

## روشی برای کنترل بهره، شفافیت و جذب القایی الکترومغناطیسی توسط تعداد فوتون‌های جفت‌کننده و ضریب گسیل خودبخودی سیستم چهارترازی دیاموند

ابوالقاسم کاراندیش<sup>۱</sup>، سمیرا علیپور و سیامک خادمی

دانشگاه زنجان - دانشکده علوم - گروه فیزیک

چکیده - در این مقاله سیستم اتمی چهارترازی 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 پایین‌ترین 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 می‌شود که این اثرات با تغییر تعداد فوتون‌های مدهای نوسانی یا ضریب گسیل خودبخودی قابل کنترل هستند.

کلیدواژه: سیستم چهارترازه، تمام کوانتومی، شفافیت القایی الکترومغناطیسی، دیاموند، بهره، کنترل.

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

Abolghasem Karandish<sup>1</sup>, Samira Alipour<sup>2</sup> and Siamak Khademi<sup>3</sup>

Department of Physics, Science Faculty, University of Zanjan

1 - a.karandish@yahoo.com

2 - samira.alipour@znu.ac.ir

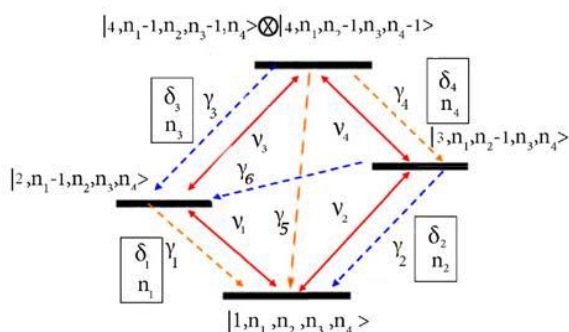
3 - khademi@znu.ac.ir

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 تداخلی 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 [۳-۱]. 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.



شکل ۱: برهم کنش سیستم چهارترازی دیاموند با چهار میدان کوانتومی

اثر شفافیت القایی الکترومغناطیسی، در سال ۱۹۸۹ توسط هریس پیش‌بینی و دو سال بعد نیز توسط خودش به صورت 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 به عنوان دستگاه چند تراز اتمی برای ایجاد پدیده‌های مذکور استفاده می‌کنند. 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 نیمه‌کلاسیکی برای توصیف این پدیده‌ها استفاده می‌کنند [۱۰ و ۱۱] اما رهیافت تمام کوانتومی می‌تواند اثرات متفاوتی مانند برهمکنش اتم با میدان خلا را نیز نشان دهد [۱۲]. از رهیافت تمام کوانتومی برای اندازه‌گیری تعداد فوتون و میزان فشردگی حالت‌های فوتونی درون یک کاواک کوانتومی استفاده شده است [۱۲]. در این مقاله منحنی‌های جذب و پاشندگی میدان کاوشگر با بسامد  $\nu_4$  را برای دستگاه چهارترازی دیاموند (مطابق شکل ۱) که با سه میدان جفت کننده با بسامدهای  $\nu_1$ ،  $\nu_2$  و  $\nu_3$  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  $\gamma_5$ ، که در شکل ۱ نشان داده شده است، می‌پردازیم.

## ۲- مدل تمام کوانتومی دستگاه چهار تراز

### دیاموند

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

بوده است [۱۱]. بعلاوه تعدد درجات آزادی قابل تنظیم و کنترل این دستگاه، مانند: نامیزانی و شدت میدان‌های (تعداد فوتون‌های) جفت کننده نسبت به دستگاه اتمی سه تراز، و همچنین نقش مهمی که تقارن دستگاه ایفا می‌کند، انتظار می‌رود علاوه بر اینکه ویژگی‌های فیزیکی جالب و بحث برانگیزی را از خود نشان دهد، قابلیت کنترل بیشتری نیز بر ویژگی‌های میدان کاوشگر داشته باشد. دستگاه چهار تراز دیاموند در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن  $n_1, n_2, n_3, n_4$  به ترتیب از چپ، تعداد فوتون‌های سه میدان جفت کننده و کاوشگر است. ضرایب گسیل خودبخودی  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$  به ترتیب مربوط به گذار ترازهای  $|2\rangle \rightarrow |1\rangle, |3\rangle \rightarrow |1\rangle, |4\rangle \rightarrow |1\rangle, |4\rangle \rightarrow |3\rangle, |4\rangle \rightarrow |2\rangle$  هستند.

