۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

روشی برای کنترل بهره، شفافیت و جذب القایی الکترومغناطیسی توسط تعداد فوتونهای جفتکننده و ضریب گسیل خودبخودی سیستم چهارترازهی دیاموند ابوالقاسم کاراندیش، سمیرا علیور و سیامک خادمی

دانشگاه زنجان- دانشکده علوم- گروه فیزیک

چکیده – در این مقاله سیستم اتمی چهارترازهی دیاموند که با چهار مد میدان کوانتومی برهمکنش دارد مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت خاص تعداد فوتونهای یکی از مدهای میدان برابر با صفر در نظر گرفته شده است و گسیل خودبخودی از بالاترین تراز به پایین ترین تراز را در سیستم در نظر گرفتهایم. الگوی منحنیهای جذب و پاشندگی خصوصیتهای جالبی مانند: شفافیت القایی الکترومغناطیسی، جذب القایی الکترومغناطیسی، بهره و جذب قوی و با پهنای باند تیز از اثراتی است در این سیستم مشاهده میشود. مشاهده می شود که این اثرات با تغییر تعداد فوتونهای مدهای نوسانی یا ضریب گسیل خودبخودی قابل کنترل هستند.

كليد واژه:سيستم چهارترازه، تمام كوانتومي، شفافيت القايي الكترومغناطيسي، دياموند، بهره، كنترل.

A scheme for the gain, EIT and AIT control by the number of coupling photons and decay rate of afour-level diamond system

Abolghasem Karandish¹, Samira Alipour² and Siamak Khademi³

Department of Physics, Science Faculty, University of Zanjan

1 - a.karandish@yahoo.com

2 - samira.alipoor@znu.ac.ir

3 -khademi@znu.ac.ir

Abstract- In this paper a four-level diamond configuration system interacting with four quantized electromagnetic mode is investigated. In a special case the number of one electromagnetic mode is set to be zero and an additional spontaneous emission between higher and lower levels are considered. Its absorption and dispersion spectrum profile of electromagnetic show some interesting phenomena, e.g.: electromagnetic induced transparency, electromagnetic induced absorption and a sharp band width of gain and absorption. It is shown that these phenomena are controllable by the number of coupling photons and the decay rate coefficient.

Keywords: Four-Level System, Full Quantum, Electromagnetically Induced Transparency, Diamond, Gain, Control.

۱– مقدمه

با اعمال میدانهای همدوس به یک دستگاه چند ترازی اثرات تداخل و همدوسی کوانتومی مشاهده میشود. این اثرات به پدیدههای جذابی مانند: تلهاندازی همدوس جمعیت، لیزرهای بدون وارونی، شفافیت القایی الکترومغناطیسی و ایجاد بهره در این دستگاههای اتمی، که در نظریهی اطلاعات کوانتومی کاربرد گستردهای دارند، منجر میشوند [۱-۳]. با تغییر در شدت، فاز و نامیزانی میدانهای جفت کننده، اثر محیط مادی (اتم) بر برخی رفتارهای میدان کاوشگر مانند: جذب، بهره، فرا نور و فرونور، دو پایایی و غیره قابل کنترل است.

