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 لیزرزایی بدون جمعیت معکوس توسط میدان مغناطیسی خارجی

رقیه کریمی، سعید باطبی و حمید رحیم پور سلیمانی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت

چکیده –در این مقاله اثر میدان مغناطیسی خارجی و میدان پمپ ناهمدوس بر روی سیستم سه ترازی لاندا که دارای دو تراز پایه دژنره است بررسی می شود دو میدان با جهت پلاریزاسیون عمود بر هم به طور مجزا با دو گذار از این سیستم اندرکنش می کنند. با حل عددی معادلات ماتریس چگالی مشخص شد که با روشن و خاموش کردن میدان مغناطیسی می توان خصوصیات نوری سیستم از جمله جذب، پاشندگی و لیزرزایی را کنترل کرد. این سیستم در طراحی تجهیزات سوئیچ زنی می تواند کاربرد داشته باشد . همینطور با حل معادلات در حالت گذرا رفتار وابسته به زمان منحنی جذب در حضور میدان مغناطیسی و پمپ ناهمدوس بررسی شد.

کلید واژه- اثرزیمن، پاشندگی ،شفافیت القایی الکترومغناطیسی، لیزرزایی بدون جمعیت معکوس، جذب نوری

Controlling the lasing without inversion via external magnetic field

Roghayeh Karimi, Saeid Batebi, Hamid Rahimpour soleimani.

Department of Physics, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht, P. O. Box. 41335-1914 Iran

Abstract- this paper studied the magnetic field effect on optical properties in a closed lambda-type three level atomic system. Two circularly polarized components are interacted separately by two transitions of this medium. By numerically solving the density matrix equations for this system, it is demonstrated that the optical properties of system, such as absorption, dispersion and lasing, can be controlled via switching on and off an external magnetic field. The proposed scheme may have applications in the design of magneto-optic switching devices. Also the time dependent behavior of the absorption curve in the presence of magnetic field and incoherent pumping field investigated.

Keywords: Zeeman effect, dispersion, electromagnetically induced transparency, lasing without inversion, optical absorption

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

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

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر مطالعه پدیده های همدوسی اتمی و تداخل کوانتومی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. کشف پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی توسط هریس و همکارانش [۱] منجر به پدیده های جالب بسیاری از جمله لیزر زایی بدون جمعیت معکوس [۲]، ارتقاء ضریب شکست[۳]، دوپایایی و چند پایایی نوری[۴-۶]، سرعت گروه های بسیار پائین[۷] و بسیار بالا[۸] و ... [۹و۱۰]شد. در محیط EIT میدان لیزری همدوس قوی طوری با میدان ضعیف تداخل می کند که باعث شفاف شدن محیط می شود و میدان کاوش ضعیف بدون اینکه جذب شود از محیط غیر خطی عبور می کند. لیزر زایی بدون جمعیت معکوس به خاطر کاربردهای بسیاری که در تولید پالس های لیزری بسیار کوتاه مانند پرتوهای ایکس وگاما دارد، به یک موضوع تحقیقاتی مهم در اپتیک کوانتومی تبدیل شده است. لیزرزایی بدون جمعیت معکوس و وابستگی بهره به پارامترهای مختلف سیستم به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. از نقطه نظر تجربی پدیده لیزر زایی بدون جمعیت معکوس در حوزه فرکانسی که لیزرزایی به وسیله جمعیت معکوس دشوار است از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در این مقاله اثر میدان مغناطیسی خارجی بر رفتار جذب و پاشندگی سیستم سه ترازی لاندا، در حالت ایستا و گذرا در حضور میدان ناهمدوس به صورت تئوری بررسی می شود. در ادامه ابتدا سیستم و معادلات حاکم بر سیستم معرفی می شود. سپس نتایج شبیه سازی در بخش سوم بیان می شود.

