} + E_{atom} - i\gamma_{cavity} + \gamma_{atom}/2 \right) / 2 + \left(g^2 - (\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} - 2i\Delta)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$E_2 = \left(E_{cavity} + E_{atom} - i\gamma_{cavity} + \gamma_{atom}/2 \right) / 2 - \left(g^2 - (\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} - 2i\Delta)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_{atom} = \hbar\omega_0 \sigma_z / 2 \quad (3)$$

وقتی اتم داخل کاواک قرار می گیرد با میدان داخل آن برهم کنش می کند، هامیلتونی برهم کنش را برای چنین سیستمی می توان از رهیافت نیمه کلاسیک (رهیافتی که در آن اتم به صورت کلاسیکی و فوتون به صورت کوانتومی تحلیل می شود) و با استفاده از تقریب دوقطبی به صورت رابطه (۴) به دست آورد.

به در این رابطه γ بار الحریقی الحرون (۳-۶) و Δ محان الحرون نسبت به هسته و \vec{E} میدان الکتریکی است. \vec{r} را میتوان بصورت عملگری در نظر گرفت و بر روی ویژه کت های آن بسط داد:

$$q\vec{r} = P_{aa}|a\rangle\langle a| + P_{ba}|b\rangle\langle a| + P_{bb}|b\rangle\langle b| + P_{ab}|a\rangle\langle b| \quad (5)$$

$$o^+ = |b\rangle\langle a| = |o^- \rangle \quad (7)$$

$$\Delta E = \left\{ E_0 - i\gamma_{cavity} + \gamma_{atom}/4 + \left(g^2 - \left(\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} \right)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} - \left\{ E_0 - i\gamma_{cavity} + \gamma_{atom}/4 - \left(g^2 - \left(\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} \right)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (17)$$

در نهایت، شاخص شکافتگی ترازها به صورت رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta E = 2 \left(g^2 - \left(\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} \right)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

این رابطه بسیار مهم شرط تزویج سیستم را بیان می کند. تزویج در دو حالت قوی و ضعیف دسته بندی می شود که هر کدام از این دو حالت کاربردهای خاص خود را دارند. برای سیستم اتم-کاواک نوری که شرط $g > |\gamma_{cavity} - \gamma_{atom}|/4$ برقرار باشد

بیانگر این است که سیستم اتم-کاواک نوری در حالت تزویج قوی قرار می گیرد. این به این معنی است که دو ویژه حالت که پیشتر تبهگن بودند، حال از یکدیگر جدا می شوند. این در حالی است که اگر شرط $g \leq |\gamma_{cavity} - \gamma_{atom}|/4$ برقرار باشد،

سیستم مذکور در حالت تزویج ضعیف قرار دارد.

۲- نتایج و بحث

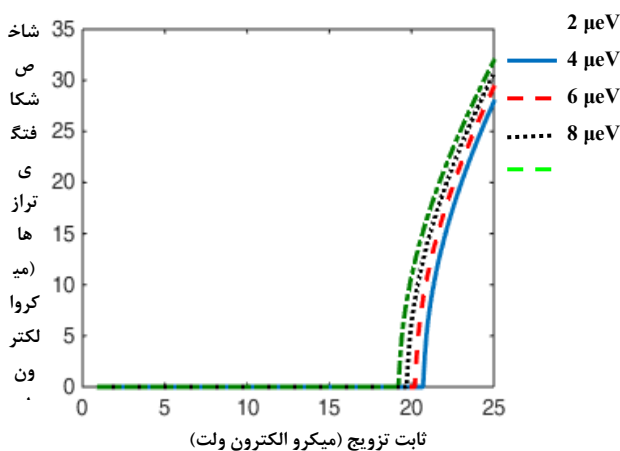
$$E_1 = E_0 - i\gamma_{cavity} + \gamma_{atom}/4 + \left(g^2 - \left(\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} \right)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\left(\gamma_{cavity} - \gamma_{atom} \right)^2 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

تغییرات این ویژه دو مقدار $(\Delta E = E_1 - E_2)$ که بیانگر فاصله بین دو قله ی انرژی است، را شاخص شکافتگی ترازها می نامیم و بصورت رابطه (۱۷) بدست می آید.