همچنین  $\delta_i = \nu_i - \omega_{ij}$  نامیزانی بسامد میدان با اختلاف انرژی دو تراز متناظر است.  $\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j$ . نکته‌ی مهم این است که برای گذار از تراز سه به چهار دو مسیر راستگرد یا چپگرد وجود دارد و حالت نهایی ویژه حالت چهار برهم‌نهی از ویژه حالت‌های بدست آمده ناشی از گذار از این دو مسیر متفاوت است. در این حالت گذارهای ناشی از این دو مسیر با هم تداخل می‌کنند. هامیلتونی اندرکنش این دستگاه در تصویر اندرکنش به صورت زیر است:

$$H_1 = -\hbar \left[ g_1 \left( \sigma_{12} a_1^\dagger e^{i\delta_1 t} + \sigma_{21} a_1 e^{-i\delta_1 t} \right) - g_2 \left( \sigma_{13} a_2^\dagger e^{i\delta_2 t} + \sigma_{31} a_2 e^{-i\delta_2 t} \right) - g_3 \left( \sigma_{24} a_3^\dagger e^{i\delta_3 t} + \sigma_{42} a_3 e^{-i\delta_3 t} \right) - g_4 \left( \sigma_{34} a_4^\dagger e^{i\delta_4 t} + \sigma_{43} a_4 e^{-i\delta_4 t} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن  $a_i, a_i^\dagger$  ها عملگرهای افزایشنده و کاهنده‌ی فوتون برای میدان  $i$ -ام و  $g_i = e\langle i || j \rangle$ ،  $\sigma_{ij} = |i\rangle\langle j|$  است. با جایگذاری هامیلتونی (۱) در معادله‌ی فون-نیومن ماتریس چگالی بدست می‌آید:

$$\dot{\tilde{\rho}}_{11}^{(1)} = i[g_1\sqrt{n_1}(\tilde{\rho}_{21}^{(1)} - \tilde{\rho}_{12}^{(1)}) + g_2\sqrt{n_2}(\tilde{\rho}_{31}^{(1)} - \tilde{\rho}_{13}^{(1)}) + \gamma_1\tilde{\rho}_{22}^{(1)} + \gamma_2\tilde{\rho}_{33}^{(1)} + \gamma_5\tilde{\rho}_{44}^{(1)}] \quad (2)$$

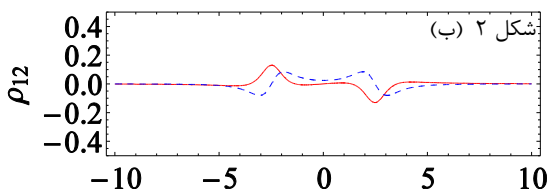
$$\dot{\tilde{\rho}}_{22}^{(1)} = i[g_1\sqrt{n_1}(\tilde{\rho}_{12}^{(1)} - \tilde{\rho}_{21}^{(1)}) + g_3\sqrt{n_3}(\tilde{\rho}_{42}^{(1)} - \tilde{\rho}_{24}^{(1)}) + \gamma_3\tilde{\rho}_{44}^{(1)} - \gamma_1\tilde{\rho}_{22}^{(1)} + \gamma_6\tilde{\rho}_{33}^{(1)}] \quad (3)$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_{33}^{(1)} = i[g_2\sqrt{n_2}(\tilde{\rho}_{13}^{(1)} - \tilde{\rho}_{31}^{(1)}) + \gamma_4\tilde{\rho}_{44}^{(1)} - (\gamma_2 + \gamma_6)\tilde{\rho}_{33}^{(1)}] \quad (4)$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_{44}^{(1)} = i[g_3\sqrt{n_3}(\tilde{\rho}_{24}^{(1)} - \tilde{\rho}_{42}^{(1)})] - (\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5)\tilde{\rho}_{44}^{(1)} \quad (5)$$

