



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۳۹۷ بهمن ۹-۱۱



مکان یابی دو بعدی اتم درون موج ایستا از طریق طیف جذبی

علی علقمندالانق، مصطفی صحرایی و فروغ بزرگزاده

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده - اندرکنش همدوس اتم با موج ایستای وابسته به مکان، حاوی اطلاعاتی در مورد مکان اتم در هنگام حرکت درون موج ایستا است. نشان می‌دهیم که زمانیکه پذیرفتاری الکتریکی وابسته به فرکانس جذبی میدان کاوشگر اندازه‌گیری شود، موقعیت اتم درون موج ایستا تعیین می‌شود. با استفاده از یک سامانه چهار تراز و بررسی تاثیر نامیزانی میدان کاوشگر و فرکانس رابی میدان های اعمالی به این مهم دست می‌یابیم.

کلید واژه- مکان‌یابی، فرکانس رابی میدان محرک، نامیزانی میدان پروب با گذارهای مربوطه

Two dimensional atom localization through the standing wave via probe field absorption

Ali Aghlmand Alanagh, Mostafa Sahrai and Forough Bozorgzadeh

Research institute for applied physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- Coherent interaction of an atom with a position-dependent standing-wave cavity field can impart position information of a moving atom through the cavity, leading to sub-wavelength atom localization. We show that the position of the atom along the standing-wave field is determined when the probe-field absorption is measured. By employing a four-level system, it is shown that the position of an atom inside the standing-wave field depends on detuning of the probe field and the position-dependent Rabi frequency of coupling field.

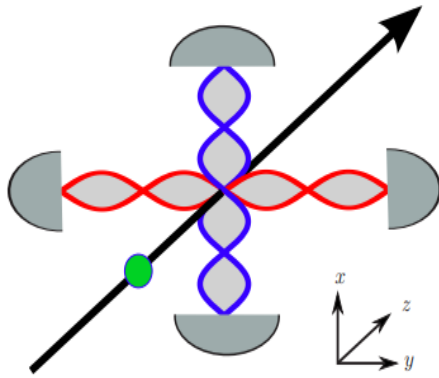
Keywords: atom localization, Rabi frequency of coupling field, detuning of the probe field.

مقدمه

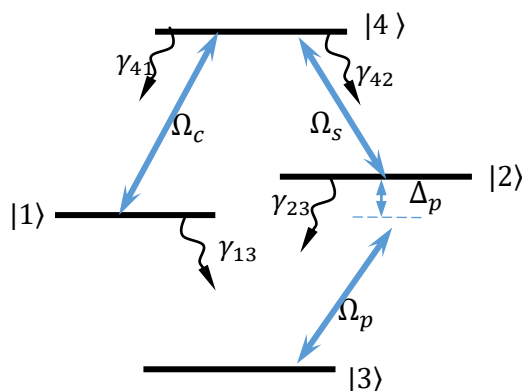
اخیرا مکان‌یابی اتم درون موج ایستا از طریق اندازه‌گیری طیف جذبی میدان کاوشگر مورد توجه اساسی قرار گرفته است. نشان داده شده در صورتیکه در یک سامانه نوعی EIT (سامانه‌ی اتمی سه تراز)، میدان تزویج کننده دارای نمایه‌ی سینوسی متغیر با مکان باشد، پاسخ جذب محیط در فضا مدوله خواهد شد. به عبارتی جمعیت تراز بالایی سامانه‌ی اتمی در فضا موضعی شده است [۱ و ۲]. مکان‌یابی اتم درون موج ایستا کاربردهای وسیعی از جمله نانو لیتوگرافی، چگالش بوز-انیشتن و خنک سازی لیزری دارد. در این مقاله، مکان‌یابی اتم در دو بعد از طریق طیف جذبی میدان ضعیف کاوشگر انجام شده است. به محض اینکه فرکانس جذبی اندازه‌گیری شد، مکان اتم متحرک درون موج ایستا تعیین می‌گردد. پارامترهای موثر در برهمکنش اتم و میدان، در حالت دو بعدی نظیر شدت میدان تزویج کننده، نامیزانی میدان‌های تزویج کننده و کاوشگر در مکان‌یابی اتم مورد بحث قرار گرفته است.