الکترون ولت رخ داد. این یعنی نوع کاواک نوری مورد استفاده نقش قابل توجهی در دستیابی به تزویج قوی در این سیستم فوتونیک دارد.

در گام بعدی، نقاط کوانتومی متفاوتی با سرعت های واهلش ۲، ۴، ۶ و ۸ میکرو الکترون ولت را درون یک کاواک نوری آلومینیوم آرسناید/ گالیوم آرسناید با سرعت واهلش ۸۵ میکرو الکترون ولت قرار داده که در پژوهش [۱۱] برای کاربردهای اطلاعات کوانتومی به صورت تجربی مورد استفاده قرار گرفته را در نظر و محاسبات را برای آن انجام می دهیم.



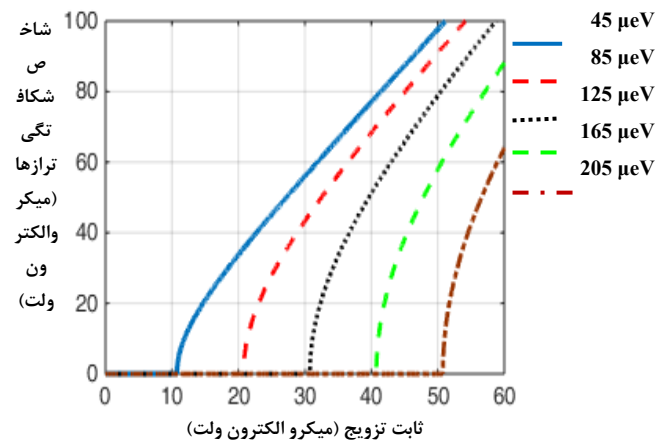
شکل ۳: شاخص شکافتگی ترازها به ازای نقاط کوانتومی متفاوت

این نتایج نشان می دهد آستانه شکافتگی ترازها برای نقاط کوانتومی متفاوت با سرعت های واهلش ۲، ۴، ۶ و ۸ میکرو الکترون ولت که درون این کاواک به ترتیب در ثابت تزویج ۲۰/۷۵، ۲۰/۲۵، ۱۹/۷۵ و ۱۹/۲۵ میکرو الکترون ولت رخ می دهد. پس، در گستره نقاط کوانتومی ذکر شده، تغییر نقطه کوانتومی تاثیر چشمگیری در رسیدن به سیستم در حالت تزویج قوی ندارد.

در واقع از آنجایی که در سیستم های نقطه کوانتومی- کاواک نوری (در حالت تزویج قوی) گزارش شده، سرعت های واهلش نقاط کوانتومی و کاواک به ترتیب از مرتبه چند میکرو الکترون ولت و چند ده میکرو الکترون ولت است، بر مبنای نتایج بدست آمده در شکل های (۳) و (۴) می توان پیشنهاد داد به منظور دستیابی به حالت تزویج قوی باید به سراغ مهندسی کاواک هایی با سرعت واهلش کمتر رفت.

با توجه به مقالات و پژوهش های انجام گرفته در این حوزه، سیستم های نقطه کوانتومی- کاواک نوری ای که در کارهای تجربی به حالت تزویج قوی دست پیدا کرده اند، غالباً از نقاط کوانتومی با سرعت واهلش در حد چند میکرو الکترون ولت و کاواک های نوری با سرعت های در حد چند ده میکرو الکترون ولت تشکیل شده اند [۱۱]. از این رو و به منظور اینکه محاسبات تحلیلی ما منطبق بر نتایج تجربی باشد، در این کار تحلیلی نیز از نقاط کوانتومی و کاواک های نوری با سرعت های واهلشی در گستره ذکر شده استفاده کرده ایم.

محاسبات تحلیلی برای نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکرو الکترون ولت درون کاواک های نوری متفاوتی با سرعت های ۴۵، ۸۵، ۱۲۵، ۱۶۵ و ۲۰۵ میکرو الکترون ولت انجام شد و برای هر یک از حالت های مذکور آستانه شکافتگی ترازها بدست آمد. شکل (۲) نتایج این محاسبات را نشان می دهد.