 $|4,n_1-1,n_2,n_3-1,n_4\rangle \otimes |4,n_1,n_2-1,n_3,n_4-1\rangle$



شکل ۱: برهمکنش سیستم چهارترازهی دیاموند با چهار میدان کوانتومی

اثر شفافیت القایی الکترومغناطیسی، در سال ۱۹۸۹توسط هریس پیشبینی و دو سال بعد نیز توسط خودش بهصورت تجربی مورد تایید قرار گرفت[۵،۴]. اغلب ترازهای خاصی از عناصر قلیایی در ستون اول جدول مندلیف مانند عنصر روبیدیوم (و گاهی نیز سایر عناصر) را بهعنوان دستگاه چند ترازه اتمی برای ایجاد پدیدههای مذکور استفاده می کنند. ساخت لیزرهای طول موج کوتاه و بی نیاز به وارونی جمعیت با اتم روبیدیوم در محدودهی نور مرئی نمونهی آزمایشگاهی خوبی برای این ادعاست [۵–۹]. بسیاری از نویسندگان از رهیافت نیمه کلاسیکی برای توصیف این پدیدهها استفاده مىكنند[١٠و ١١] اما رهيافت تمام كوانتومى مىتواند اثرات متفاوتى مانند برهمکنش اتم با میدان خلا را نیز نشان دهد[۱۲].از رهیافت تمام کوانتومی برای اندازه گیری تعداد فوتون و میزان فشردگی حالتهای فوتونی درون یک کاواک کوانتومی استفاده شده است[۱۲]. در این مقاله منحنی های جذب و پاشندگی میدان کاوشگر با بسامد را برای دستگاه چهارترازه دیاموند (مطابق شکل ۱) که با سه v_4 میدان جفت کننده با بسامدهای v_2 , v_2 و v_3 برهمکنش دارد مورد بررسی قرار میدهیم. همچنین چگونگی کنترل میزان بهره میدان کاوشگر با تنظیم تعداد و نامیزانی فوتونهای جفت کننده در حضور (و همچنین در عدم حضور) ضریب گسیل خودبخودی γ_5 ، که در شکل ۱ نشان داده شده است، می پردازیم.

۲- مدل تمامکوانتومی دستگاه چهار ترازی دیاموند

دستگاه چهارترازی اتمی دیاموند در واقع یک حلقهی بسته است. این دستگاه یکی از متقارنترین دستگاههای اتمی چهارترازی مورد بررسی

بوده است[۱۱]. بعلت تعدد درجات آزادی قابل تنظیم و کنترل این دستگاه، مانند: نامیزانی و شدت میدانهای (تعداد فوتونهای) جفت کننده نسبت به دستگاه اتمی سهترازی، و همچنین نقش مهمی که تقارن دستگاه ایفا می کند، انتظار می ود علاوه بر اینکه ویژ گیهای فیزیکی جالب و بحث برانگیزی را از خود نشان دهد، قابلیت کنترل بیشتری نیز بر ویژ گیهای میدان کاوشگر داشته باشد.

$$H_{1} = -\hbar [g_{1} \left(\sigma_{12} a_{1}^{\dagger} e^{i\delta_{1}t} + \sigma_{21} a_{1} e^{-i\delta_{1}t} \right) - g_{2} \left(\sigma_{13} a_{2}^{\dagger} e^{i\delta_{2}t} + \sigma_{31} a_{2} e^{-i\delta_{2}t} \right) - g_{3} \left(\sigma_{24} a_{3}^{\dagger} e^{i\delta_{3}t} + \sigma_{42} a_{3} e^{-i\delta_{3}t} \right) - g_{4} \left(\sigma_{34} a_{4}^{\dagger} e^{i\delta_{4}t} + \sigma_{43} a_{4} e^{-i\delta_{4}t} \right)]$$
(1)

که در آن a_i, a_i^{\dagger}, a_i ها عملگرهای افزاینده و کاهندهی فوتون برای میدان i^{-1} م و $\langle i | | , g_i = e \langle i | | j \rangle$ است. با جایگذاری هامیلتونی(۱) در معادله ی فون-نیومن مامیلتونی(۱) در معادله ی فون-نیومن معادله های زیر برای عناصر ماتریس چگالی بدست میآید:

$$\dot{\tilde{\rho}}_{11}^{(1)} = i[g_1\sqrt{n_1}(\tilde{\rho}_{21}^{(1)} - \tilde{\rho}_{12}^{(1)}) + g_2\sqrt{n_2}(\tilde{\rho}_{31}^{(1)} - \tilde{\rho}_{13}^{(1)})] + \gamma_1\tilde{\rho}_{22}^{(1)} + \gamma_2\tilde{\rho}_{33}^{(1)} + \gamma_5\tilde{\rho}_{44}^{(1)}$$
(Y)

