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

کنترل فازی انتشار فراسرعت نور به فروسرعت نور در یک مولکول نقطه کوانتومی سه ترازی آبشاری

مژگان مومنی دمنه[۱] و مصطفی صحرایی[۱]

[۱] پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده – در این مقاله، اثر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده بر رفتار جذب و پاشندگی باریکه کاوشگر در یک مولکول نقطه کوانتومی سه ترازی آبشاری مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که فاز نسبی میدان‌های اعمال شده بر انتشار باریکه کاوشگر در نتیجه جذب، پاشندگی و سرعت گروه آن اثرگذار است. با تغییر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده جذب و پاشندگی باریکه کاوشگر تغییر کرده و می‌توان فراسرعت نور را به فروسرعت نور و هم‌چنین بهره را به جذب و بالعکس سوئیچ کرد.

کلید واژه- فاز نسبی میدان‌های اعمال شده، فراسرعت نور، فروسرعت نور، نقطه کوانتومی

Tunable control phase for superluminal to subluminal light propagation in a ladder three-level quantum dot molecule

Mozhgan Momeni-Demne and Mostafa Sahrai

[1] Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper, the effect of relative phase of applied fields on probe field dispersion and absorption for a ladder-shaped three level quantum dot molecule is investigated. The results show that the relative phase of applied fields can be affected on the probe beam propagation, and thus its absorption, dispersion and group velocity. The dispersion and the absorption may change with the relative phase of applied fields. By adjusting relative phase of applied fields light propagation from superluminal to subluminal and absorption to gain can be switched.

Keywords: Relative phase of applied fields, Superluminal, Subluminal, Quantum dot

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر انتشار پالس نوری در محیط‌های پاشنده مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است[۱و۲]. سیستم‌های اتمی متفاوتی برای کنترل طیف جذب و پاشندگی مورد استفاده قرار گرفته است[۳]. اثر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده در کنترل طیف جذب و پاشندگی باریکه کاوشگر به‌وسیله مولفین بررسی شده است[۴]. مطالعه سرعت گروه بر مواد حالت جامد از جمله چاه کوانتومی و نقطه کوانتومی قابل توجه است[۵]. در این مقاله، انتشار پالس نوری در نقطه کوانتومی سه ترازی آبشاری در دو حالت پایا و دینامیک مورد بررسی قرار گرفته است که با تغییر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده سرعت گروه باریکه کاوشگر تغییر می‌یابد و می‌توان فراسرعت نور را به فروسرعت نور سوئیچ کرد. هم‌چنین می‌توان با تغییر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده جذب را به بهره و بالعکس تغییر داد.

۲- مدل و معادلات

یک نقطه کوانتومی آبشاری با سه تراز پایین $|1\rangle$، تراز بالایی $|3\rangle$ و تراز میانی $|2\rangle$ مطابق شکل۱ در نظر می‌گیریم. تراز $|1\rangle$ به وسیله‌ی نور ضعیف کاوشگر با دامنه‌ی میدان E_p و فرکانس رابی $\Omega_p=\frac{\vec{E}_p.\vec{\mu}_{12}}{2\hbar}$ به تراز $|2\rangle$ و تراز $|2\rangle$ به‌وسیله‌ی نور همدوس قوی با دامنه‌ی میدان E_c و فرکانس رابی $\Omega_c=\frac{\vec{E}_c.\vec{\mu}_{23}}{2\hbar}$ به تراز $|3\rangle$ تزویج شده‌اند. در این روابط μ_{12} و μ_{23} ممان دوقطبی الکتریکی متناظر با گذارهای $|1\rangle\to|2\rangle$ و $|2\rangle\to|3\rangle$ می‌باشد. گسیل خودبه‌خودی از ترازهای $|2\rangle$ به $|1\rangle$ و $|3\rangle$ به $|2\rangle$ مجاز فرض شده‌اند.

معادلات ماتریس چگالی در مختصات دوران یافته به‌صورت زیر هستند.

$$\dot{\rho}_{33}=-2\gamma_{21}\rho_{33}+i(\Omega_c\rho_{23}-\Omega_c\rho_{32})+2R\rho_{11},$$

$$\dot{\rho}_{11}=2\gamma_{32}\rho_{22}+i(\Omega_p\rho_{21}-\Omega_p\rho_{12})-2R\rho_{11},$$