شکل ۲: شاخص شکافتگی ترازها به ازای کاواک های نوری متفاوت

همانطور که از شکل (۲) مشخص است، با افزایش ثابت جفت شدگی، شکافتگی ترازها یا همان آستانه تزویج قوی بین نقطه کوانتومی و کاواک نوری بیشتر و شرایط سیستم برای دستیابی به تزویج قوی و همچنین، شکافتگی رابی آسانتر می شود. آستانه شکافتگی ترازها برای نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکرو الکترون ولت درون کاواک های نوری با سرعت های واهلش ۴۵، ۸۵، ۱۲۵، ۱۶۵ و ۲۰۵ میکرو الکترون ولت متفاوت به ترتیب در ثابت های تزویج ۱۰/۷۵، ۲۰/۷۵، ۳۰/۷۵، ۴۰/۷۵ و ۵۰/۷۵ میکرو

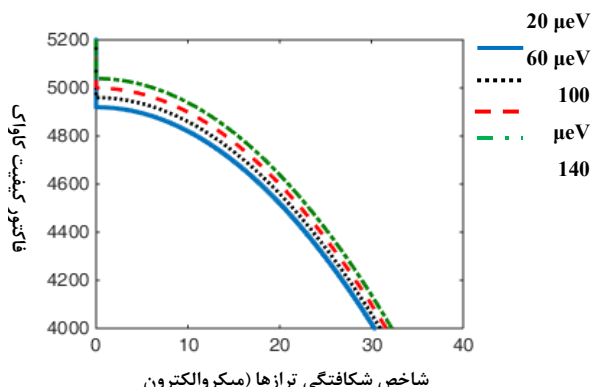
کاواک بیشتر است یعنی برای رسیدن به تزویج قوی، کمیت ثابت جفت شدگی، نقش بسیار تاثیرگذاری را به ایفا می‌کند.

همچنین از آنجایی که فاکتور کیفیت میکرو کاواک نوری از رابطه $Q_c = \frac{E_{cavity}}{\gamma_{cavity}}$ بدست می‌آید [۱۲]، شاخص شکافتگی ترازاها به صورت رابطه (۱۹) قابل محاسبه است.

$$\Delta E = \sqrt{4g^2 - \frac{(E_c - Q_c \gamma_a)^2}{4Q_c}} \quad (19)$$

محاسبات برای سیستم نوری شامل نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکرو الکترون ولت و ثابت تزویج ۳۵ میکرو الکترون ولت و کاواکهای با انرژی های متفاوت ۲۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ میکرو الکترون ولت انجام و مشاهده شد که تزویج قوی در در فاکتور کیفیت های ۴۹۳۰، ۴۹۷۵، ۵۰۱۰ و ۵۰۶۰ رخ می دهد.

(شکل (۶))

