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 : ۱-۸۸۴-۱۰-A

اثر افت و خیزهای فاز و دامنه لیزر در سرمایش داپلری اتم استرانسیوم

مسعود یوسفی[1]، محسن اکبری، ساره شهیدانی، جواد صالحی نظام‌آبادی و نادر صبح‌خیز وایقان

گروه اپتیک اتمی، مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله با توجه به رشد روزافزون استفاده از فناوری لیزر در فرایندهای کنترل حرکت اتم‌های خنثی جهت مطالعه پدیده‌های کوانتومی در سرعت‌های پایین، به مطالعه نظری اثر افت‌خیزهای فاز و دامنه باریکه لیزری مورد استفاده در سرمایش داپلری اتم استرانسیوم پرداخته شده‌است. بدین منظور، نیروی فشار تابشی، ضریب میرایی و کمینه دمای قابل حصول در حضور افت‌وخیزهای لیزری به صورت تحلیلی محاسبه و سپس اثر تغییرات آنها بر کمیت‌های مذکور به صورت عددی شبیه‌سازی شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که، با افزایش افت‌وخیزها بزرگی نیروی تابشی و متعاقباً مقدار بیشینه ضریب میرایی و در نتیجه بازده سردسازی کاهش خواهد یافت؛ به طوری‌که اثر نوسانات دامنه(مرتبط با پایداری توان لیزر) قویتر از اثر افت‌وخیز فازی مرتبط با پهنای خط لیزر است. همچنین در این شرایط، اختلاف کمینه دمای قابل حصول از مقدار پیش‌بینی شده در نظریه سرمایش داپلری، به شدت افزایش خواهد یافت. نتایج به صورت نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه شده است.

کلید واژه- اتم استرانسیوم، سردسازی لیزری، نوسانات تصادفی فاز و دامنه، نیروی فشار تابشی.

Effect of stochastic laser phase and amplitude fluctuations on Doppler coolingofstrontium atom

Masoud Yousefi, Mohsen Akbari, SarehShahidani, JavadSalehiNezam Abadiand Nader SobhkhizVayghan

Atom Optics Group, Iranian Center for Quantum Technologies (ICQTs), Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the effects of stochastic laser phase and amplitude fluctuations on the Doppler cooling and trapping of strontium atom are theoretically investigated by detail. relevant physical quantities in the laser cooling, such as radiative pressure force, damping coefficient and minimum achievable temperature are analytically explored with respect to both amplitude and frequency fluctuations of the laser. The results show that, with increasing of the stochastic fluctuations, the magnitude of the radiative force, thus the maximum amount of damping coefficient and consequently the cooling efficiency will decrease so that the effect of amplitude fluctuations is stronger than the laser linewidth variations. Furthermore, temperature deviate severely from Doppler theory predictions, implying that these fluctuations are significant additional heating mechanisms.

Keywords: Doppler laser cooling, radiative pressure force, strontium atom,laser phase and amplitude fluctuations.