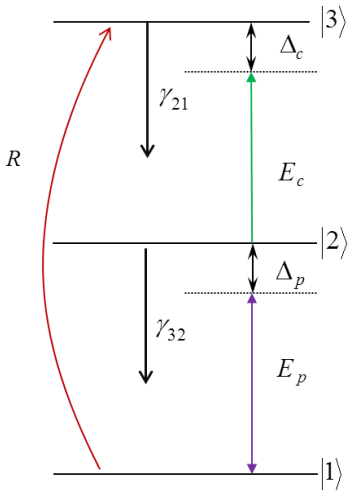
$$\dot{\rho}_{31}=(i\Delta_p+i\Delta_c-\gamma_{21}-R)\rho_{31}+i\Omega_c\rho_{21}-i\Omega_p\rho_{32},$$

$$\dot{\rho}_{32}=-(\gamma_{21}+\gamma_{32}-i\Delta_c)\rho_{32}-i\Omega_p\rho_{31}$$
$$-i\Omega_c(\rho_{33}-\rho_{22}),$$

$$\dot{\rho}_{21}=(i\Delta_p-\gamma_{32}-R)\rho_{21}+i\Omega_c\rho_{31}$$
$$-i\Omega_p(\rho_{22}-\rho_{11})+2\eta\sqrt{\gamma_{21}\gamma_{32}}e^{i\Phi},$$

$$\rho_{11}+\rho_{22}+\rho_{33}=1. \qquad (۱)$$

در این روابط Δ_p و Δ_c به ترتیب نامیزانی میدان کاوشگر و میدان تزویج کننده با گذار مربوطه است. جمله $\eta\sqrt{\gamma_{21}\gamma_{32}}$ تداخل کوانتومی ناشی از گسیل خودبه‌خودی را نشان می‌دهد. پارامتر $\eta=\frac{\vec{\mu}_{32}.\vec{\mu}_{21}}{|\mu_{21}||\mu_{32}|}$ بیانگر جهت گیری نسبی ممان دو قطبی‌های μ_{21} و μ_{32} بوده و نشان‌دهنده شدت تداخل بین مسیرهای واهلش است. فرکانس رابی از طریق روابط $\Omega_p=g_p\sqrt{1-\eta^2}$ و $\Omega_c=g_c\sqrt{1-\eta^2}$ با η ارتباط دارد. در حالت کلی g_p و g_c مختلط اند و می‌توان آن‌ها را به‌صورت $g_p=|g_p|e^{-i\phi_p}$ و $g_c=|g_c|e^{-i\phi_c}$ نوشت، درنتیجه، اختلاف فاز میان دو میدان اعمالی برابر با $\Phi=\phi_c-\phi_p$ می‌شود.



شکل ۱: دیاگرام سطح انرژی سامانه نقطه کوانتومی سه‌ترازی آبشاری[۶]

در حالت کلی پذیرفتاری الکتریکی ماده از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]

$$\chi = \frac{2N\,\mu_{21}}{\varepsilon_0 E_p}\rho_{21} \qquad (۲)$$

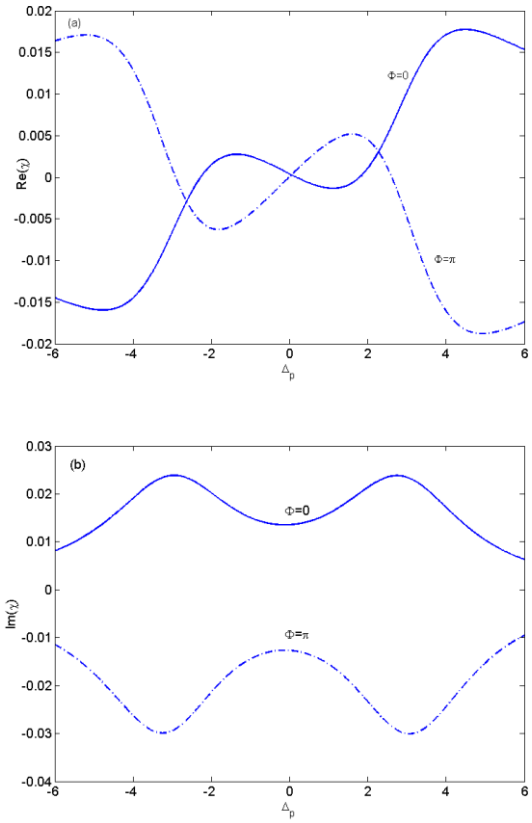
پذیرفتاری الکتریکی ماده را به‌صورت $\chi = \chi' + i\chi''$ داریم که χ' قسمت حقیقی پذیرفتاری الکتریکی متناظر با پاشندگی و χ'' قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی متناظر با جذب در سیستم می‌باشد. اگر $\chi'' > 0$ باشد پرتو کاوشگر توسط محیط جذب می‌شود درصورتی‌که اگر $\chi'' < 0$ باشد پرتو کاوشگر توسط محیط تقویت می‌شود. سرعت گروه متناسب با شیب پاشندگی است. شاخص گروه $n_g = \frac{c}{v_g}$ است که c سرعت نور در خلأ و v_g سرعت گروه می‌باشد که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید[۴].