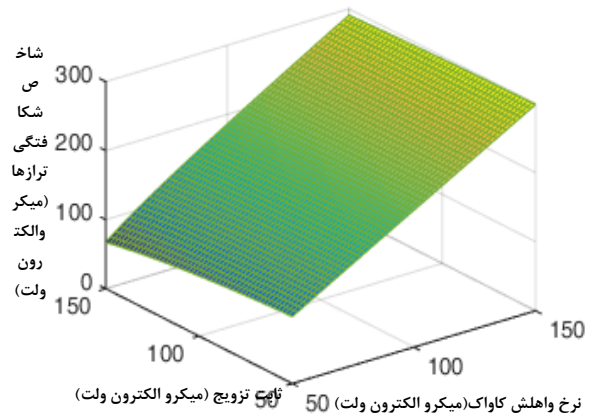


شکل ۶: آستانه تزویج قوی برای سیستمهایی با ثوابت تزویج و کاواک های متفاوت

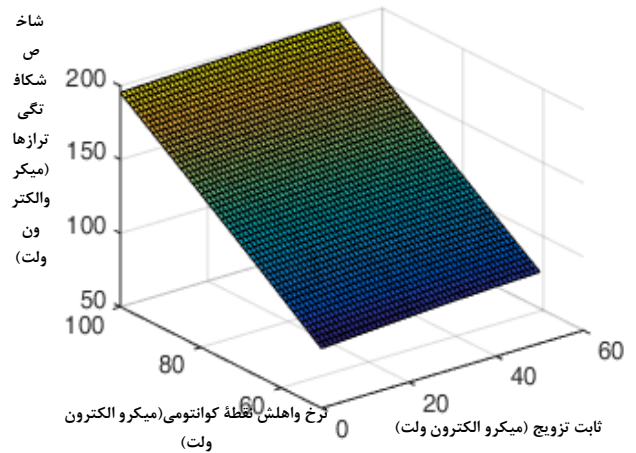
در واقع، برای نقاط کوانتومی و کاواکهای نوری معمول مورد استفاده برای کاربردهایی که به شرایط تزویج قوی نیاز داریم، فاکتور کیفیت باید در گستره ۴۹۳۰ تا ۵۰۶۰ باشد.

همچنین، مشاهده شد برای سیستمی شامل نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکرو الکترون ولت و کاواک های نوری با ثوابت تزویج ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ میکرو الکترون ولت، آستانه دستیابی به تزویج قوی به ازای فاکتورهای کیفیت ۵۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۳۰۰۰ و ۱۷۰۰۰ قابل دستیابی است (شکل (۷)).

شکلهای (۴) و (۵) رفتار آستانه تزویج قوی را برای کاواک های نوری و نقاط کوانتومی متفاوت (با سرعت های واهلش متفاوت) را نشان می دهد.



شکل ۴: آستانه تزویج قوی برای سیستمهایی با ثوابت تزویج و کاواک های متفاوت



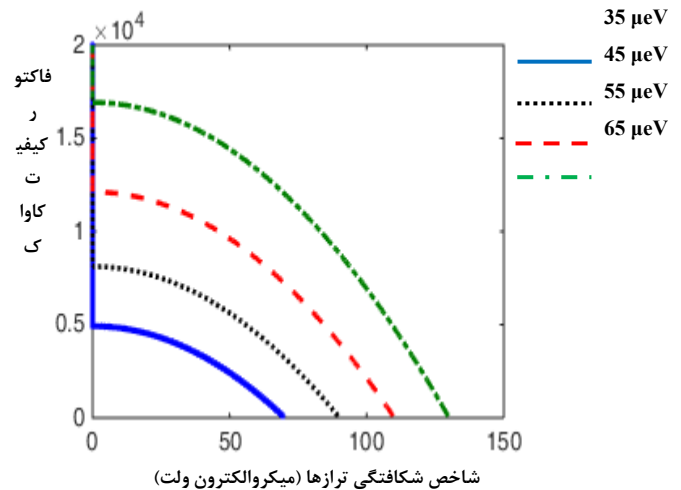
شکل ۵: آستانه تزویج قوی برای سیستمهایی با ثوابت تزویج و نقاط کوانتومی متفاوت

با توجه به رویه بدست آمده به وضوح دیده می‌شود که با کاهش سرعت واهلش کاواک، هر دو کمیت ثابت تزویج و شکافتگی ترازاها افزایش می‌یابند. یعنی سرعت واهلش کاواک پارامتری مزاحم برای ایجاد تزویج قوی در سیستم نقطه کوانتومی-کاواک است. نتیجه دیگری که از این رویه بدست می‌آید، این است شیب نمودار ثابت تزویج به مراتب از شیب نمودار سرعت واهلش

واهلش ۴۵، ۸۵، ۱۲۵، ۱۶۵ و ۲۰۵ میکرو الکترون ولت به ترتیب در ثابت های تزویج ۱۰/۷۵، ۲۰/۷۵، ۳۰/۷۵، ۴۰/۷۵ و ۵۰/۷۵ میکرو الکترون ولت رخ داد. در واقع از آنجایی که در سیستمهای نقطه کوانتومی-کاواک نوری (در حالت تزویج قوی) گزارش شده، سرعتهای واهلش نقاط کوانتومی و کاواک به ترتیب از مرتبه چند میکرو الکترون ولت و چند ده میکرو الکترون ولت است، بر مبنای نتایج بدست آمده در این پژوهش پیشنهاد می شود به منظور دستیابی به حالت تزویج قوی به سراغ مهندسی کاواک هایی با سرعت واهلش کمتر رفت. همچنین، نشان داده شد شیب نمودار ثابت تزویج به مراتب از شیب نمودار سرعت واهلش کاواک بیشتر است یعنی برای رسیدن به تزویج قوی، کمیت ثابت جفت شدگی، نقش بسیار تاثیرگذاری را به ایفا می کند. همچنین مشاهده شد آستانه شکافتگی ترازاها برای چنین نقطه کوانتومی که با ثابت تزویج ۳۵ میکرو الکترون ولت در تزویج با کاواکهای با انرژی های ۲۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ میکرو الکترون ولت است به ترتیب در فاکتور کیفیت های ۴۹۳۰، ۴۹۷۵، ۵۰۱۰ و ۵۰۶۰ رخ می دهد.