---

[1]Yousefi.masoud87@gmail.com

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

مقدمه

فرایند کاهش سرعت و یا سردسازی اتم‌ها در حضور میدان‌های تابشی با فرکانس‌های نزدیک به فرکانس گذار اتمی به همراه به‌دام‌اندازی آنها در حضور یک گرادیان میدان مغناطیسی(دام مغنطواپتیکی)، یک روش مهم به منظور کنترل حرکت اتم‌های خنثی است که در طیف-سنجی‌های با دقت بالا، ساعت‌های اتمی، مطالعات پدیده-های کوانتومی و دیگر کاربردهای مبتنی بر اندازه‌گیری‌ها در دماهای پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد[۳-۱]. به طور معمول جهت محاسبه نیروی فشار تابشی مورد استفاده در سردسازی لیزری اتم‌ها، ازمیدان‌هایی با دامنه و فاز ثابت استفاده می‌شود[۴]. اما به هر حال، در لیزرهای واقعی هر دو پارامتر فاز و دامنه میدان با زمان نوسان می‌کنند. به طور کلی، این افت‌وخیزها از طریق تغییر نیروی فشار تابشی سبب کاهش راندمان سردسازی لیزری و متعاقباً افزایش کمینه دمای قابل حصول می‌شود[۵]. بنابر مستندات موجود، مطالعه اثرات این افت و خیزها به طور جداگانه و محدود صورت پذیرفته‌است[۵-۴]. اما به هرحال به منظور نزدیک شدن به شرایط واقعی و کاربردی و درنتیجه طراحی سامانه‌های سردسازی لیزری بهینه، بررسی همزمان اثرات افت و خیزهای فاز (مرتبط با پهنای خط باریکه لیزری) و دامنه (مرتبط با پایداری توان لیزر) باریکه لیزری کندکننده بر کمیت مشخصه‌های مهم این فرایند از قبیل نیروی فشار تابشی، ضریب میرایی و کمینه دمای قابل حصول بسیار حائز اهمیت است. از این رو، در این مقاله به طور همزمان اثرات هر دو افت‌وخیز فاز و دامنه باریکه لیزری بر پارامترهای مهم سردسازی لیزری به صورت نظری شبیه‌سازی شده است. پس از محاسبه نیروی فشار تابشی، کمیت‌های ضریب میرایی و کمینه دمای قابل حصول به صورت تحلیلی محاسبه شده و اثر تغییرات این افت‌وخیزها بر پارامترهای مذکور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌است.

مبانی نظری

شکل صریح نیروی فشار تابشی ناشی از چرخه جذب و نشر خودبه‌خودی فوتون وارد بر یک اتم دو ترازی به جرم m، فرکانس تشدید ω_0، ممان دوقطبی گذار μ و پهنای خط طبیعی گذار Γ_a، به صورت زیر بیان می-شود[۳]:

$$F=-\frac{\hbar}{2}<|e\rangle\langle g|\nabla(\Omega(\vec{r})e^{-i\theta(\vec{r})-i\omega t})+c.c.> \qquad (۱)$$

که در آن، $\Omega(\vec{r})$فرکانس رابی مرتبط با دامنه میدان الکتریکی باریکه لیزری با فرکانس ω و فاز $\theta(\vec{r})$است. در این مقاله فرض بر آن است که میدان الکتریکی باریکه لیزری، قسمت حقیقی $\tilde{E}(\vec{r},t)$، دارای یک فاز $\phi(t)$ و یک دامنه $\psi(t)$تصادفی اضافی به صورت زیر است:

$$\tilde{E}(\vec{r},t)=\hat{\varepsilon}\left[E_0(\vec{r})+\psi(t)\right] \times\exp\left\{-i\left[\omega t+\theta(\vec{r})+\phi(t)\right]\right\}, \qquad (۲)$$

که در آن $\hat{\varepsilon}$ بردار قطبش و $E_0(\vec{r})=\hbar\Omega(\vec{r})/\mu$ دامنه ثابت اولیه میدان هستند. نیرو و معادله حرکت اتم تحت اثر میدان اپتیکی رابطه (۲) در تقریب موج چرخان و با استفاده از نظریه فرآیندهای آماری ترکیبی، به کمک میانگین تجمعی مولفه‌های بردار بلاخ اپتیکی ($\langle u\rangle,\langle v\rangle,\langle w\rangle$) به صورت زیر قابل محاسبه هستند[۴-۳]:

$$\vec{F}=-\hbar\left[<u(t)>\nabla\Omega(\vec{r}_0)+<v(t)>\Omega(\vec{r}_0)\nabla\theta(\vec{r}_0)\right],$$
$$\langle\dot{u}\rangle=(\Delta+\dot{\theta})\langle v\rangle-\left(\frac{\Gamma_a}{2}+\Gamma_{phs}\right)\langle u\rangle, \qquad (3)$$
$$\langle\dot{v}\rangle=-(\Delta+\dot{\theta})\langle u\rangle+\Omega\langle w\rangle-\left(\frac{\Gamma_a}{2}+\Gamma_{phs}+\Gamma_{amp}\right)\langle v\rangle$$
$$\langle\dot{w}\rangle=-\Omega\langle v\rangle-(\Gamma_a+\Gamma_{amp})\langle w\rangle-\Gamma_a.$$

