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

کنترل همدوس سیستم دوترازی دوگانه در حالت فراتر از تشدید چند فوتونی

لیدا ابراهیمی زهروی، آذر وفافرد و محمد محمودی

گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

چکیده – در این مقاله خواص اپتیکی میدان کاوشگر ضعیف در سیستم دوترازی دوگانه درحالت فراتر از تشدید چند فوتونی بررسی شده است. سرعت گروه پالس نوری به وسیله شدت میدان های اعمالی کنترل شده و انتشار نور تند سرعت به همراه بهره در سیستم مشاهده شده است. همچنین با استفاده از میدان دمشی نا همدوس غیر مستقیم، سرعت گروه پالس نوری کنترل شده است.

کلید واژه- انتشار نور تند سرعت، سیستم دوترازی دوگانه، کنترل همدوس

Coherent control in a duplicated two-level system beyond multi-photon resonance condition

Lida Ebeahimi Zohravi, Azar Vafafard and Mohammad Mahmoudi

Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan

Abstract- In this paper the optical properties of a weak probe field in a duplicated two-level (DTL) system are investigated beyond multi-photon resonance (MPR) condition. The group velocity of light pulse can be controlled by the intensity of applied fields and the gain-assisted superluminal light propagation is obtained in this system. Moreover, the group velocity can be controlled by incoherent pumping rate.

Keywords: Coherent control, Duplicated two-level system, Superluminal light propagation

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

۱- مقدمه

همدوسی کوانتومی نقش مهمی در تعیین خواص اپتیکی سیستم ها دارند و از جمله کاربردهای آن در لیزرزایی بدون وارونی جمعیت [1]، شفافیت القایی الکترومغناطیسی [2]، دوپایایی نوری [3]، نور کند سرعت [4] و انتشار نور تند سرعت [5,6] است. در انتشار نور تند سرعت، سرعت گروه پالس نوری در یک محیط پاشنده می تواند از سرعت نور در خلاء فراتر برود و حتی منفی شود [7]. اخیراً سیستم دو ترازی دوگانه بخاطر خواص جالب، مورد مطالعه قرار گرفته است. رفتار دوپایایی و چند پایایی این سیستم مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که این سیستم به فاز نسبی میدان های اعمالی وابستگی دارد [8]. در حضور میدان دمشی غیر مستقیم، انتشار نور تند سرعت به همراه بهره در این سیستم ایجاد شده و رفتار دوپایایی سیستم بوسیله شدت میدان های همدوس و نا همدوس کنترل می شود.

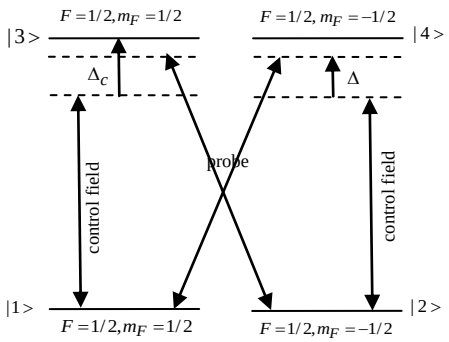
۲- مدل ها و معادلات

در شکل ۱، مدل اتمی دو ترازی دو گانه مورد مطالعه قرار گرفته است. گذارهای $|1\rangle-|3\rangle$ و $|2\rangle-|4\rangle$ به وسیله میدان کنترلی $\vec{E}_c$ با فرکانس رابی Ω_c تحریک شده اند و میدان کاوشگر ضعیف $\vec{E}_p$ با فرکانس رابی Ω_p به گذارهای $|1\rangle-|4\rangle$ و $|2\rangle-|3\rangle$ اعمال شده است.

معادلات ماتریس چگالی حرکت در تقریب موج چرخان به شکل زیر است:

