بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۵۸۰-۱۰-A

تاثیر مرتبه گذار چند قطبی الکتریکی بر شدت میدان لیزری لازم برای انتقال همدوس جمعیت در سیستم‌های هسته‌ای

مهسا جعفری دوست، مقصود سعادتی نیاری، مهدی امیری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل aafazaely@gmail.com

چکیده–مقدار شدت پالس لیزری لازم در اندرکنش لیزر اشعه ایکس با هسته برای هسته های مختلف محاسبه شده است. برای این کار از تکنیک تنظیم مساحت پالس که یکی از تکنیک های اپتیک کوانتومی می‌باشد، استفاده شده است. در این مطالعه گذارهای گاما از مرتبه‌های دوقطبی و چهارقطبی الکتریکی انتخاب شده اند و تاثیر مرتبه گذار بر شدت پالس لیزری لازم برای انتقال کامل جمعیت بررسی شده است.

کلید واژه- لیزر اشعه ایکس، روش تنظیم مساحت پالس، هسته، گذار الکتریکی.

Electric multipolar transition effects on needed laser intensity for coherent population transfer in nuclear systems.

MahsaJafaridoust, MagsoudSaadatiNiari, and Mehdi Amiri

Department of Physics, Faculty of Sciences, University of MohagheghArdabili, Ardabil, Iranaafazaely@gmail.com

Abstract- The amount of laser pulse intensity required in the X-ray laser interaction with the nucleus has been calculated for different nuclei. To do this, the pulse area adjustment technique, which is one of the quantum optics techniques, has been used. In this study, gamma transitions from bipolar and quadrupole electric orders have been selected and the effect of the transition on the laser pulse intensity required for complete population transfer has been investigated.

Keywords: X-ray laser, the pulse area adjustment technique, nuclei, Electric transition

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

مقدمه

حالت‌های هسته‌ای تحریک‌شده با نیمه‌عمر طولانی،مقادیر زیاد انرژی ذخیره می‌کنند. آزادسازی این انرژی، خصوصاً در چشم‌انداز جذاب باتری‌های هسته‌ای اهمیت دارد. به همین دلیل در سالهای اخیر اندرکنش لیزر با هسته در انتقال حالتهای هسته‌ای مورد توجه قرار گرفته است[۴-۱]. در فیزیک اتمی، روش‌هایی برای انتقال همدوس جمعیت، مانند روش تنظیم مساحت پالس و گذار تحریکی بی‌دررو رامان[۵] پیشنهاد شده است. در مقایسه با انتقال جمعیت سیستم‌های اتمی، انتقال جمعیت در هسته‌ها نیاز به فتون‌هایی با انرژی بسیار بالاتری دارد. به‌کارگیری این روش‌ها در سیستم هسته‌ای، به دلیل کمبود لیزرهای گاما انجام نشده اما با پیشرفت در ساخت لیزر اشعه ایکس، روش‌هایی بر مبنای شتاب هسته و استفاده از اثر دوپلر نسبیتی در انتقال جمعیت ترازهای هسته‌ای ارائه شده است. در انتقال جمعیت سیستم هسته‌ای تنظیم پارامترهای پهنای پالس لیزری و شدت بیشینه برای انتقال جمعیت ضروری است. در این مقاله به بررسی این پارامترها در گذارهای دو قطبی و چهار قطبی الکتریکی خواهیم پرداخت و تاثیر بیشینه شدت لیزر برای انتقال جمعیت را مورد مطالعه قرار خواهیم داد.