$$v_g = \frac{c}{1 + 2\pi\chi'(\upsilon_p) + 2\pi\upsilon_p\left(\frac{d\chi'(\upsilon_p)}{d\upsilon_p}\right)} \qquad (۳)$$

در این رابطه $\frac{d\chi'(\upsilon_p)}{d\upsilon_p}$ شیب پاشندگی، $\chi'(\upsilon_p)$ پاشندگی در فرکانس υ_p می‌باشند. طبق این رابطه برای یک مقدار ناچیز پاشندگی سرعت گروه شدیداً به شیب پاشندگی وابسته است. اگر شیب پاشندگی مثبت باشد سرعت گروه از سرعت نور در خلأ کوچک‌تر و انتشار فروسرعت نور خواهیم داشت. اگر شیب پاشندگی منفی باشد سرعت نور در خلأ بزرگتر می‌شود و حتی برای یک شیب پاشندگی منفی بزرگ سرعت گروه منفی می‌شود لذا در این حالت انتشار فراسرعت نور خواهیم داشت.

۳- بحث و نتایج

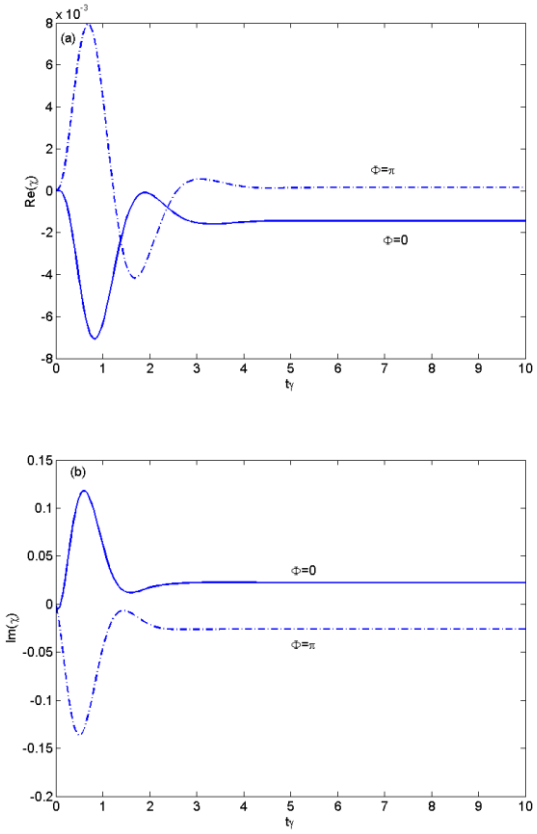
در این مقاله اثر فاز نسبی میدان‌های همدوس با در نظر گرفتن تداخل کوانتومی مورد بحث قرار می‌گیرد. طیف جذب و پاشندگی باریکه کاوشگر در دو حالت $\Phi = 0$ و $\Phi = \pi$ برای حالت پایا و دینامیک رسم شده‌اند. نمودار(a-۲) نشان می‌دهد برای $\Phi = 0$ شیب پاشندگی در اطراف نامیزانی میدان کاوشگر منفی بوده که نشان‌دهنده‌ی فراسرعت نور است و برای $\Phi = \pi$ شیب پاشندگی مثبت بوده و انتشار فروسرعت نور است. نمودار (b-۲) نشان‌دهنده‌ی جذب است که که برای $\Phi = 0$ جذب و برای $\Phi = \pi$ بهره وجود دارد. در واقع فراسرعت نور همراه جذب و فرو سرعت نور همراه بهره می‌باشد.



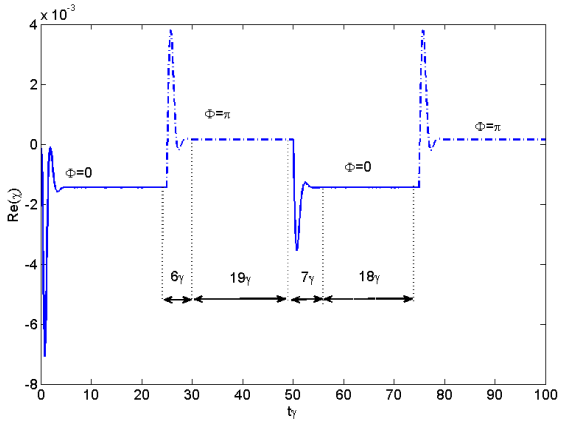
شکل ۲: نمودارهای تأثیر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده بر (a) پاشندگی و (b) جذب در صورتی‌که مقادیر کمیت‌ها به صورت زیر می‌باشند: $\Delta_d = 0.1\mu ev, \Omega_c = 3\mu ev, \Omega_p = 0.2\mu ev$, $\gamma_{21} = 1.13\mu ev, \gamma_{32} = 0.74\mu ev$.