۲- مدل و معادلات حاکم

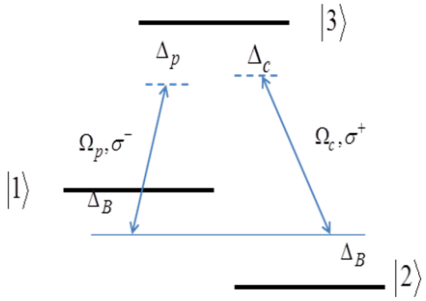
یک سیستم اتمی سه ترازی لاندا مانند شکل ۱ در نظر می گیریم. دو تراز پایین $|1\rangle$ و $|2\rangle$ زیر تراز زیمن تبهگن با اعداد کوانتومی مغناطیسی $m=1$ و $m=-1$ هستند که با اعمال میدان مغناطیسی این تبهگنی از بین می رود، به طوریکه میدان مغناطیسی B ترازهای $m_s=\pm1$ به اندازه $\pm\Delta_B$ جابه جا می کند. یک میدان لیزری پروب ضعیف E_p با مولفه پلاریزه چپ گرد σ^-، فرکانس ω_p و فرکانس رابی $\Omega_p=\frac{\mu_{31}E_p}{2\hbar}$ به گذار بین $|1\rangle\leftrightarrow|3\rangle$ و یک میدان لیزری کنترلی E_c با مولفه پلاریزه راست گرد σ^+، فرکانس ω_c و فرکانس رابی $\Omega_c=\frac{\mu_{32}E_c}{2\hbar}$ به گذار بین $|2\rangle\leftrightarrow|3\rangle$ اعمال می شود، که μ_{ij} ممنتوم دوقطبی برای گذار اتمی بین ترازهای $|i\rangle$ و $|j\rangle$ را نشان می دهد. شیفت زیمن ترازهای $|1\rangle$ و $|2\rangle$ به وسیله رابطه $\hbar\Delta_B=\mu_B m_s g_s B$ بیان می شود که μ_B مگنتون بور، g_s فاکتور لانده و $m_s=\pm1$ عدد کوانتومی مغناطیسی زیر ترازها می باشد. فرض می شود $\sum_{i=1}^{3}\rho_{ii}=1$ و $\rho_{ij}^*=\rho_{ji}$. رفتار دینامیکی سیستم به وسیله معادلات حرکت ماتریس چگالی توصیف می شود:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=-\frac{i}{\hbar}\left[H_{\text{int}},\rho\right]+L_\rho. \qquad (1)$$

که H هامیلتونین اندرکنشی و L_ρ سهم واهلش در سیستم است. معادلات ماتریس چگالی تحت تقریب موج چرخان و تقریب دو قطبی به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned}
\dot{\rho}_{11}&=i\Omega_p(\rho_{31}-\rho_{13})+2\gamma_1\rho_{33}-2\Lambda\rho_{11},\\
\dot{\rho}_{22}&=i\Omega_c(\rho_{32}-\rho_{23})+2\gamma_2\rho_{33},\\
\dot{\rho}_{33}&=i\Omega_p(\rho_{13}-\rho_{31})+i\Omega_c(\rho_{23}-\rho_{32})\\
&\quad-2(\gamma_1+\gamma_2)\rho_{33}+2\Lambda\rho_{11},\\
\dot{\rho}_{12}&=-i(\Delta_c-\Delta_p+2\Delta_B)\rho_{12}+i\Omega_p\rho_{32}-i\Omega_c\rho_{13}\\
\dot{\rho}_{13}&=i\Omega_p(\rho_{33}-\rho_{11})-i\Omega_c\rho_{12}+i(\Delta_p-\Delta_B)\rho_{13}\\
&\quad-\gamma_1\rho_{13}-\Lambda\rho_{13},\\
\dot{\rho}_{23}&=i\Omega_c(\rho_{33}-\rho_{22})-i\Omega_p\rho_{21}+i(\Delta_c+\Delta_B)\rho_{23}\\
&\quad-\gamma_2\rho_{23}-\Lambda\rho_{23}, \qquad (2)
\end{aligned}$$

نرخ واهلش از تراز $|3\rangle$ به $|1\rangle$ و $|3\rangle$ به $|2\rangle$ به ترتیب با γ_1 و γ_2 بیان شده است. Λ نرخ پمپ ناهمدوس است که بین ترازهای $|1\rangle$ و $|3\rangle$ اعمال شده است. مجموعه معادلات (۱) برای بدست آوردن جواب های حالت پایا و گذرا سیستم به صورت عددی قابل حل هستند.



شکل ۱: سیستم سه ترازی لاندا در حضور میدان مغناطیسی. Δ_B نشان دهنده شیفت زیمن دو تراز پایه تبهگن است. میدان ناهمدوس با نرخ 2Λ نیز بین ترازهای ۱-۳ اعمال می شود که رسم نشده است.