$$\dot{\tilde{\rho}}_{22}^{(1)} = i[g_1 \sqrt{n_1} (\tilde{\rho}_{12}^{(1)} - \tilde{\rho}_{21}^{(1)}) + g_3 \sqrt{n_3} (\tilde{\rho}_{42}^{(1)} - \tilde{\rho}_{24}^{(1)})] + \gamma_3 \tilde{\rho}_{44}^{(1)} - \gamma_1 \tilde{\rho}_{22}^{(1)} + \gamma_6 \tilde{\rho}_{33}^{(1)}$$
(Y)

$$\dot{\tilde{\rho}}_{33}^{(1)} = i[g_2\sqrt{n_2}(\tilde{\rho}_{13}^{(1)} - \tilde{\rho}_{31}^{(1)})] + \gamma_4\tilde{\rho}_{44}^{(1)} - (\gamma_2 + \gamma_6)\tilde{\rho}_{33}^{(1)}$$
(*)

$$\widetilde{\rho}_{44}^{(1)} = i[g_3 \sqrt{n_3} (\widetilde{\rho}_{24}^{(1)} - \widetilde{\rho}_{42}^{(1)})] - (\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5) \widetilde{\rho}_{44}^{(1)}$$

$$\dot{\widetilde{\rho}}_{12}^{(1)} = i[g_1 \sqrt{n_1} (\widetilde{\rho}_{22}^{(1)} - \widetilde{\rho}_{11}^{(1)}) + g_2 \sqrt{n_2} \widetilde{\rho}_{32}^{(1)} - g_3 \sqrt{n_3} \widetilde{\rho}_{14}^{(1)}]$$

$$(\Delta)$$

$$-\frac{1}{2}(2i\delta_{1}+\gamma_{1})\tilde{\rho}_{12}^{(1)}$$
(8)

$$\dot{\tilde{\rho}}_{42}^{(1)} = i[g_3\sqrt{n_3}(\tilde{\rho}_{22}^{(1)} - \tilde{\rho}_{44}^{(1)}) - g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{41}^{(1)}] + \frac{1}{2}[2i\delta_3 - (\gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5)]\tilde{\rho}_{42}^{(1)}$$
(Y)

$$\begin{split} \dot{\tilde{\rho}}_{32}^{(1)} &= i [g_2 \sqrt{n_2} \, \tilde{\rho}_{12}^{(1)} - g_1 \sqrt{n_1} \, \tilde{\rho}_{31}^{(1)} - g_3 \sqrt{n_3} \, \tilde{\rho}_{34}^{(1)}] \\ &- \frac{1}{2} [2i(\delta_1 - \delta_2) + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_6)] \tilde{\rho}_{32}^{(1)} \end{split} \tag{A}$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_{14}^{(1)} = i[g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{24}^{(1)} + g_2\sqrt{n_2}\tilde{\rho}_{34}^{(1)} - g_3\sqrt{n_3}\tilde{\rho}_{12}^{(1)}] \\ -\frac{1}{2}[2i(\delta_1 + \delta_3) + (\gamma_3 + \gamma_4 - \gamma_5)]\tilde{\rho}_{14}^{(1)}$$
(9)

$$\dot{\tilde{\rho}}_{13}^{(1)} = i[g_2\sqrt{n_2}(\tilde{\rho}_{33}^{(1)} - \tilde{\rho}_{11}^{(1)}) + g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{23}^{(1)}] -\frac{1}{2}[2i\delta_2 + (\gamma_2 + \gamma_6)]\tilde{\rho}_{13}^{(1)}$$
(1.)