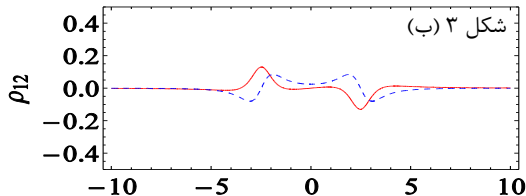
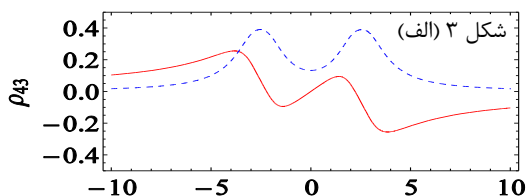
$$\dot{\tilde{\rho}}_{12}^{(1)} = i[g_1\sqrt{n_1}(\tilde{\rho}_{22}^{(1)} - \tilde{\rho}_{11}^{(1)}) + g_2\sqrt{n_2}\tilde{\rho}_{32}^{(1)} - g_3\sqrt{n_3}\tilde{\rho}_{14}^{(1)} - \frac{1}{2}(2i\delta_1 + \gamma_1)\tilde{\rho}_{12}^{(1)}] \quad (6)$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_{42}^{(1)} = i[g_3\sqrt{n_3}(\tilde{\rho}_{22}^{(1)} - \tilde{\rho}_{44}^{(1)}) - g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{41}^{(1)} + \frac{1}{2}[2i\delta_3 - (\gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5)]\tilde{\rho}_{42}^{(1)}] \quad (7)$$

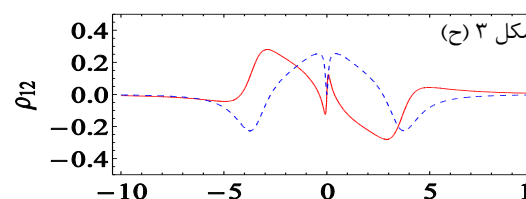
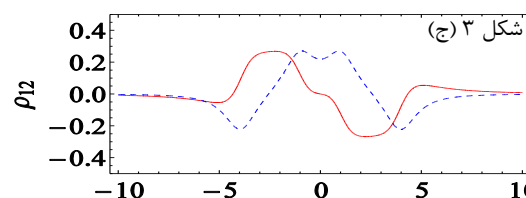
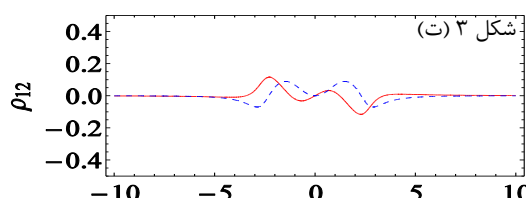


شکل ۲: جذب (آبی-پیوسته) و پاشندگی (قرمز-خطچین) میدان کاوشگر (ب و پ) و (ت) میدان‌های جفت کننده برای  $\gamma_5 = 0, n_1 = 0, n_2 = 100, n_3 = 1, n_4 = 1$

۲-الف) برای میدان کاوشگر مد  $V_4$ ، قله جذب دوگانه و شفافیت القایی الکترومغناطیسی نسبی و در مد میدان الکترومغناطیسی  $V_1$  که هیچ میدان تابشی اعمال نشده پاشندگی، جذب و حتی بهره دیده می‌شود. علت این اثر را در مسیر بسته حلقه گذارهایی در اتم چهار ترازه دیاموند می‌توان یافت که توسط میدان‌های دیگر تحریک شده است. بنابراین در حین برهمکنش تعدادی فوتون از نوع  $n_1$  ایجاد و جذب می‌شوند.