$$
\begin{aligned}
&i\dot{\rho}_{11}=[(\Omega_c\rho_{13}+\Omega_p\rho_{14}e^{-i\Phi(t,\vec{r})})-cc]\\
&+i\Gamma(\rho_{33}+2\rho_{44})/3,\\
&i\dot{\rho}_{22}=[(-\Omega_c\rho_{24}+\Omega_p\rho_{23}e^{-i\Phi(t,\vec{r})})-cc]\\
&+i\Gamma(\rho_{44}+2\rho_{33})/3,\\
&i\dot{\rho}_{33}=[-(\Omega_c\rho_{13}+\Omega_p\rho_{23}e^{-i\Phi(t,\vec{r})})-cc]-i\Gamma\rho_{33},\\
&i\dot{\rho}_{31}=\Omega_c(\rho_{33}-\rho_{11})+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}(\rho_{34}-\rho_{21})\\
&+\bar{\Delta}_c^{*}\rho_{31},\\
&i\dot{\rho}_{42}=\Omega_c(\rho_{22}-\rho_{44})+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}(\rho_{43}-\rho_{12})\\
&+\bar{\Delta}_c^{*}\rho_{42},\\
&i\dot{\rho}_{12}=-(\Omega_c\rho_{14}+\Omega_c^{*}\rho_{32})+(\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}\rho_{13}\\
&-\Omega_p^{*}e^{i\Phi(t,\vec{r})}\rho_{42})-i\Gamma_{zg}\rho_{12},\\
&i\dot{\rho}_{34}=-(\Omega_c\rho_{14}+\Omega_c^{*}\rho_{32})+(-\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}\rho_{24}\\
&+\Omega_p^{*}e^{i\Phi(t,\vec{r})}\rho_{31})-i\Gamma_{ze}\rho_{34},\\
&i\dot{\rho}_{41}=\Omega_c(\rho_{21}+\rho_{43})+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}(\rho_{44}-\rho_{11})\\
&+\bar{\Delta}_c^{*}\rho_{41},\\
&i\dot{\rho}_{32}=-\Omega_c(\rho_{12}+\rho_{34})+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}(\rho_{33}-\rho_{22})\\
&+\bar{\Delta}_c^{*}\rho_{32},
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

که $\Phi(t,\vec{r})=\Delta t-(k_p\hat{e}_y-\vec{k}_c).\vec{r}+\phi$ $\bar{\Delta}_c=\Delta_c+i\Gamma_d$ و $\Delta=\omega_p-\omega_c$. Γ میزان واهلش جمعیت و Γ_{zg} و Γ_{ze} میزان واهلش مربوط به گذارهای $|1\rangle-|2\rangle$ و $|3\rangle-|4\rangle$ و ϕ فاز نسبی میدان های اعمالی می باشد.



شکل ۱: نمایی از سیستم دو ترازی دوگانه

به علت تقارن سیستم با اعمال تغییر متغیرهای زیر:

$$
\rho_p=\rho_{32}+\rho_{41},\rho_c=\rho_{31}-\rho_{42},n_g=\rho_{11}+\rho_{22}
$$

$$
n_e=\rho_{33}+\rho_{44},\rho_{zg}=\rho_{12}-\rho_{21},\rho_{ze}=\rho_{34}-\rho_{43}
\qquad (۲)
$$

می توان معادلات (۱) را به شکل ساده تری خلاصه کرد:

$$
\begin{aligned}
&i\dot{n}_g=(\Omega_c\rho_c^{*}+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}\rho_p^{*}-cc)+i\Gamma(1-n_g)-iRn_g,\\
&i\dot{\rho}_c=\Omega_c(n_e-n_g)+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}(\rho_{zg}+\rho_{ze})\\
&+\bar{\Delta}_c^{*}\rho_c-iR\rho_c,\\
&i\dot{\rho}_p=-\Omega_c(\rho_{zg}+\rho_{ze})+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}(n_e-n_g)\\
&+\bar{\Delta}_c^{*}\rho_p-iR\rho_p,\\
&i\dot{\rho}_{zg}=(-\Omega_c\rho_p^{*}+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}\rho_c^{*}+cc)-i\Gamma_{zg}\rho_{zg},\\
&i\dot{\rho}_{ze}=(-\Omega_c\rho_p^{*}+\Omega_p e^{-i\Phi(t,\vec{r})}\rho_c^{*}+cc)-i\Gamma_{ze}\rho_{ze}
\end{aligned}
\qquad (۳)
$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

که پارامتر R نشان دهنده میدان دمشی نا همدوس غیر مستقیم است که به گذارهای کاوشگر اعمال شده است.

پاسخ سیستم به میدان های کاوشگر با پذیرفتاری $\chi = \chi' + i\chi''$ مشخص می شود که قسمتهای حقیقی و موهومی مربوط به پاشندگی و جذب میدان کاوشگر است. سرعت گروه پالس نوری بوسیله شیب پاشندگی بدست می آید و ضریب گروه به شکل $n_g = \frac{c}{v_g}$ تعریف می شود که سرعت گروه v_g با رابطه زیر مشخص می شود:

$$v_g = \frac{c}{1+\frac{1}{2}\chi'(\omega_p)+\frac{\omega_p}{2}\frac{\partial\chi'(\omega_p)}{\partial\omega_p}} = \frac{c}{n_g} \qquad (۴)$$