مدل و معادلات

مطابق شکل ۱ (الف)، یک اتم متحرک در راستای z در نظر می‌گیریم که از میان موج ایستای کاواک عبور می‌کند. ساختار داخلی ترازهای انرژی اتم در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. نرخ گذار تابشی از تراز $|4\rangle$ به ترازهای $|2\rangle$ و $|1\rangle$ به ترتیب γ_{42} و γ_{41} است. و نرخ گذار تابشی از ترازهای $|2\rangle$ و $|1\rangle$ به تراز $|3\rangle$ به ترتیب γ_{23} و γ_{13} است. تراز $|2\rangle$ به وسیله‌ی میدان ضعیف کاوشگر Ω_p به تراز $|3\rangle$ تزویج شده است. تراز $|4\rangle$ با ترازهای $|2\rangle$ و $|1\rangle$ به ترتیب به وسیله‌ی میدان‌های کلاسیک با فرکانس رابی $\Omega_s(x) = \sin(kx)$ و $\Omega_c(x) = \sin(ky)$ تزویج شده است. که $k = 2\pi/\lambda$ عدد موج است.



شکل ۱ (الف). اتم متحرک در راستای z و عبوری از میان موج ایستا



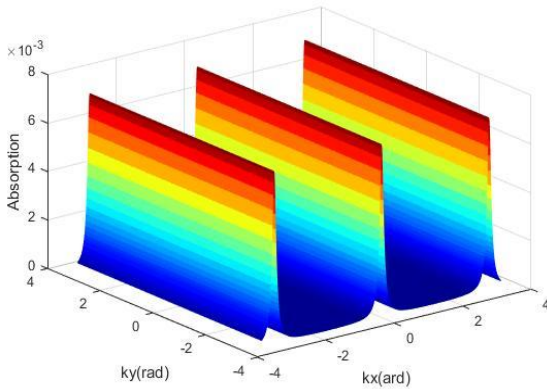
شکل ۱. ساختار داخلی ترازهای اتمی

با فرض اینکه که مرکز جرم اتم تقریباً ثابت است با اعمال تقریب رامن-نات^۱ با صرفنظر از انرژی جنبشی اتم در هامیلتونی، هامیلتونی برهمکنش اتم با میدان به شکل زیر بدست می‌آید.

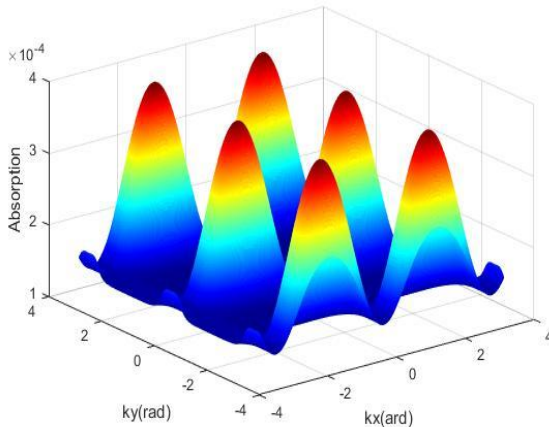
$$H = \begin{bmatrix} -\Delta_p & 0 & 0 & -\frac{\Omega_c}{2} \\ 0 & -\Delta_p & -\frac{\Omega_p}{2} & -\frac{\Omega_s}{2} \\ 0 & -\frac{\Omega_p}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{\Omega_c}{2} & -\frac{\Omega_s}{2} & 0 & -\Delta_p \end{bmatrix}$$

که $\Delta_p = \omega_{32} - \nu_p$ نامیزانی میدان پروب، $\Omega_p = \mu_{23}E_p/\hbar$ و $\Omega_c = \mu_{41}E_c/\hbar$ ، $\Omega_s = \mu_{42}E_s/\hbar$ فرکانس رابی میدان‌های اعمالی است. با استفاده از رابطه