در دو مورد الف و ب شکل ۳:  $\gamma_5 = 0, n_2 = 100, n_3 = 1$



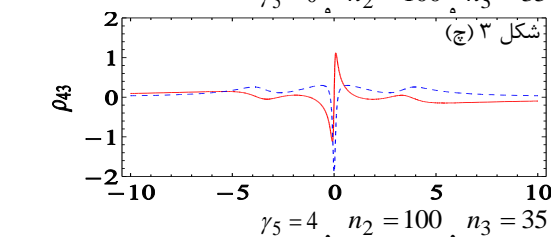
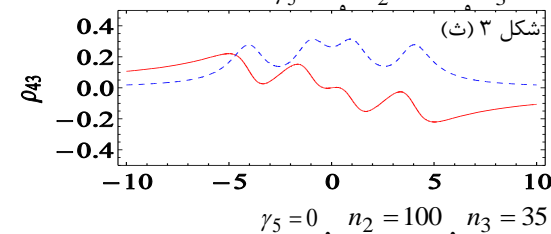
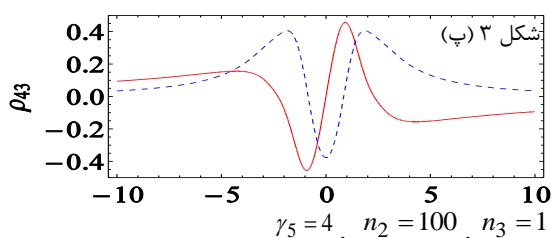
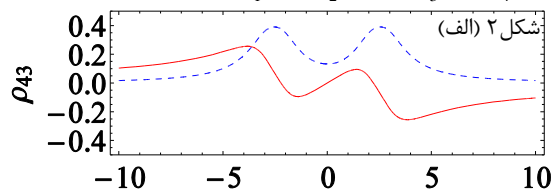
$$\dot{\tilde{\rho}}_{32}^{(1)} = i[g_2\sqrt{n_2}\tilde{\rho}_{12}^{(1)} - g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{31}^{(1)} - g_3\sqrt{n_3}\tilde{\rho}_{34}^{(1)}] - \frac{1}{2}[2i(\delta_1 - \delta_2) + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_6)]\tilde{\rho}_{32}^{(1)} \quad (8)$$

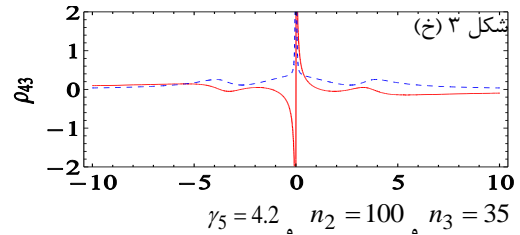
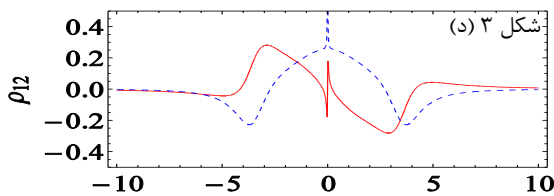
$$\dot{\tilde{\rho}}_{14}^{(1)} = i[g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{24}^{(1)} + g_2\sqrt{n_2}\tilde{\rho}_{34}^{(1)} - g_3\sqrt{n_3}\tilde{\rho}_{12}^{(1)}] - \frac{1}{2}[2i(\delta_1 + \delta_3) + (\gamma_3 + \gamma_4 - \gamma_5)]\tilde{\rho}_{14}^{(1)} \quad (9)$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_{13}^{(1)} = i[g_2\sqrt{n_2}(\tilde{\rho}_{33}^{(1)} - \tilde{\rho}_{11}^{(1)}) + g_1\sqrt{n_1}\tilde{\rho}_{23}^{(1)}] - \frac{1}{2}[2i\delta_2 + (\gamma_2 + \gamma_6)]\tilde{\rho}_{13}^{(1)} \quad (10)$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_{43}^{(1)} = i[\sqrt{n_4} - g_2\sqrt{n_2}\tilde{\rho}_{41}^{(1)} + g_3\sqrt{n_3}\tilde{\rho}_{23}^{(1)}] + \frac{1}{2}[2i\delta_4 - (\gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6)]\tilde{\rho}_{43}^{(1)} \quad (11)$$

که با حل همزمان آنها در شرایط ایستا و با استفاده از شرط تشدید چند فوتونی  $\delta_1 + \delta_3 = \delta_2 + \delta_4$  نمودارهای جذب و پاشندگی به دست می‌آیند. در همه‌ی نمودارهایی که در ادامه می‌آیند  $g_2 = 0.2493, g_3 = 0.25, g_4 = 0.19, \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 1, \gamma_6 = 0, g_1 = 0.1$  است. ابتدا با حذف فوتون‌های  $n_1$ ، جذب و پاشندگی میدان کاوشگر را بررسی می‌کنیم. در شکل ۲ منحنی جذب و پاشندگی برای هر چهار مد میدان الکترومغناطیسی کوانتومی برای  $\gamma_5 = 0$  و  $n_1 = 0, n_2 = 100, n_3 = 1, n_4 = 1$  رسم شده است. در شکل ۲:





شکل ۳: جذب (آبی-پیوسته) و پاشندگی (قرمز-خطچین) برای هر چهار میدان. در این حالت تعداد فوتون های هر میدان برابر با  $n_1=0, n_4=1$  در نظر گرفته شده است.

