بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

طراحی کند کننده زیمان به منظور کند سازی اتمهای ^{87}Sr با لیزر

داوود رزاقی، مینا برادران*

پژوهشکده فوتونیک و فناوریهای کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

davrazzaghi@yahoo.com, baradaranm@alum.sharif.edu*

چکیده – در این مقاله برای کند سازی اتمهای استرانسیم ۸۷، مگنت زیمنی طراحی شده است. سرعت اتمهای ورودی به کند کننده زیمن با توجه به دمای کوره ۳۵۰-۴۰۰ درجه سلسیوس، ۴۳۰ متر بر ثانیه و سرعت اتمهای خروجی ۵۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است. طراحی با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده است. سپس دینامیک حرکت اتمها در میدان مغناطیسی طراحی شده، شبیه سازی شده است، که نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مگنت زیمن طراحی شده، کارایی مناسبی داشته و اتمهای ورودی تا سرعت ۳۹۴ متر بر ثانیه در این مگنت به خوبی کند خواهند شد.

کلید واژه- اتمهای استرانسیم ، سرد سازی لیزری، کند کننده زیمن

Designing of Zeeman slower for laser cooling of ^{87}Sr atoms

Davood Razzaghi, Mina Baradaran*

[1]Photonics and quantum technology research school, nuclear science and technology research institute, P.O. Box 14155-1339, Tehran, Iran,

davrazzaghi@yahoo.com, baradaranm@ alum.sharif.edu*

Abstract- In this paper a Zeeman slower for slowing of ^{87}Sr atoms has been designed. Thermal atoms come from oven at 350-400 C° having a most probable velocity about 430 $\frac{m}{s}$, enter the Zeeman slower and must been slowed down to about 50 $\frac{m}{s}$. This slower has been designed by matlab software. Then simulation of the atomic Zeeman slowing dynamics were performed. The results of simulation showed that Zeeman slower is properly well designed and atoms with velocities up to 394 $\frac{m}{s}$ were slowed in this Zeeman slower.

Keywords: Sr atoms, laser cooling, Zeeman slower.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

مقدمه

نور تاثیرات مکانیکی بر اتمها دارد و و بنابراین می تواند سرعت و مکان آنها را کنترل کند. سردسازی لیزری به عنوان یکی از شاخه های جدید فیزیک اتمی در سالهای اخیر توجه زیادی را بر انگیخته است. به طوری که جایزه نوبل سال ۱۹۹۷ به سه نفر از پیشگامان این رشته اهدا شد. امروزه سردسازی لیزری کاربردهای روزافزونی را در شاخه های مختلف فیزیک اتمی، نانوتکنولوژی ، بیولوژی و غیره یافته است. در سال ۱۹۸۲ فیلیپس و متکالف یک باریکه اتمی را از سرعتهای گرمایشی تا چند متر بر ثانیه بوسیله باریکه لیزری با فرکانس ثابت که از روبرو به باریکه اتمی می تابید کند کردند. همانطور که سرعتها کاهش پیدا می کنند، اتمها بر اثر شیفت داپلری از رزونانس با لیزر خارج می شوند. این جابجایی فرکانس بوسیله شیفت زیمن گذار اتمی جبران می شود و شیفت زیمن با میدان مغناطیسی متغیر فضایی ایجاد می شود. این دستگاه کند کننده زیمان نام دارد و وسیله اصلی است که امروزه برای کند کننده باریکه اتمی بکار می رود[۱-۴].

اصول نظری

در پدیده سردسازی لیزری نیرویی که اتمهای در حال حرکت با سرعت v در مواجهه با میدان لیزر با جابجایی فرکانسی $\delta_L = \omega_L - \omega_0$ (ω_L فرکانس لیزر و ω_0 فرکانس گذار اتمی است)، تجربه می کنند مقدار زیر می باشد[۵]:

$$F_{scat} = \frac{\hbar k_L \Gamma}{2} \frac{\frac{I}{I_S}}{1+\frac{I}{I_S}+4(\delta_L - k\cdot v)^2/\Gamma^2} \qquad (۱)$$

که $\Gamma = 2\pi\gamma$ و γ، پهنای خط طبیعی گذار می باشد. و I شدت نور لیزر و I_s، شدت اشباع برای گذار اتمی است. $s_0 = \frac{I}{I_s}$، پارامتر اشباع رزونانس و $k \cdot v$ جابجایی داپلری است. شتابی که اتمها بر اثر این نیرو تجربه می کنند، مقدار $a = \frac{\hbar k_L}{2m}\frac{s_0}{1+s_0}$ است.