مراجع

- [1]. C. Kurtsiefer, S. Mayer, P. Zarda and H. Weinfurter, "Stable solid-state source of single photons", Phys. Rev. Lett. 85, 290, 2000.
- [2]. Z. Yuan, B. E. Kardynal, R. M. Stevenson, A. J. Shields, C. J. Lobo, K. Cooper, N. S. Beattie, D. A. Ritchie, M. Pepper, "Electrically driven single-photon source", Science, 295, 102, 2002.
- [3]. F. hakimian, M. R. Shayesteh, M. R. Moslemi, "Proposal for Modeling of FWM Efficiency of QD-SOA Based on the Pump/Probe Measurement Technique", journal of optoelectrical nanostructures, 5 4, 49-66, 2020.
- [4]. F. hakimian, M. R. Shayesteh, M. R. Moslemi, "A Proposal for a New Method of Modeling of the Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers", journal of optoelectrical nanostructures, 4, 3, 1-16, 2019.
- [5]. R. Pourtjabadi, M. Nayeri, "A Novel Design of a Multi-layer 2:4 Decoder using Quantum- Dot Cellular Automata", journal of



شکل ۷: آستانه تزویج قوی برای سیستمهایی با ثوابت تزویج و کاواکهای متفاوت

شکل (۷)، نشان می دهد که برای سیستمی شامل نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکرو الکترون ولت و کاواک های نوری با ثوابت تزویج ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ میکرو الکترون ولت، آستانه دستیابی به تزویج قوی به ازای فاکتورهای کیفیت ۵۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۳۰۰۰ و ۱۷۰۰۰ قابل دستیابی است. توافق قابل قبولی بین نتایج بدست آمده در این کار پژوهشی و نتایج بدست آمده در [۱۱] مشاهده شد.

۳- نتیجه گیری

ویژه مقادیر انرژی یک نانوسیستم فوتونیک شامل نقطه کوانتومی درون کاواک نوری بر اساس رویکرد اپتیک کوانتومی به منظور دستیابی به تزویج قوی در این سیستم، محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش ثابت جفت شدگی، شکافتگی ترازاها یا همان آستانه تزویج قوی بین نقطه کوانتومی و کاواک نوری بیشتر و شرایط برای دستیابی به تزویج قوی آسانتر می شود. آستانه شکافتگی ترازاها برای نقطه کوانتومی با سرعت واهلش ۲ میکرو الکترون ولت درون کاواک های نوری با سرعت های

cavity-QED strong-coupling regime”, *Optics Express* 13, 24, 9660-9665, 2005.

[15]. S. Strauf, F. Jahnke, “Single quantum dot nanolaser”, *Laser Photonics Rev.*, 5, 5, 607–633, 2011

[16]. Hai-Zhi Song, Wei Zhang, Li-Bo Yu, Zhiming M. Wang, “Micropillar Cavity Design for 1.55- μm Quantum-Dot Single-Photon Sources”, *Journal of Electronic Science and Technology*, 17, 3, 221-230, 2019

[17]. N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden, “Quantum cryptography,” *Rev. Mod. Phys.* vol. 74, 145–195, 2002

[18]. E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn, “A scheme for efficient quantum computation with linear optics”, *Nature* 409, 46–52, 2001.