معادلات بالا برای محاسبه پذیرفتاری مختلط استفاده می شود:

$$\chi_p=\frac{N|\mu_{31}|^2\rho_{31}}{2\hbar\varepsilon_0\Omega_p}\propto\rho_{31} \qquad (۳)$$

که N چگالی تعداد اتم ها و ε_0 گذردهی خلا هستند. بنابراین جذب و پاشندگی میدان پروب در محیط به ترتیب متناسب با قسمت موهومی و حقیقی پذیرفتاری هستند. $\text{Im}(\rho_{31})=0$ نشان دهنده این است که میدان پروب در سیستم جذب نمی شود در این حالت پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی رخ می دهد. اگر $\text{Im}(\rho_{31})<0$ و $\rho_{33}-\rho_{11}<0$ باشد میدان لیزری پروب بدون ایجاد جمعیت معکوس تقویت شده است یعنی در سیستم لیزرزایی بدون جمعیت معکوس رخ می دهد ولی اگر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

$\mathrm{Im}(\rho_{31})>0$ میدان لیزری پروب تضعیف می شود. در این مقاله منظور از لیزرزایی یا تقویت، تقویت بدون جمعیت معکوس است.

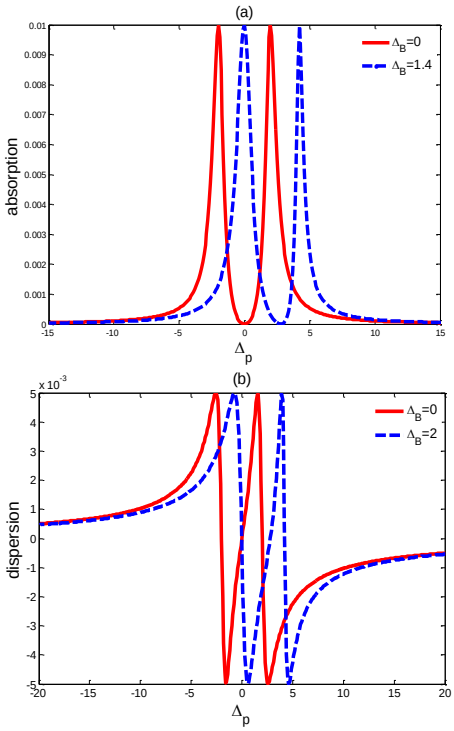
۳- نتایج

در این قسمت ما اثر میدان مغناطیسی بر روی طیف جذبی و پاشندگی میدان پروب را مورد مطالعه قرار می دهیم و نشان می دهیم که چگونه این پارامتر می تواند برای کنترل خصوصیات نوری میدان پروب استفاده شود.تمامی پارامترها در واحد γ_1 بیان می شود. ابتدا حالتی را در نظر می گیریم که میدان ناهمدوس در سیستم وجود ندارد $\Lambda=0$. در شکل ۲ ضریب جذب میدان پروب $\mathrm{Im}(\rho_{31})$ و پاشندگی $\mathrm{Re}(\rho_{31})$ بر حسب ناکوکی میدان پروب رسم شده است. برای موردی که میدان مغناطیسی بر سیستم اعمال نمی شود جذب میدان در ناحیه تشدید صفر است و سیستم شفاف است و طیف جذبی میدان پروب دارای دو قله با مقدار مساوی در دو طرف ناحیه تشدید است. پاشندگی در ناحیه تشدید شیب تند و مثبتی دارد. با اعمال میدان مغناطیسی به صورتی که $\Delta_B=1.4$ باشد، طیف جذبی و پاشندگی بر روی محور افقی به سمت راست شیفت پیدا می کنند، به طوریکه در این حالت ناحیه تشدید دارای بیشترین جذب و پاشندگی در ناحیه تشدید دارای شیب منفی خواهد شد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اعمال میدان مغناطیسی مناسب کافی است تا سیستم را از حالت شفافیت کامل به حالت بیشترین جذب و از حالت پاشندگی غیر عادی به پاشندگی عادی ببرد. بنابراین با خاموش و روشن کردن میدان مغناطیسی می توان به یک سوئیچ دوگانه جذب نوری میدان پروب دست یافت.

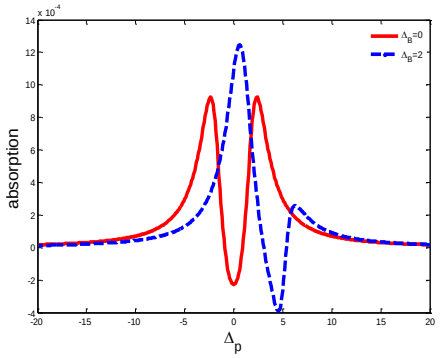
در ادامه کار اثر میدان ناهمدوس $\Lambda=0.5$ نیز در نظر گرفته می شود. شکل ۳ منحنی جذب بر حسب ناکوکی میدان پروب را به تصویر می کشد همانطور که مشخص است هنگامی که میدان ناهمدوس بر تراز ۱-۳ اعمال می شود در غیاب میدان مغناطیسی خارجی در ناحیه تشدید جذب میدان پروب منفی است که نشان دهنده تقویت میدان در سیستم است با اعمال میدان مغناطیسی $\Delta_B=2$ ناحیه ای که دارای جذب منفی است به سمت فرکانس های مثبت جابه جا می شود و همینطور مقدار جذب تا دو برابرکاهش می یابد. بنابراین اعمال میدان مغناطیسی باعث افزایش بهره در سیستم می شود. البته باید دقت کرد که میدان مغناطیسی باعث افزایش جذب در ناحیه تشدید و از بین رفتن تقارن موجود در منحنی جذب شده است، بطوریکه در شاخه سمت راست منحنی، جذب بشدت کاهش یافته در حالیکه در شاخه سمت چپ شاهد افزایش جذب هستیم.