روش تنظیم مساحت پالس برای انتقال جمعیت در سیستم‌های دو ترازی

هامیلتونی موثر اندرکنش یک سیستم دوترازی با لیزر به صورت زیر می‌باشد.

$$H=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}0 & \Omega(t)\\ \Omega(t) & 2\Delta\end{bmatrix} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا $\Omega(t)=\frac{p_{eg}E(t)}{\hbar}$، فرکانس رابی وابسته به زمان بوده وبه دامنه میدان الکتریکی لیزر و گشتاور دوقطبی اتم بستگی دارد. اگر فرکانس لیزر ω و انرژی تراز پایه $\hbar\omega_g$ و انرژی تراز تحریکی $\hbar\omega_e$ باشد، واکوکی به صورت $\Delta=\omega-(\omega_e-\omega_g)$ تعریف می‌شود. با فرض $\Delta=0$ و با محاسبه تحول زمانی سیستم خواهیم داشت:

$$\left|\Psi(t_f)\right\rangle=\cos\left(\frac{1}{2}A\right)\left|g\right\rangle-i\sin\left(\frac{1}{2}A\right)\left|e\right\rangle \qquad (۲)$$

که $A=\int_i^f\Omega(t).dt$ مساحت پالس می‌باشد و حالت تراز پایه $\left|g\right\rangle$ و تراز تحریکی را با $\left|e\right\rangle$ نمایش می‌دهیم. رابطه ۲ نشان می‌دهد با انتخاب مناسب مساحت پالس‌ها جمعیت را از یک حالت به حالت دیگری منتقل می‌شود. با انتخاب مساحت π جمعیت از حالت $\left|g\right\rangle$به حالت $\left|e\right\rangle$انتقال می‌یابد. این تکنیک، تنظیم مساحت پالس نام دارد. انتقال جمعیت در این روش را با استفاده از پالس گاوسی $\Omega(t)=\Omega_0\exp-\left(\frac{t}{T}\right)^2$ بیشینه Ω_0 انجام می‌دهیم که دامنه و T پهنای پالس است. در سیستم‌های بسته که اثر گسیل خودبه‌خودی به داخل سیستم می‌باشد از معادله شرودینگر استفاده نمی‌شود و چون در سیستم هسته‌ای اثر گسیل خودبه‌خودی نیز در نظر می‌گیریم، از معادله لیوویل استفاده خواهیم کرد. معادله لیوویل با در نظر گرفتن اثر گسیل خود به خودی به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{1}{i\hbar}[\mathrm{H},\rho]+\rho_s \qquad (۳)$$

که ρ ماتریس چگالی و ρ_s جمله پدیده شناختی می‌باشد. برای جمله پدیده شناختی نیز داریم:

$$\rho_s=\sum_l\Gamma_{el}\sigma_{le}\rho\sigma_{le}-\frac{1}{2}\Gamma[\sigma_{ee}\rho+\rho\sigma_{ee}] \qquad (۴)$$

که Γ نرخ کل گسیل از تراز $\left|e\right\rangle$و l شماره ترازی است که گسیل به آن انجام می‌شود و $\sigma_{ij}=|i\rangle\langle j|$ می‌باشد. تحول زمانی ماتریس چگالی سیستم به صورت زیراست:

$$\dot{\rho}_{11}=-i\frac{\Omega}{2}\rho_{21}+i\rho_{12}\frac{\Omega}{2}+\Gamma\rho_{22} \qquad (۵\text{-الف})$$

$$\dot{\rho}_{12}=-i\frac{\Omega}{2}\rho_{22}+i\rho_{11}\frac{\Omega}{2}+i\rho_{12}\Delta-\Gamma\frac{\rho_{12}}{2} \qquad (۵\text{-ب})$$

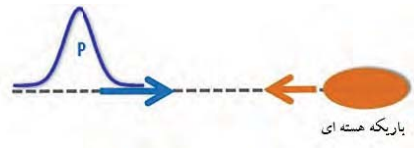
$$\dot{\rho}_{21}=-i\frac{\Omega}{2}\rho_{11}+i\rho_{22}\frac{\Omega}{2}-i\rho_{21}\Delta-\Gamma\frac{\rho_{21}}{2} \qquad (۵\text{-ج})$$

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

$$\dot{\rho}_{22} = -i\frac{\Omega}{2}\rho_{21} + i\rho_{21}\frac{\Omega}{2} - i\rho_{22}\Delta + i\rho_{22}\Delta - \Gamma\rho_{22} \qquad (۵-د)$$