در شرایطی که $I \gg I_s$ باشد، مقدار بیشینه شتابی که اتم ها میتوانند کسب کنند از رابطه زیر بدست می آید:

$$a_{max} = \frac{\hbar k_L}{2m} \qquad (۲)$$

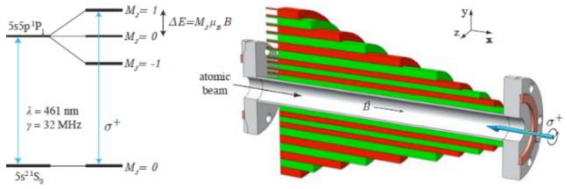
اتمها با استفاده از فشار تابشی نور لیزری با جابجایی فرکانسی ثابت که از روبرو تابیده می شود، کند می شوند. اتمهای متحرک فرکانس نور جابجا شده $\delta = -K_L v(x)$ که با مقدار سرعتشان متناسب است می بینند. با تغییر سرعت اتمها و تغییر جابجایی داپلری، اتمها از رزونانس با نور لیزر خارج می شوند. برای ادامه فرایند کند سازی اتمها، با استفاده از میدان مغناطیسی مناسب، با جابجایی ترازهای انرژی، جابجایی دوپلری جبران می شود و اتمها در رزونانس با لیزر باقی می مانند، یعنی رابطه ۳ بر قرار می ماند.

$$\omega_0 + \frac{\mu B(x)}{\hbar} = \omega_L + K_L v(x) \qquad (۳)$$

در این رابطه ، k عدد موج، μ مگنتون بور و B میدان زیمن می باشد. مقدار نیروی وارد بر اتمها بصورت زیر در می آید.

$$F_{scat} = \frac{\hbar k_L \Gamma}{2} \frac{\frac{I}{I_S}}{1+\frac{I}{I_S}+4(\delta_L - k\cdot v - \frac{\mu B}{\hbar})^2/\Gamma^2} \qquad (۴)$$

میدان مغناطیسی که از رابطه (۳) پیروی می کند بوسیله مگنت زیمن (شکل (۱))که از مجموعه ای از سیم پیچ ها بوجود می آید، ایجاد می شود. [۶].



شکل ۱: کند کننده زیمن. پرتو لیزر با طول موج ۴۶۱ نانومتر وپلاریزاسیون مثبت اتمهای خارج شده از کوره را کند می کنند.

طراحی

در این کار ما از پرتو پلاریزاسیون دایره ای مثبت σ^+ برای کندسازی اتمهای ^{87}Sr در طول موج ۴۶۱ nm استفاده خواهیم کرد. سرعت میانگین خروجی اتمها در درجه حرارت ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد از کوره حدود ۴۳۰ m/s می باشد که از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$v_i = \sqrt{3k_B T / M} \qquad (۵)$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

این دما برای اینکه اتمها را بتوان در تله مگنتو اپتیکی (MOT) به دام انداخت خیلی بالا است، بنابراین با استفاده از کند کننده زیمان که بین کوره و محفظه قرار می گیرد، سرعت اتمها را به حدود ۵۰ m/s می رسانیم که به عنوان سرعت ورودی برای MOT در نظر گرفته می شود. برای بدست آوردن شکل میدان مغناطیسی یک رژیم کاهش ثابت را با معادله (۶) در نظر می گیریم.

$$v(x) = \sqrt{v_i^2 - 2ax} \qquad (۶)$$

که v_i سرعت اولیه و شتاب اتم است. در عمل در شرایط آزمایشگاه و نقایص موجود در میدان مغناطیسی و یا شدت لیزر کند کننده، به شتاب a_{max} دست پیدا نمی کنیم و به کسری از شتاب بیشینه می توان رسید. بنابراین برای طراحی مگنت زیمان پارامتری کوچکتر از یک به نام پارامتر طراحی η تعریف می کنند که $a = \eta a_{max}$ می باشد. ما مقدار $\eta = 0.5$ اختیار می کنیم و بنابراین شتاب مقدار زیر خواهد بود:

$$a = \frac{\hbar k_L}{M}\frac{\Gamma}{4} \sim 5 \times 10^5 \, {}^{m}/_{s^2} \qquad (۷)$$