که در آن، $\Delta=\omega-\omega_0$ بیانگر واکوکی و $\vec{r}_0$ بردار مکان مرکز جرم اتم هستند. در فرآیندهای آماری با توزیع گوسی، افت‌وخیزهای تصافی فاز و دامنه در رابطه (۳) به

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

ترتیب با چگالی‌های طیفی Γ_{phs} و Γ_{amp} توصیف می‌شوند[۴].با حل معادلات (۳)و تعریف $\gamma_1 = 1 + 2\Gamma_{phs}/\Gamma_a$، $\gamma_2 = 1 + 2\Gamma_{amp}/\Gamma_a$ و $\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2 - 1$،نیروی فشار تابشی در حالت پایا برای یک موج تخت رونده ($\theta = \vec{k}.\vec{r}$) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{F}_{scatt} = \hbar\vec{k}\frac{\Gamma_a}{2}\frac{s_{0m}}{1 + s_{0m} + \left[\frac{2\left(\Delta - \vec{k}.\vec{v}\right)}{\Gamma_M}\right]^2}, \qquad (۴)$$

که در آن $s_{0m} = s_0/\gamma_2\gamma_3$ با پارامتر اشباع $s_0 \equiv 2\Omega^2/\Gamma_a^2 = I/I_s$، $\Gamma_{scat} = \vec{F}_{scatt}/\hbar\vec{k}$ نرخ پراکندگی و $\Gamma_M = \Gamma_a\sqrt{\gamma_1\gamma_3}$هستند. در رابطه (۴) عبارت $\left(\Delta - \vec{k}.\vec{v}\right)$ بیانگر جابه‌جایی فرکانسی داپلری است. در روش سردسازی داپلری، به منظور کندسازی حرکت اتم، از تابش دوباریکه لیزری به صورت متقابل، استفاده می‌شود. بنابراین اتم در کل نیروی کندکننده $\vec{F}_{tot} = \vec{F}^{+}_{scatt}\left(\omega - \omega_0 - kv\right) + \vec{F}^{-}_{scatt}\left(\omega - \omega_0 + kv\right) \equiv -\alpha\vec{v}$ را تجربه می‌کند که در حد سرعت‌های پایین ($|\vec{k}.\vec{v}| << \Gamma_a$) ضریب میرایی α به شکل زیر استخراج می‌شود:

$$\alpha \approx -8\hbar k^2\Gamma_a\frac{s_{0m}\Delta}{\Gamma_M^2\left(1 + s_{0m} + \frac{4\Delta^2}{\Gamma_M^2}\right)^2}. \qquad (۵)$$

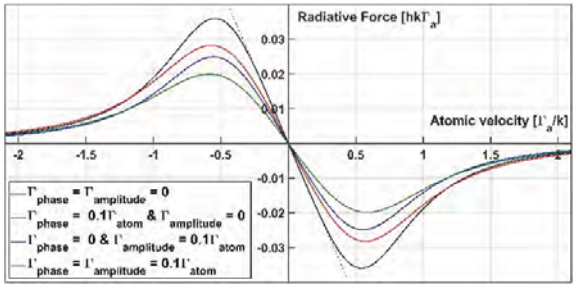
همچنین، کمینه دمای قابل حصول فرایند سردسازی از کمینه‌سازی دمای حاصل از تعادل بین فرایندهای سرمایش، $\dot{E}_{cooling} = -\alpha\frac{3k_BT}{m}$، ناشی از نیروی کندکننده و گرمایش، $\dot{E}_{heating} = \frac{d}{dt}\left(\left\langle p^2\right\rangle/2m\right) = 6\left(\hbar k\right)^2\Gamma_{scat}/m$، ناشی از ضربات تصادفی دریافتی اتم با جذب و نشر فوتون در سه بعد، به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$T_D = \frac{\hbar}{2k_B}\Gamma_a\sqrt{\gamma_1\gamma_3} \qquad (۶)$$