انتقال جمعیت در سیستم‌های هسته‌ای دوترازی

در روش تنظیم مساحت پالس برای اندرکنش لیزر اشعه ایکس با هسته ترازهایی در نظر می‌گیریم که گذار گاما رخ می‌دهد. می‌دانیم که فرکانس لیزرهای اشعه ایکس در مقایسه با فرکانس گاما کمتر بوده و برای حل این مشکل هسته متحرک با سرعت بالا در نظر گرفته شده و با استفاده از پدیده دوپلر نسبیتی و تنظیم فاکتور نسبیتی، هسته طوری حرکت داده می‌شود که فرکانس مشاهده شده در هسته با فرکانس گذار بین دو تراز برابر باشد. شکل ۱ اندرکنش هسته متحرک با لیزر ایکس را نشان می‌دهد. در رابطه دوپلر نسبیتی ذره‌ای که با سرعت v به سمت چشمه‌ای با فرکانس ω_s حرکت می‌کند، فرکانسی که مشاهده می‌کند $\omega_r = \gamma(1+\beta)\omega_s$ خواهد بود که در آن $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ فاکتور نسبیتی و $\beta = \frac{v}{c}$ می‌باشد.



شکل ۱. اندرکنش هسته متحرک با لیزر اشعه ایکس.

در اندرکنش هسته با لیزر اشعه ایکس،اگر E_1 انرژی تراز پایه و E_2انرژی تراز برانگیخته هسته و فرکانس پالس لیزر برابر ω_P باشد، شرط تشدید به صورت زیر خواهد بود:

$$E_2 - E_1 = \gamma(1+\beta)\hbar\omega_P \qquad (۶)$$

با مشخص بودن فرکانس لیزر و مشخصات هسته فاکتور نسبیتی برای تشدید محاسبه می‌شود. شدت موثر وابسته به زمان با فرض پالس لیزری گاوسی، به صورت زیر است:

$$I_P^{eff}(t) = I_P^{eff}\gamma^2(1+\beta)^2\exp\left[-\left(\frac{\gamma(1+\beta)t}{T_p}\right)^2\right] \qquad (۷)$$

همانند اندرکنش اتم دو ترازی با میدان، هامیلتونی موثر اندرکنش هسته متحرک با لیزر اشعه ایکس با رابطه (۱) نوشته می‌شود که برای فرکانس رابی حقیقی داریم:

$$\Omega(t) = \sqrt{I_p^{eff}}\,\overline{\Omega}_0\exp\left(-\frac{t}{\overline{T}_p}\right)^2 \qquad (۸)$$

در رابطه بالا داریم:

$$\overline{\Omega}_0 = \frac{4\sqrt{\pi}}{\hbar}\left[\frac{\gamma^2(1+\beta)^2(L+1)(2I_g+1)B_{12}}{c\varepsilon_0 L}\right]^{\frac{1}{2}}\frac{k_{21}^{L-1}}{(2L+1)!!} \qquad (۹)$$

$$\overline{T}_p = \frac{\sqrt{2}T_p}{\gamma(1+\beta)} \qquad (۱۰)$$

L مرتبه گذار دوقطبی می‌باشد. گذارهای الکتریکی از مرتبه دوقطبی را با $E1$ و گذارهای الکتریکی مرتبه چهار قطبی را $E2$ نمایش می‌دهیم. در گذارهای $E1$، $L=1$ و گذارهای $E2$، $L=2$است. I_g اسپین تراز پایه و B_{12} احتمال گذار چندقطبی می‌باشد که اگر گذار از نوع $E1$ باشد مقدار B_{12} را که در جداول داده‌های هسته‌ای در واحد وایسکوف داده می‌شود در $0.06446\times A^{\left(\frac{2}{3}\right)}e^2fm^4$ و اگر گذار از نوع $E2$ باشد در $0.05940\times A^{\left(\frac{4}{3}\right)}e^2fm^4$ ضرب می‌کنیم که A عدد جرمی هسته و k_{21} عدد موج مربوط به گذار از تراز ۲ به تراز ۱ می‌باشد. T_p پهنای پالس لیزری اشعه ایکس را نشان می‌دهد. تمامی پارامترها برای دو تراز مشخص از یک هسته، ثابت بوده و با تنظیم شدت بیشینه پالس لیزری I^{eff}و پهنای پالس لیزری T_p مساحت زمانی فرکانس رابی را بگونه‌ای تنظیم می‌کنیم که انتقال جمعیت کامل انجام گیرد. با توجه به رابطه (۸) داریم:

$$I_p^{eff} = \frac{\pi}{(\overline{\Omega}_0)^2\times(\overline{T})^2} \qquad (۱۱)$$