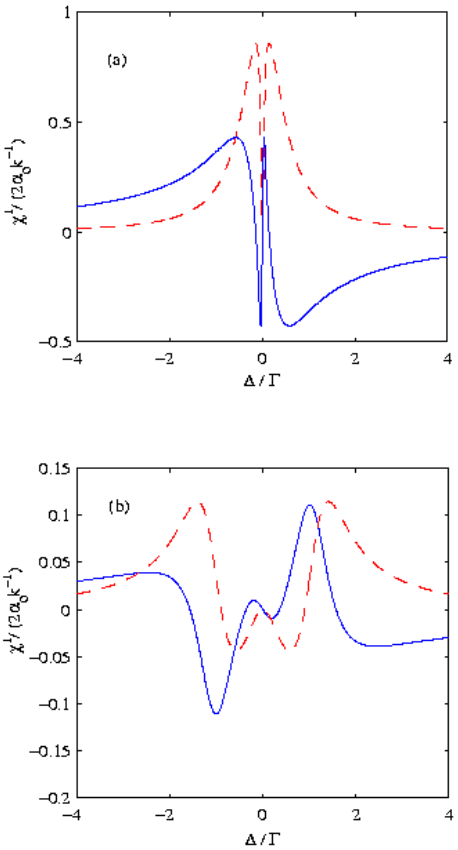
۳- حالت فراتر از تشدید چند فوتونی

تحت شرایط تشدید چند فوتونی $(\Delta = 0)$ ضرایب معادلات (۳) بستگی صریح زمانی ندارند و سیستم رفتار پایا از خود نشان می دهد. در حالت فراتر از تشدید چند فوتونی با استفاده از قضیه فلکوئت $(\Delta \neq 0)$ معادله وابسته به زمان ماتریس چگالی حل شده و سهم های مختلف در پاسخ محیط مشخص می شود. در این روش، عناصر ماتریس چگالی را می توان به شکل زیر بسط داد:

$$\rho_{ij} = \rho_{ij}^{(0)} + \sum_{m=1}(\rho_{ij}^{(m)}e^{-im\Phi(r,t)} + \rho_{ij}^{(-m)}e^{im\Phi(r,t)}) \qquad (۵)$$

که m عدد صحیح است و ماکزیمم آن مرتبه تقریب را مشخص می کند.

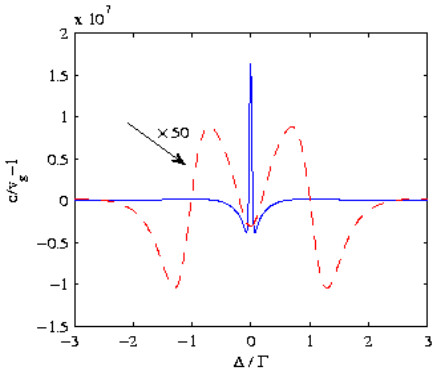
شکل۲، پاشندگی (منحنی توپر) و جذب (منحنی خط چین) میدان کاوشگر را در غیاب میدان نا همدوس بر حسب Δ/Γ نشان می دهد. در این شکل فقط سهم میدان کاوشگر $(\rho_p^{(1)})$ در پذیرفتاری در نظر گرفته شده است. همانطور که دیده می شود برای مقادیر کوچک Ω_c، شیب پاشندگی در $\Delta = 0$، مثبت بوده و دوگانگی جذب در سیستم وجود دارد. با افزایش این پارامتر، شیب پاشندگی از مثبت به منفی تبدیل شده که با انتشار نور تند سرعت همراه است. همچنین دوگانگی جذب به دوگانگی بهره تبدیل می شود.



شکل ۲: پاشندگی (منحنی توپر) و جذب (منحنی خط چین) بر حسب Δ/Γ برای پارامترهای $\Gamma = 1$ $\Gamma_d = 0.5\Gamma$ $\Delta_c = 0.0,$