تحول زمانی پاشندگی مطابق نمودار (a-۳) برای $\Phi = 0$ و $\Phi = \pi$ برای مدت کوتاهی نوسانی است و بلافاصله به یک مقدار منفی برای $\Phi = 0$ و یک مقدار مثبت برای $\Phi = \pi$ می‌رسد. جذب نیز دارای رفتار مشابهی مانند پاشندگی است با این تفاوت که برای $\Phi = 0$ جذب به یک مقدار مثبت و برای $\Phi = \pi$ جذب به یک مقدار منفی می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی بهره می‌باشد(شکل(b-۳)). در واقع با تغییر اختلاف فاز شیب پاشندگی از منفی به مثبت و جذب به بهره تبدیل می‌شود.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]



شکل ۳: نمودارهای تأثیر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده بر (a) پاشندگی و (b) جذب در حالت دینامیک مقادیر کمیت‌ها به صورت زیر می‌باشند: $\Delta_d = 0.1\mu ev$, $\Omega_c = 3\mu ev$, $\Omega_p = 0.2\mu ev$, $\Delta_p = 0.17\mu ev$, $\gamma_{21} = 1.13\mu ev$, $\gamma_{32} = 0.74\mu ev$.



شکل ۴: نمودار سوئیچزنی پاشندگی بر اساس تغییرات فاز نسبی میدان‌های اعمال شده که مقادیر کمیت‌ها به صورت زیر می‌باشند: $\Delta_d = 0.1\mu ev$, $\Omega_c = 3\mu ev$, $\Omega_p = 0.2\mu ev$, $\Delta_p = 0.17\mu ev$, $\gamma_{21} = 1.13\mu ev$, $\gamma_{32} = 0.74\mu ev$.

با کنترل فاز نسبی می‌توان سوئیچ زنی انجام داد، به گونه‌ای که در صورت تغییر اختلاف فاز از $\Phi = 0$ به $\Phi = \pi$ پاشندگی از منفی به مثبت تغییر می‌کند و این همان سوئیچزنی از فرا سرعت نور به فرو سرعت نور می‌باشد. هم‌چنین می‌توان جذب را به بهره سوئیچ کرد. زمان سوئیچزنی از فراسرعت نور به فروسرعت نور 6γ و از فروسرعت نور به فراسرعت نور 7γ است. زمان استراحت بین مراحل سوئیچزنی برای فروسرعت نور 19γ و برای فراسرعت نور 18γ می‌باشد. بنابراین کل زمان در نظر گرفته شده 25γ است (شکل۴).

۴- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار جذب و پاشندگی باریکه کاوشگر در یک نقطه کوانتومی سه ترازی نوع آبشاری در دو حالت پایا و دینامیک مورد بررسی قرار گرفته است. اثر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده روی سرعت گروه مورد بررسی قرار می‌گیرد که نشان می‌دهد با تغییر فاز نسبی میدان‌های اعمال شده می‌توان جذب، پاشندگی و سرعت گروه را کنترل کرد. سرعت گروه از فراسرعت نور به فروسرعت نور و جذب به بهره سوئیچ می‌شود. از این سامانه می‌توان برای ساخت سوئیچ نوری استفاده کرد که کاربرد فراوانی در ارتباطات کوانتومی و محاسبات کوانتومی دارد.

مراجع

[1] S. E. Harris, "*Electromagnetically induced transparency*",Phys. Today **50**, 36 (1997)

[2] A. Imamoglu, M. Fleischhauer, J. P. Marangos, "*Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media*", Rev. Mod. Phys.**77**, 633 (2005)

[3] K. Boller, A. Imamoglu, S. Harris, "*Observation of electromagnetically induced transparency*", Phys.Rev.Lett. **67**, 3062 (1991)

[4] M. Sahrai, M. Mahmoudi,"Transient dispersion and absorption in a V-shaped atomic system",J.Phys.B, **42**, 235503 (2009)

[5] M. Mahmoudi, M. Sahrai," Absorption-free superluminal light propagation in a quantum-dot molecule",Phys.E,**41**, 1772 (2009)

[6] D. Gerardot, D. Brunner, P.A. Dalgarno, K. Karrai, A. Badolato, P.M. Petroff and R.J. Warburton, " Dressed excitonic states and quantum interference in a three-level quantum dot ladder system", New.J.Phys, **11**, 0132028 (2009)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-20]