که $\Gamma = 2\pi\gamma$ و γ برای گذار $1S_0 \rightarrow 1P_1$ استرانسیم مقدار $\gamma = 32\ MHz$ می باشد. بنابراین با استفاده از رابطه (۳) و برای کند کردن اتمهایی با دمای $350\text{-}400\ ^{\circ}C$ تا زمانی که سرعت آنها به حدود ۵۰ m/s برسد مگنت زیمانی با طول حدود ۱۸ سانتیمتر نیازخواهد بود که از رابطه $L_0 = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2a}$ قابل محاسبه است. به منظورکاهش توان سیم پیچها دور یک تیوپ استیل ضد زنگ با قطر خارجی ۱۹ میلیمتر پیچیده می شود، که تا حد امکان به اتمها نزدیک باشند. با قرار دادن این مقادیر در معادله (۳) ما شکل میدان مغناطیسی ایده آل را بدست می آوریم

$$B_{ideal}(x) = B_0\sqrt{1 - \left(1 - \frac{v_f^2}{v_i^2}\right)\frac{x}{L}} + B_{bias} \qquad (۸)$$

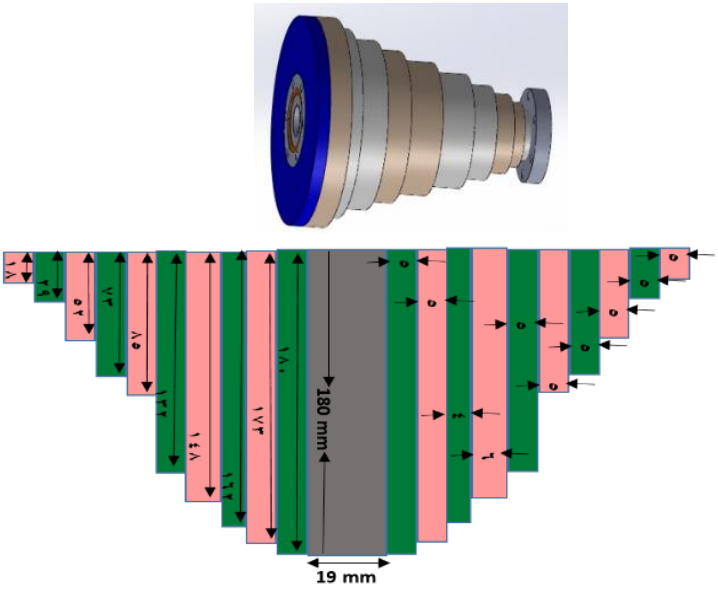
که $B_0 = \frac{\hbar k_L v_i}{\mu} = 665\ gauss$ می باشد.

و مقدار $B_{bias} = -167\ gauss$ اختیار می کنیم.

حال باید با طراحی مجموعه ای از سیم پیچها به شکل میدان ایده آل دست پیدا کرد.که ما این کار را با نوشتن برنامه ای به زبان متلب انجام دادیم. در این کار از الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن این مساله که جذر میانگین مربعی نقاط نمودار میدان ایده آل و میدان طراحی شده باید کمینه باشد و همچنین تغییرات میدان طراحی شده نسبت به مکان باید کمینه باشد، استفاده کردیم. با استفاده از ۱۰ سیم پیچ با ضخامت ۱ میلیمتر و جریان ۱ آمپر به تعداد دورهای در راستای افقی و شعاعی زیر دست یافتیم که در جدول ۱ آمده است. در شکل ۳ میدان ایده ال و میدان طراحی شده را مشاهده می کنیم.