¹Raman-Nath approximation



شکل ۲(الف). نمودار جذب کاوشگر بر حسب (kx, ky) به ازای
 $\Omega_s = 10\gamma, \Omega_c = 0$ و سایر پارامترها عبارتند از
 $\Delta_{41} = \Delta_{42} = \Delta_p = 0$ ، $\Delta_p = 0.001\gamma$
و $\gamma_{13} = 0.01\gamma$ ، $\gamma_{42} = 1.93\gamma$ ، $\gamma_{41} = 1.80\gamma$
و $\gamma_{23} = 0.14\gamma$



شکل ۲(ب). نمودار جذب کاوشگر بر حسب (kx, ky) به ازای
 $\Delta_p = 0.5\gamma$ ، $\Omega_s = 1\gamma$ ، $\Omega_c = 5\gamma$ و سایر پارامترها شبیه
شکل ۲(الف) می‌باشند.

همچنین با قرار دادن $\Omega_s = \Omega_{0s} [\sin(kx) + \sin(ky)]$ تنها میدان Ω_s وابستگی مکانی خواهد داشت و وابستگی مکانی هم در راستای X و هم در راستای Y به این میدان مرتبط می‌شود.

در شکل ۳ تاثیر میدان ایستا Ω_s و نامیزانی پروب Δ_p روی مکان‌یابی دو بعدی اتم بررسی می‌شود. زمانیکه $\Omega_{0s} = 11\gamma$ و $\Delta_p = 6\gamma$ ، دو الگوی حفره مانند در پروفایل جذب رخ می‌دهد که اتم با احتمال زیاد در لبه های آن دو دهانه موضع گیری می‌کند. شکل ۳(الف).

لیوویل، و پس از خطی سازی کردن، معادلات ماتریس چگالی زیر بدست می‌آیند.

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + L_{\rho}$$

$$\dot{\rho}_{13}^{(1)} = \left(i\Delta_{41} + i\Delta_p - i\Delta_{42} - \frac{\Gamma_{13}}{2} \right) \rho_{13}^{(1)} + i\frac{\Omega_c}{2} \rho_{43}^{(1)}$$

$$\dot{\rho}_{23}^{(1)} = -\left(\frac{\Gamma_{23}}{2} - i\Delta_p \right) \rho_{23}^{(1)} + i\frac{\Omega_s}{2} \rho_{43}^{(1)} + i\frac{\Omega_p}{2}$$

$$\dot{\rho}_{43}^{(1)} = i\frac{\Omega_c}{2} \rho_{13}^{(1)} + i\frac{\Omega_s}{2} \rho_{23}^{(1)} - \left(\frac{\Gamma_{42}}{2} + \frac{\Gamma_{41}}{2} - i\Delta_p + i\Delta_{42} \right) \rho_{43}^{(1)}$$

$$\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1$$

هدف، بدست آوردن اطلاعات در مورد مکان اتم عبوری از میان میدان موج ایستا از طریق اندازه‌گیری جذب میدان کاوشگر $\chi'' = \text{Im}(\chi)$ است. که پذیرفتاری میدان کاوشگر است و بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\chi = \frac{N\mu_{23}}{\epsilon_0 E} \rho_{23}$$

که μ ممان دو قطبی، N چگالی اتم و ρ_{23} عنصر ماتریس چگالی گذار کاوشگر است.

نتایج و بحث ها

در شکل ۲ تاثیر میدان های ایستا Ω_c, Ω_s و نامیزانی میدان پروب Δ_p روی مکان یابی دو بعدی اتم بررسی می‌شود. برای $\Omega_s = 5\gamma$ و $\Delta_p = 0$ با خاموش بودن میدان Ω_c ، جذب در بازه $[-\pi, \pi]$ دقیقاً صفر است بجز سه ناحیه موجود در اطراف گره میدان موج ایستا $\Omega_s(x) = \sin(kx)$ شکل ۲(الف). ناحیه‌هایی که در آنها جذب وجود ندارد به دلیل وجود شفافیت القایی الکترو مغناطیسی در فرکانس تشدید است. زیرا زمانیکه Ω_c خاموش است سامانه به یک سامانه‌ی سه ترازوی آبهاری تبدیل می‌شود [۴ و ۳]. سپس با روشن شدن میدان Ω_c و قرار دادن $\Delta_p = 0.5\gamma$ ، $\Omega_s = 1\gamma$ و $\Omega_c = 5\gamma$ پیک جذب در هر چهار ناحیه پدیدار می‌شود. شکل ۲(ب).