روابط (۴) تا (۶)، اساس شبیه‌سازی‌های عددی بخش آتی هستند.

نتایج و بحث‌ها

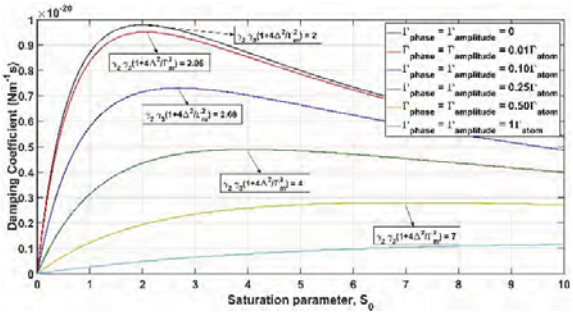
در این بخش، اثر افت‌وخیزهای فاز و دامنه باریکه لیزری بر نیروی فشار تابشی، ضریب میرایی و کمینه دمای قابل حصول جهت سردسازی لیزری اتم قلیایی خاکی استرانسیوم(^{88}Sr) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور سردسازی اولیه این اتم می‌توان از گذار اپتیکی $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ و لیزرهایی با طول‌موج $\lambda = 461nm$، استفاده نمود. پهنای خط طبیعی حالت $^1P_1$و شدت اشباع متناظر آن به ترتیب برابر$\Gamma_a/2\pi = 32MHz$و$I_s = 42.5mW/cm^2$می‌باشند.



شکل (۱): نمودار تغییرات نیروی فشار تابشی بر حسب سرعت اتمی در شرایط مختلف نوسانات فازی و توانی، $S_0 = 0.1$ و $\Delta = -\Gamma_a/2$.

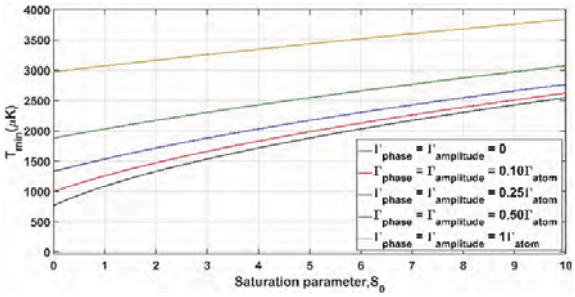
در شکل (۱) تغییرات نیروی فشار تابشی نرمالیزه بر حسب سرعت اتمی نرمالیزه در شرایط مختلف افت‌وخیز فازی و توانی نمایش داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، بزرگی نیروی فشار تابشی در حد شدت‌های پایین ($S_0 << 1$) و در حضور هر دو افت‌وخیز فاز و دامنه کاهش می‌یابد؛ به طوری‌که اثر نوسانات دامنه(مرتبط با پایداری توان لیزر) قویتر از اثر افت‌وخیز فازی مرتبط با پهنای خط لیزر است. به منظور بررسی دقیق‌تر، در شکل (۲) رفتار ضریب میرایی نیروی سردسازی داپلری برحسب پارامتر اشباع (شدت لیزر) در شرایط مختلف افت و خیز فاز و دامنه لیزر مورد استفاده شبیه‌سازی شده‌است.با توجه به شکل (۲) می‌توان دریافت که به طور کلی با افزایش شدت باریکه لیزری،ضریب میرایی

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



شکل (۲): تغییرات ضریب میرایی بر حسب پارامتر اشباع(شدت لیزر) در شرایط مختلف نوسانات فازی و توانی، $\Delta = -\Gamma_a/2$.