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

### ۳- نتیجه گیری

در این مقاله نمودارهای جذب و پاشندگی برای هر چهار میدان الکترومغناطیسی که با اتم چهارترازه دایموند برهمکنش دارند بدست آمد. علاوه بر حساسیت جذب و پاشندگی به تعداد فوتون های مد میدان های جفت کننده که  $n_1=0$  باشد، مشاهده شد که شفافیت، جذب، بهره و پاشندگی میدان کاوشگر  $V_4$  و میدان جفت کننده  $V_1$  با تعداد فوتون های میدان  $n_3$  و ضریب گسیل  $\gamma_5$  کنترل می شود. در حالت های خاصی جذب و بهره بسیار قوی و همچنین جذب و شفافیت با طیف تیز بدست می آید که کاربردهای مهمی در اپتیک کوانتومی دارد.

### مراجع

- [1] 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. Gavrielides, "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 oscillation 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.

در سایر حالت ها رفتار جذب و پاشندگی میدان های  $V_3$  و  $V_2$  تغییر قابل ملاحظه ای ندارد. در شکل ۳ جذب و پاشندگی این دو میدان برای مقادیر مختلف گسیل خودبخودی  $\gamma_5$  و تعداد فوتون های مد میدان  $V_3$  بررسی شده است.

در یک سیستم اتمی بسته با تغییر هر پارامتر موثر در برهمکنش میدان ها و سیستم اتمی، در واقع موقعیت الکترون های 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 منحنی های (الف) و (ب) که در آن  $\gamma_5=0$  است با (پ) و (ت) که در آن  $\gamma_5=4$  است، مشاهده می شود که در (الف) یک جفت قله جذب بوجود آمده که با افزایش  $\gamma_5$  بتدریج به شفافیت القایی الکترومغناطیسی و سپس در (پ) به ایجاد بهره و افزایش پاشندگی در نامیزانی صفرمنجر می شود. در واقع در  $\gamma_5=0$  الکترون های تراز ۳ بسیار بیشتر از تراز ۴ است و امکان ایجاد بهره برای میدان عبوری از این دو تراز نیست، اما با افزایش  $\gamma_5$  از آنجاییکه جمعیت تراز بالا کاهش پیدا می کند، می توان شرایطی را یافت که در آن جمعیت تراز ۴ از جمعیت تراز ۳ بیشتر است، لذا برای میدان کاوشگر  $V_4$  بهره مشاهده می شود. برای مد میدان  $V_1$  نیز در (ب) شفافیت تقریبی به یک شفافیت کامل در (ت) تبدیل می شود. بنابراین با اعمال تغییرات در گسیل خودبخودی شفافیت القایی الکترومغناطیسی و بهره این میدان ها کنترل می شود.

نیز مشاهده می شود که در (ت) و (ج) شفافیت تقریبی نیز با افزایش تعداد فوتون های میدان مد  $V_3$  از بین می رود. بنابراین وقتی گسیل خودبخودی  $\gamma_5=0$  است و  $n_3$  های بسیار کم شفافیت برای میدان کاوشگر بوجود می آید. همچنین در شکل های (چ) و (ح) دیده می شود که وقتی گسیل خودبخودی  $\gamma_5=4$  است افزایش تعداد فوتون های میدان مد  $V_3$  به  $n_3=35$  در مد میدان کاوشگر  $V_4$  بهره به همراه پاشندگی قوی و میدان جفت کننده  $V_1$  شفافیت القایی الکترومغناطیسی را در نامیزانی صفر بوجود می آورد. نکته قابل توجه اینکه بهره و شفافیت بدست آمده پهنای طیفی بسیار باریک و تیز دارند که در بسیاری از کاربردهای عملی بسیار مفیدند. علاوه بر حساسیت منحنی های جذب و پاشندگی به  $\gamma_5$  در شکل های (خ) و (د) دیدیم با تغییر  $\gamma_5$  به  $\gamma_5=4.2$  برای میدان کاوشگر، بهره قوی و تیز به جذب قوی و تیز و نیز شفافیت مد میدان  $V_1$  به جذب تبدیل می شود. پس