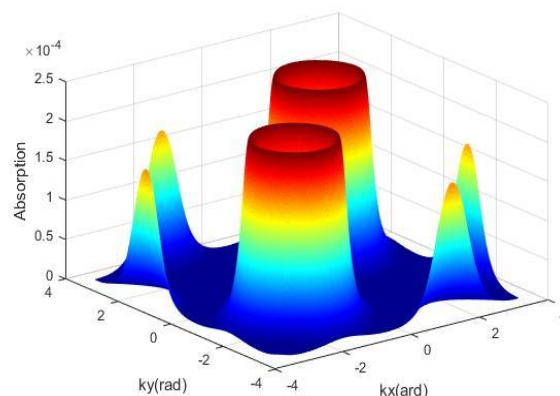
نتیجه‌گیری

در این مقاله مکان یابی دو بعدی اتم از طریق طیف جذبی میدان کاوشگر برای یک سامانه چهار ترازوی بررسی شد که در آن از دو میدان کنترلی و وابسته به مکان و یک میدان کاوشگر استفاده شده است که با استفاده از تغییر پارامترهای نامیزانی و فرکانس رابی و قسمت موهومی پذیرفتاری، نتایج مطلوب حاصل شد.

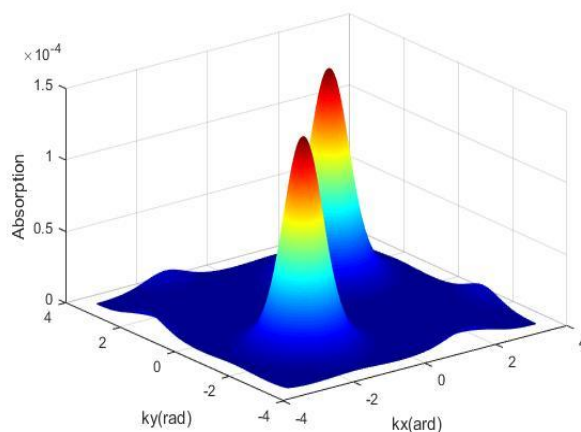
مرجع‌ها

- [1]. E. Paspalakis and P. L. Knight, Phys. Rev. A 63, 065802 (2001).
- [2]. E. Paspalakis, A. F. Terzis, and P. L. Knight, J. Mod. Opt. 52, 1685 (2005).
- [3]. V. Bharti and V. Natarajan, "Study of a Four-Level System in Vee + Ladder Configuration," Opt. Commun. 356, 510 (2015).
- [4]. H.R. Hamed, M. Sahrai, H. Khoshsim, and G. Juzeliunas, "Optical Bistability Forming Due to a Rydberg State," J. Opt. Soc. Am. B. 34(9), 1923 (2017).

با قرار دادن $\Omega_{0s} = 9\gamma$ و $\Delta_p = 10\gamma$ ، شعاع حفره‌ها کاهش یافته و در نتیجه دو الگوی قله مانند در ناحیه دوم و سوم به وجود می‌آید که در واقع احتمال موضع گیری اتم در یک دوره‌ی تناوب موج ایستا افزایش می‌یابد. شکل ۳(ب).



شکل ۳(الف). نمودار جذب کاوشگر بر حسب (kx, ky) به ازای $\Delta_p = 6\gamma$ ، $\Omega_s = 11\gamma$ ، $\Omega_c = 5\gamma$ و سایر پارامترها شبیه شکل ۲(الف) می‌باشند



شکل ۳(ب). نمودار جذب کاوشگر بر حسب (kx, ky) به ازای $\Delta_p = 10$ ، $\Omega_s = 9\gamma$ ، $\Omega_c = 5\gamma$ و سایر پارامترها شبیه شکل ۲(الف) می‌باشند

ملاحظه می‌شود که با کنترل فرکانس رابی و نامیزانی کاوشگر، توزیع احتمال اتم محدودتر و دقیق تر می‌شود.