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

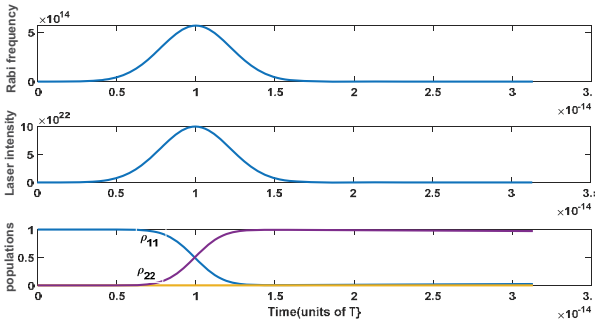
مطالعات عددی

حال برای مطالعات عددی عناصر با ترازها و گذارهای مختلف در نظر می‌گیریم و تاثیر مرتبه گذار را بر شدت پالس لیزری لازم برای انتقال کامل جمعیت بررسی می‌کنیم. مقادیر داده‌ها و نتایج محاسبات در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. پارامتر های مربوط به گذار در سیستم هسته‌ای عناصر مختلف.

اختلاف انرژی بین ترازها	بیشینه شدت پالس لیزری	طول عمر تراز تحریکی	فاکتور نسبیتی γ			اسپین تراز پایه	نوع گذار	انرژی تراز بر انگیخته	انرژی تراز پایه	نوع هسته
1786	W/cm^2		71.42					E =		1
1599	W/cm^2		58.82					E =		1
50.13	1.4251×10^{28} W/cm^2		2.1		1			E =		2
206.05	1.4947×10^{31} W/cm^2	0	8.33		1			E_1 =	E	1
123	W/cm^2		5					E_1		1
284	W/cm^2		11.5					E_1		1
560.43	1.0001941×10^{27} W/cm^2		22.6					E_1		
258.72	7.1528×10^{27} W/cm^2	0	10.5					E_1 =	E	1

شکل ۲ تحول زمانی فرکانس رابی، شدت پالس لیزری و همچنین جمعیت ترازها را برحسب زمان نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از شکل را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.



شکل۲.بالا، فرکانس رابی برحسب زمان. نمودار وسط، شدت لیزر بر حسب زمان و نمودار پایین جمعیت برحسب زمان را برای عنصر Tc^{97} با تراز های انرژی $96.57Kev$ و $657Kev$ نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به جدول ۱ در گذارهای نوع $E2$ با افزایش فاکتور نسبیتی بیشینه شدت پالس لیزری کاهش می‌یابد. فاکتور نسبیتی بالا به معنای اختلاف تراز انرژی بیشتر می‌باشد. یعنی در حالتی که نیاز باشد که هسته با سرعت بالاتری حرکت کند، شدت بیشینه لیزری کمتری احتیاج است. اما در مورد گذارهای $E1$ این تغییرات قانون‌مند نمی‌باشد. علت این پدیده به خاطر تبدیل واحد وایسکوف می‌باشد که گذار $E1$ را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد.

مرجع‌ها

[1] Walker, P., &Dracoulis, G. "Energy traps in atomic nuclei". p. 35-40, Nature, 1999.

[2] Ledingham, K. W. D., McKenna, P., &Singhal, R. P. "Applications for nuclear phenomena generated by ultra-intense lasers". p. 1107, Science, 2003.

[3] Aprahamian, A., & Sun, Y. "Long live isomer research", p. 81, Nature Physics, 2005.

[4] Pálffy, A., Evers, J., & Keitel, C. H,. "Isomer triggering via nuclear excitation by electron capture", Physical review letters, 2007.

[5] Bergmann, K., Theuer, H., & Shore, B. W. "Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules", p. 1003 Reviews of Modern Physics, 1998.

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