شکل۴-a اثر میدان مغناطیسی بر روی جذب را نشان می دهد همانطور که ملاحظه می شود وقتی میدان ناهمدوس بر سیستم اعمال نمی شود کمترین مقدار برای جذب، $\mathrm{Im}(\rho_{31})=0$ است وتنها اثری که میدان مغناطیسی بر روی طیف جذب دارد این است که ناحیه شفاف به سمت ناکوکی های مثبت جابه جا می شود ولی در حالتی که میدان ناهمدوس بر سیستم اعمال می شود علاوه بر جابه جایی طیف جذب، با افزایش میدان مغناطیسی جذب کاهش پیدا می کند ولی با افزایش بیشتر میدان دوباره شاهد افزایش جذب هستیم.

شکل ۴-b جذب را به صورت تابعی از Δ_B و Δ_p در حضور میدان ناهمدوس نشان می دهد. همانطور که مشخص است با افزایش Δ_B کمترین جذب به سمت Δ_p های بزرگتر جابه جا می شود و شکل ۴-c نمودار سه بعدی تغییرات جذب بر حسب از Δ_Bو Δ_p را نشان می دهد.



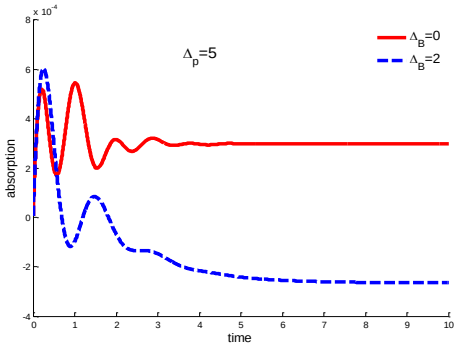
شکل ۲: a- منحنی جذب بر حسب ناکوکی میدان پروب. b- منحنی پاشندگی در غیاب میدان ناهمدوس $\Lambda=0$.در غیاب میدان مغناطیسی (خط پر) و در حضور میدان مغناطیسی (خط چین). بقیه پارامترها: $\gamma_1=2\pi\times 3MHz,\ \gamma_2=\gamma_1,\ \Omega_p=0.01\gamma_1$, $\Omega_c=2\gamma_1,\Lambda=0.5\gamma_1,\Delta_c=0$



شکل ۳: منحنی جذب بر حسب ناکوکی میدان پروب در حضور میدان ناهمدوس $\Lambda=0.5$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

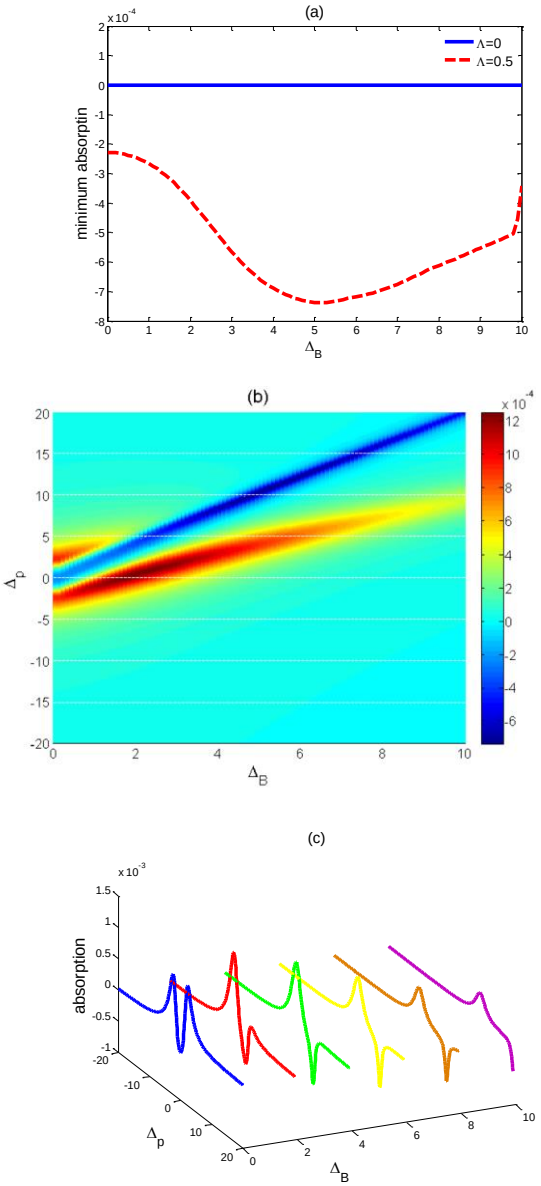
شکل ۵ تغییرات زمانی جذب تا رسیدن به حالت پایدار را به ازای $\Delta_p = 5$ در حضور میدان ناهمدوس را به تصویر کشیده است. وقتی میدان مغناطیسی بر سیستم اعمال نمی شود منحنی جذب پس از چند نوسان به مقدار ثابت مثبت میل می کند که نشان دهنده ی این است که میدان پروب در سیستم تضعیف می شود با اعمال میدان مغناطیسی وضعیت متفاوت می شود و منحنی جذب پس از چند نوسان به مقدار ثابت منفی می رسد که نشان دهنده ی وجود بهره در سیستم است.