افزایش یافته تا به بیشینه مقدار خود($\gamma_2\gamma_3\left(1+4\Delta^2/\Gamma_M^2\right)$) برسد. به طور آشکار، با افزایش افت‌وخیزها مقدار این بیشینه و در نتیجه بازدهی سردسازی کاهش خواهد یافت.



شکل (۳): نمودار تغییرات کمینه دمای قابل حصول بر حسب پارامتر اشباع(شدت باریکه لیزر) در شرایط مختلف نوسانات فازی و توانی.

در شکل (۳) تغییرات کمینه دمای داپلری قابل حصول بر حسب پارامتر اشباع برای حالت‌های مختلف افت‌وخیز فازی و توانی لیزر شبیه‌سازی شده‌است. به طور کلی در حضور هر دو افت و خیز مرتبط با پهنای خط لیزر و پایداری توانی آن، اختلاف کمینه دمای قابل حصول از مقدار پیش‌بینی شده در نظریه سرمایش داپلری، به شدت افزایش خواهد یافت. در غیاب نوسانات، حد دمای داپلری اتم استرانسیوم $T_{\min} \simeq 767\,\mu K$ می‌باشد که این دما به ازای $\Gamma_{phase} = \Gamma_{amplitude} = 0.1\Gamma_a$ برابر با $T_{\min} \simeq 996\,\mu K$؛ یعنی تقریباً ۳۰درصد بیشتر از حالت ایده‌آل بدون افت و اخیز خواهد بود.

جمع‌بندی

در این مقاله اثرات توامان افت و خیزهای فاز و دامنه باریکه لیزری بر پارامترهای مهم سردسازی لیزری به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص شد که بزرگی نیروی پراکندگی در حد شدت های پایین و در حضور هر دو افت‌وخیزفاز و دامنه کاهش می‌یابد؛ به طوری‌که اثر نوسانات دامنه قویتر از اثر افت‌وخیز فازی مرتبط با پهنای خط لیزر است. با افزایش افت‌وخیزها مقدار بیشینه ضریب میرایی و در نتیجه بازدهی سردسازی کاهش خواهد یافت. همچنین اثبات گردید که کمینه دمای قابل حصول به روش سرمایش داپلری در حضور افت‌وخیزهای دامنه و فاز از مقدار تخمینی نظری بالاتر خواهد بود. نتایج حاصل در این مقاله می‌تواند منجر به بهبود طراحی سامانه‌های سردسازی و به‌دام‌اندازی اتم استرانسیوم جهت استفاده در کاربردهای مهمی از قبیل ساعت اتمی و تداخل‌سنجی اتمی شود.

مرجع‌ها

[1] W. Phillips, H. Metcalf, “Laser Deceleration of an Atomic Beam”, Phys. Rev. Lett., Vol. 48, pp. 596-599, 1982.

[2] C. Vishwakarma, K. Patel, J. Mangaonkar, J.L. MacLennan, K. Biswas, and U.D. Rapol, “Study of loss dynamics of strontium in a magneto-optical trap”, arXiv preprint arXiv:1905.03202, 2019.

[3] P. Meystre, *Atom optics* (Vol. 33), Springer Science & Business Media, 2001.

[4] R.J. Cook,“Atomic motion in resonant fluctuating laser radiation”, Physical Review A, Vol. 21, No. 1, pp. 268-274.

[5] F.D. Nunes, J.F. Silva, S.C Zilio, and V.S. Bagnato, “Influence of laser fluctuations and spontaneous emission on the ring-shaped atomic distribution in a magneto-optical trap”, Physical Review A, Vol. 54, No. 3, pp.2271-2278.

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