[19]. Y. Yamamoto, F. Tassone, H. Cao, “Semiconductor Cavity Quantum Electrodynamics,” Berlin, Germany: Springer-Verlag, 56-63, 2000

[20]. R. J. Thompson, G. Rempe, H. J. Kimble, “Observation of normal-mode splitting for an atom in an optical cavity”, *Phys. Rev. Lett.*, 68, 1132, 1991.

[21]. J. D. Serna, “Coherent Manipulation of Multilevel Atoms for Quantum Information Processing”, Ph.D. dissertation, University of Arkansas, 2-5, 2005.

optoelectrical nanostructures 4, 1, 39-50, 2019.

[6]. H. Bahramiyan, S. Bagheri, “Linear and nonlinear optical properties of a modified Gaussian quantum dot: pressure, temperature and impurity effect”, *Journal of optoelectrical nanostructures* 3, 3, 79-100, 2018.

[7]. M. R. Mohebbifar, M. Zohrabi, “Influence of Grating Parameters on the Field Enhancement of an Optical Antenna under Laser Irradiation”, *Journal of optoelectrical nanostructures*, 4, 4, 65-80, 2019.

[8]. U. Badilli, F. Mollarasouli, N. K. Bakirhan, Y. Ozkan, S. A. Ozkan, “Role of quantum dots in pharmaceutical and biomedical analysis, and its application in drug delivery”, *Trends Analyt Chem*, 131, 116013, 2020.

[9]. A. Das, S. R. Mondal, G. Palai, “Realization of graphene based quantum dot solar cell through the principle of photonics”, *Optik*, 221, 165283, 2020.

[10]. S. Manivannan, K. Ponnuchamy, “Quantum dots as a promising agent to combat COVID- 19”, *Appl Organomet Chem.* , 34, 10, 2020.

[11]. D. Press, S. Gotzinger, S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Löffler, M. Kamp, A. Forchel, Y. Yamamoto, “Photon Antibunching from a Single Quantum-Dot-Microcavity System in the Strong Coupling Regime”, *Phys. Rev. Lett.*, 98, 117402, 2007.

[12]. J. P. Reithmaier, G. Sek, A. Löffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L. V. Keldysh, V. D. Kulakovskii, T. L. Reinecke, A. Forchel, “Strong coupling in a single quantum dot - semiconductor microcavity system”, *Nature*, 432, 197-200, 2004.

[13]. J. M. Gérard, B. Sermage, B. Gayral, B. Legrand, E. Costard, V. Thierry-Mieg, “Enhanced Spontaneous Emission by Quantum Boxes in a Monolithic Optical Microcavity”, *Physical Review Letters*, 81 5, 1110-1113, 1998.

[14]. G. Cui, M. G. Raymer, “Quantum efficiency of single-photon sources in the



Quantum optical study of quality factor and energy level splitting for a quantum dot within optical cavity

M. R. Mohebbifar*, T. Kamari

Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran

Abstract:

A nanosystem containing a quantum dot within an optical cavity is a platform for the study of important quantum phenomena such as photon antibunching, entanglement, single photon generation, and quantum information. The use of such a system in these technologies depends on achieving a strong coupling mode between the quantum dot and the optical cavity. In this study, using a quantum optical approach, the energy Eigen values of a system including a quantum dot within an optical cavity were calculated. Then, for different quantum dots and optical cavities, the threshold conditions were studied to achieve strong coupling mode. The results showed that with increasing the coupling constant, the energy levels splitting increases and the threshold conditions are more favorable for achieving strong coupling mode. The energy level splitting threshold for the quantum dot with a decay rate of $2 \mu\text{eV}$ within optical cavities with a decay rate of 45 to $205 \mu\text{eV}$ occurred at a coupling constant of 10.75 to $50.75 \mu\text{eV}$. In fact, it was observed that in order to achieve a strong coupling mode in such systems, it is necessary to go to the engineering of cavities with lower decay rates because the change in quantum dots does not have a significant effect on achieving this goal. Also, in a system with such a quantum dot, which has a coupling constant of $35 \mu\text{eV}$ within an optical cavity with energies of 20 to $140 \mu\text{eV}$, the quality factor is in the range of 4930 to 5060 .

Keywords: Quantum dot, Optical cavity, Quality factor, Energy level splitting threshold