که با حل همزمان آنها در شرایط ایستا و با استفاده از شرط تشدید جند فوتونی $\delta_1 + \delta_3 = \delta_2 + \delta_4$ نمودارهای جذب و پاشندگی به دست میآیند.در همهی نمودارهایی که در ادامه میآیند $g_2 = 0.2493$ $g_3 = 0.25$ $g_4 = 0.19$ $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$ ف ابتدا با حذف $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 1$ و $\gamma_6 = 0, g_1 = 0.1$ فوتون های n₁، جذب و پاشندگی میدان کاوشگر را بررسی میکنیم. در شکل ۲منحنی جذب و پاشندگی برای هر چهار مد میدان $\gamma_5 = 0$ براى كوانتومى الكترومغناطيسي :۲ رسم شده است. در شکل *n*₁ = 0, *n*₂ = 100, *n*₃ = 1, *n*₄ = 1 0.4 شكل ٢ (ألف) 0.2 € 0.0 −0.2 -0.4 -10-5 0 5 10 0.4 شکل ۳ (پ) 0.2 P43 0.0 -0.2-0.4 -10 -5 10 0 5 $n_2 = 100$ $n_3 = 1$ $\gamma_5 = 4$ شکل ۳ (ث) 0.4 0.2 F 0.0 -0.2 -0.4 -10-5 0 5 10 $\gamma_5 = 0$ $n_2 = 100$ $n_3 = 35$ 2 شکل ۳ (چ) 1 **B** 0 -1-2[[]... 10 -5 0 5 $\gamma_5 = 4$, $n_2 = 100$, $n_3 = 35$



شكل ٢ (ب)





شکل ۳:جذب (آبی-پیوسته) و پاشندگی (قرمز-خطچین) برای هر چهار میدان. در این حالت تعداد فوتون های هر میدان برابر با n₁ = 0,n₄ = 1 در نظر گرفته شده است.

در سایر حالتها رفتار جذب و پاشندگی میدانهای 2 و 8 تغییر قابل ملاحظه ی ندارد. در شکل ۳ جذب و پاشندگی این دو میدان برای مقادیر مختلف گسیل خودبخودی γ_5 تعداد فوتونهای مد میدان V_1 برسی شده است.

در یک سیستم اتمی بسته با تغییر هر پارامتر موثر در برهمکنش میدان ها و سیستم اتمی، در واقع موقعیت الکترونهای موجود در ترازها را تغییر داده که حضور یا عدم حضور الکترون ها بر جذب یا بهره میدان عبوری از آن تراز موثر است.

به طور مثال با مقایسه منحنیهای (۳الف) و (۳ب)که در آن $0 = _{7}\gamma$ است با (۳پ) و (۳ت)که در آن $4 = _{7}\gamma$ است، مشاهده میشود که در (۳الف) یک جفت قله جذب بوجود آمده که با افزایش 7γ بتدریج به شفافیت القایی الکترومغناطیسی و سپس در (۳پ) به ایجاد بهره و افزایش پاشندگی در نامیزانی صفرمنجر میشود. درواقع در $0 = _{7}\gamma$ الکترون های تراز ۳ بسیار بیشتر از نیست، اما با افزایش 7γ از آنجاییکه جمعیت تراز بالا کاهش پیدا نیست، اما با افزایش 7γ از آنجاییکه جمعیت تراز بالا کاهش پیدا می کند، می توان شرایطی را یافت که در آن جمعیت تراز ۴ از مشاهده می شود. برای مد میدان 1γ نیز در (۳ب) شفافیت تقریبی به یک شفافیت کامل در (۳ت) تبدیل می شود. بنابراین با اعمال تغییرات در گسیل خودبخودی شفافیت القایی الکترومغناطیسی و بهره این میدانها کنترل می شود.