$\Omega_c = 0.1\Gamma\,(a), 0.6\Gamma\,(b)$

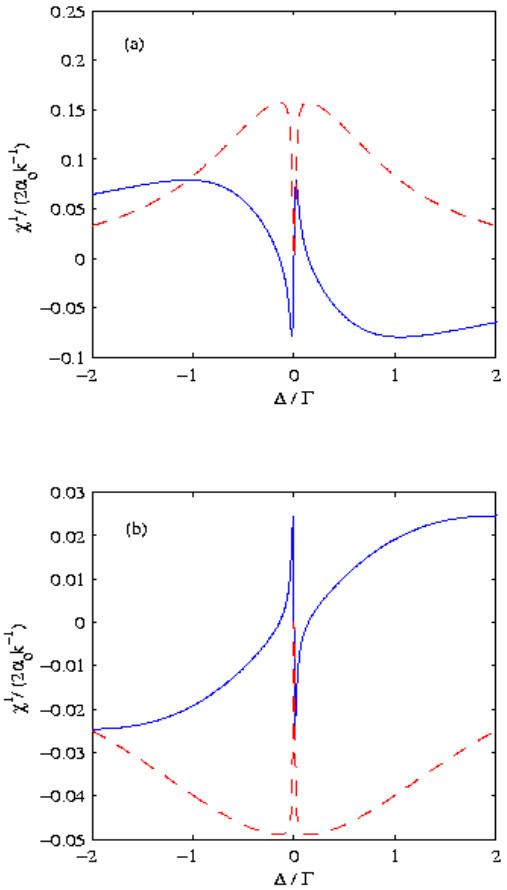
در شکل ۳ ضریب گروه بر حسب Δ/Γ رسم شده است. ضریب گروه برای $\Omega_c = 0.1\Gamma$ در اطراف $\Delta = 0$، مثبت بوده در حالیکه برای $\Omega_c = 0.6\Gamma$، منفی می باشد.



شکل ۳: ضریب گروه بر حسب Δ/Γ. منحنی توپر (نقطه چین) برای $\Omega_c = 0.1\Gamma(0.6\Gamma)$. بقیه پارامترها مانند شکل 2 است.

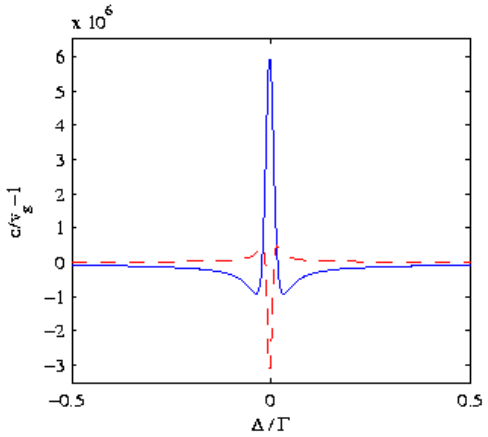
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

در شکل ۴ منحنی پاشندگی و جذب در حضور میدان ناهمدوس بررسی شده و همانطور که مشاهده می شود با افزایش میدان نا همدوس، شیب پاشندگی از مثبت به منفی تبدیل می شود.



شکل ۴: پاشندگی (منحنی توپر) و جذب (منحنی خط چین) بر حسب Δ/Γ برای پارامترهای: $R=0.5\Gamma\,(a),1.5\Gamma\,(b)$. بقیه پارامترها مانند شکل 2(a) است.

شکل ۵ ضریب گروه بر حسب Δ/Γ در حضور میدان ناهمدوس می باشد. واضح است که با افزایش میدان نا همدوس، نور کند سرعت به نور تند سرعت تبدیل می شود.



شکل ۵: ضریب گروه بر حسب Δ/Γ . منحنی توپر (نقطه چین) برای $R=0.5\Gamma\,(1.5\Gamma)$. بقیه پارامترها مانند شکل 2(a) است.

۴- نتیجه‌گیری

خواص اپتیکی سیستم دو ترازی دوگانه در حالت فراتر از تشدید چند فوتونی بررسی شده است و نشان داده شده است که شیب پاشندگی با شدت میدان های اعمالی کنترل می شود. با اعمال میدان دمشی نا همدوس به سیستم و با استفاده از تجزیه فلکوئت، شیب پاشندگی از مثبت (کند سرعت) به منفی (تند سرعت) تبدیل می شود.

مراجع

[1] Scully, Zhu and Gavrielides *Phys. Rev. Lett.* **62** 2813, 1989.

[2] Boller, Imamoglu and Harris *Phys. Rev. Lett.* **66** 2593, 1991; Harris Phys. Today **50** 36, 1997; Serapiglia, Paspalakis, Sirtori, Vodopyanov, and Phillips *Phys.Rev. Lett.* **84** 1019, 2000.

[3] Lugiato *Progress in Optics*, edited by E. Wolf, **21** (North-Holland, Amsterdam) p.71, 1984.

[4] Hau, Harris, Dutton, Behroozi *Nature* **397** 594, 1999.

[5] Wang, Kuzmich and Dogariu *Nature* **406** 277, 2000; Kuzmich, Dogariu, Wang, Milonni and Chaio *phys. Rev. Lett.* **86**3925, 2001.

[6] Mahmoudi M, Rabiei W, Safari L, Sahrai M, Laser Phys., **19** (2009) 1428

[7] Gauthier and Boyd *Photonics Spectra* **Jan.** 82, 2007.

[8] Wu, Lu, Zheng *J. Phys. B*: At. Mol. Opt. Phys., **43** 161003, 2010.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]