شکل ۵: تغییرات زمانی منحنی جذب در حضور میدان ناهمدوس $\Lambda = 0.5$ و $\Delta_p = 5$ بقیه پارامترها مانند شکل ۲

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم سه ترازی لاندا با دو تراز پایه تبهگن مورد بررسی قرار گرفت که با اعمال میدان مغناطیسی این تبهگنی از بین می رود. مشخص شد که با اعمال میدان مغناطیسی حوزه فرکانسی که شفاف بود به سمت فرکانس های بالاتر شیفت پیدا کرد و در ناحیه تشدید بیشترین جذب رخ داد. در حالتی که میدان مغناطیسی همزمان با میدان ناهمدوس بر سیستم اعمال شد مشخص گردید که به ازای انتخاب مناسب شدت میدان مغناطیسی بهره در سیستم افزایش می یابد. در انتها رفتار زمانی منحنی جذب بررسی شد و مشخص شد که در حالت غیر تشدید $\Delta_p = 5$ وجود میدان مغناطیسی و میدان ناهمدوس باعث تقویت میدان پروب می شود در حالیکه در غیاب میدان مغناطیسی میدان پروب دارای جذب مثبت بوده و تضعیف خواهد شد.



شکل۴: a- تغییرات کمترین جذب بر حسب Δ_B b- تغیرات جذب به صورت تابعی از Δ_B و Δ_p c- منحنی سه بعدی تغییرات جذب بر حسب Δ_B و Δ_p . $\Lambda = 0.5$ بقیه پارامترها مانند شکل ۲

مراجع

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

[2] M.O. Scully, S.Y. Zhu, A. Gavrielides, *Degenerate quantum-beat laser: Lasing without inversion and inversion without lasing*,**Phys. Rev. Lett**. 62 (1989) 2813.

[3] M.O. Scully, *Enhancement of the index of refraction via quantum coherence*,**Phys. Rev. Lett**. 67 (1991) 1855.

[4] A.T. Rosenberger, L.A. Orozco, H.J. Kimble, *Observation of absorptive bistability with two-level atoms in a ring cavity* , Phys. Rev. A 28 (1983) 2529.

[5] D.E. Grant, H.J. Kimble, *Optical bistability for two-level atoms in a standing-wave cavity*, **Opt. Lett**. **7** (1982) 353.

[6] H.J. Gibbs, S.L. Mccall, T.N.C. Venkatesan, *Differential Gain and Bistability Using a Sodium-Filled Fabry-Perot Interferometer*, **Phys. Rev. Lett.** 36 (1976) 1135.

[7] L.V. Hau, S.E. Harris, Z. Dutton, C.H. Behroozi, *Light speed ... in an ultracold atomic gas*,**Nature (London)** 397 (1999) 594;.

[8] L.J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu, *Gain-assisted superluminal light propagation*, **Nature (London)** 406 (2000) 277;

[9] A.D. Wilson-Gordon, H. Friedmann, *Enhanced index of refraction: a comparison between two- and three-level systems*,**Opt. Commun**. 94 (1992) 238.

[10] A.D.Wilson-Gordon, H. Friedmann, *Enhanced index of refraction in a population-trapped three-level system*,**Opt. Commun**. 98 (1993) 303

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]