نیز مشاهده میشود که در (۳ث) و (۳ج) شفافیت تقریبی نیز با اقزایش تعداد فوتونهای میدان مد V_3 از بین میرود. بنابراین وقتی گسیل خودبخودی $0 = 5^{\gamma}$ است و n_8 های بسیار کم شفافیت برای میدان کاوشگر بوجود میآید. همچنین در شکلهای (۳چ) و (۳ح) دیده میشود که وقتی گسیل خودبخودی $4 = 5^{\gamma}$ است افزایش تعداد فوتونهای میدان مد V_4 به $55 = n_8$ در مد میدان کاوشگر V_4 بهره به همراه پاشندگی قوی و میدان جفت میدان کاوشگر الابهره به همراه پاشندگی قوی و میدان جفت بوجود میآورد. نکته قابل توجه اینکه بهره و شفافیت بدست آمده پهنای طیفی بسیار باریک و تیز دارند که در بسیاری از کاربردهای پاشندگی به 5^{γ} در شکلهای (۳خ) و (۳د) دیدیم با تغییر 5^{γ} به پاشندگی به 5^{γ} در شکلهای (۳خ) و (۳د) دیدیم با تغییر 5^{γ} به تیز و نیز شفافیت مد میدان V_4 به جذب تبدیل میشود. پس

شفافیت، جذب و بهره میدان الکترومغناطیسی توسط مقدار ضریب گسیل خودبخودی کنترل میشود.

۳- نتیجهگیری

در این مقاله نمودارهای جذب و پاشندگی برای هر چهار میدان الکترومغناطیسی که با اتم چهارترازه دیاموند برهمکنش دارند بدست آمد. علاوه بر حساسیت جذب و پاشندگی به تعداد فوتونهای مد میدانهای جفتکننده که 0 = nباشد، مشاهدهشد که شفافیت، جذب، بهره و پاشندگی میدان کاوشگر 4Vو میدان جفت کننده 1/جذب، بهره و پاشندگی میدان کاوشگر 4Vو میدان جفت کننده 1 با تعداد فوتونهای میدان n_3 و ضریب گسیل 5/ کنترل میشود. در حالتهای خاصی جذب و بهره بسیار قوی و همچنین جذب و شفافیت با طیف تیز بدست میآید که کاربردهای مهمی در اپتیک کوانتومی دارد.

مراجع

- Mitra, S., Hossain, M.M., Ray, B., Ghosh, P.N., Cartaleva, S., Slavov, D., On line shape of electromagnetically induced transparency in a multilevel system, Optics Communications, 2010, 283, 7, 1500–1509. 2.5.
- [2] Shen, Ji., Ruan, Zh., He, S., Influence of the signal light on the transient optical properties of a four-level EIT medium, Physics Letters A, 2004, 330, 6, 487–495. 7.
- [3] Li, H., Huang G., Two-component spatial optical solitons in a four-state ladder system via electromagnetically induced transparency, 2008, 372, 22, 4127-4134. 2.9.
- [4] S.Menon, G. S. Agarwal, Phys. Rev.A 61,013807.
- [5] S. E. Harris, "Lasers Without Inversion: Interference of lifetime-broadened resonances", Phys. Rev.Lett. 62, 1033-1036, 1989.
- [6] K. J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, "Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency", Phys. Rev. Lett. 64, 1107-1110, 1991.
- [7] C. Gerry and P. Knight, *Introductory Quantum Optics*, (Cambridge 2005).
- [8] Scully, M.O., Zubairy M.S., *Quantum optics*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1997.
- [9] M. O. Scully, S.-Y. Zhu, A. Gavrieliedes, "Degenerate quantum-beat laser: Lasing without inversion and inversion without lasing", Phys. Rev. Lett., 62, 2813, 1989.
- [10] G. G. Padmabandu, G. R. Welch, I. N. Shubin, E. S. Fry, D. E. Nikonov, M. D. Lukin, M. O. Scully, "Laser oscillatio n without population inversion in a sodium atomic beam", Phys. Rev. Lett., 76, 2053. 1996.
- [11] B. Q. Ou, L. M. Liang, C. Z. Li, Quantum coherence effects in a four-level diamond-shape atomic system, Optics Communications 282 (2009) 2870–2877.
- [12] G.Naeimi, S.Khademi, and O.Heibati, "A Method for the Measurement of Photons Number and Squeezing Parameter in a Quantum Cavity," **ISRN Optics**, vol. 2013, Article ID 271951, 9 pages, (2013). doi:10.1155/2013/271951.