جدول۱: تعداد دورهای سیم پیچ مگنت زیمان در راستای افقی و شعاعی

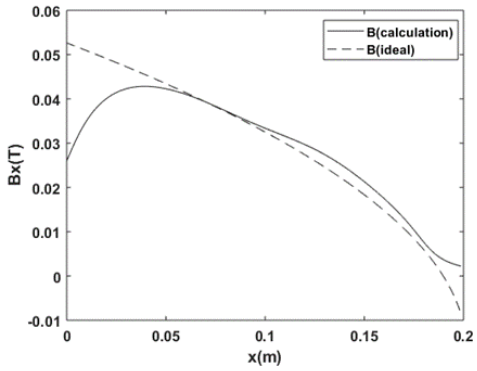
شماره سیم پیچ	تعداد دورها در راستای افقی	تعداد دورها در راستای شعاعی
1	180	5
2	173	5
3	162	4
4	148	6
5	132	5
6	85	5
7	73	5
8	52	5
9	29	5
10	18	5



شکل ۲: بالا: طرح سه بعدی مگنت زیمن طراحی شده شامل ۱۰ سیم پیچ و پایین: مقطع سیم پیچ که در آن تعداد دورهای افقی و شعاعی دیده می شود.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

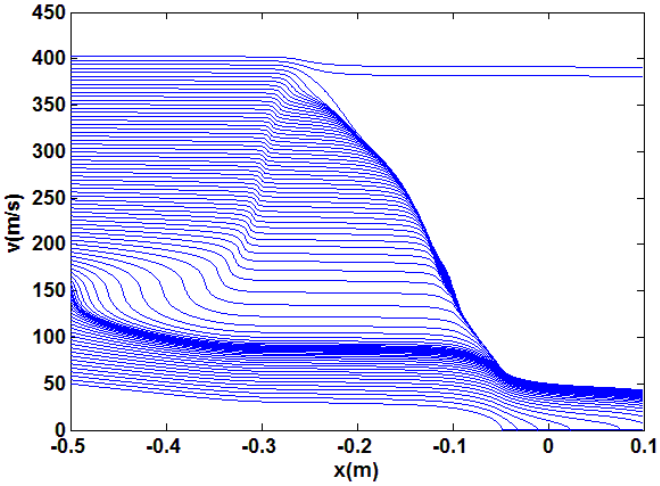


شکل ۳: بالا: میدان ایده آل و طراحی شده

برای پیدا کردن بیشینه مقدار سرعتی که با این طراحی می توان کند کرد. دینامیک حرکت اتمها شبیه سازی شد. نتیجه شبیه سازی به ازای جریان ۰.۸۲ آمپر برای هر سیم پیچ که در شکل (۴) آمده است، زیرا در این جریان تغییرات میدان طراحی شده نسبت به میدان ایده آل کمتر است، و باعث می شود که اتمها بر اثر تغییرات میدان از چرخه کندسازی خارج نشوند. در این شکل مگنت زیمن در حد فاصل x های $-0.28 < x < -0.1$ و MOT در حد فاصل x های $-0.1 < x < 0.1$ قرار دارد. مشاهده می شود که جابجایی فرکانسی ۳۲۰ مگا هرتز بهترین جابجایی فرکانسی است که می توان حرکت اتمهایی با بیشینه سرعت $\frac{m}{s}$ ۳۹۴ را ، در این کند کننده زیمن، کند کرد.

نتیجه‌گیری

برای کند سازی اتمهای ^{87}sr ، مگنت زیمنی طراحی شده است. سرعت اتمهای خروجی از کوره و ورودی به مگنت ۴۳۰ متر برثانیه، همچنین سرعت اتمهای خروجی از مگنت و سرعت ورودی به MOT، ۵۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد، ابتدا با توجه این شرایط اولیه، میدان مغناطیسی ایده آل محاسبه شد. سپس با استفاده از ترکیب مناسبی از ۱۰ سیم پیچ مگنت زیمن طراحی شد تا به این میدان ایده آل دست پیدا کنیم. در ادامه با شبیه سازی حرکت اتمها در میدان طراحی شده، به این نتیجه رسیدیم که این میدان به خوبی طراحی شده و توانایی کند سازی اتمها تا $\frac{m}{s}$ ۳۹۴ را دارا می باشد. نتایج مرجع [۶] که با شرایط اولیه یکسانی این طراحی را انجام داده است، صحت نتایج ما را تایید می کند.



شکل ۴: دینامیک حرکت اتمها در میدان طراحی شده

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی را از مرکز فن آوریهای کوانتومی ایران بابت حمایتهای انجام شده جهت انجام این تحقیق اعلام می دارد. همچنین از سرکار خانم دکتر ساره شهیدانی و جناب آقای دکتر آرم بابت راهنماییهای ایشان بسیار سپاسگزاریم.

مرجعها

[1] H. J. Metcalf, P.V.derstraten,"laser cooling and trapping", *Springer*, (*1999).*

[2] S.Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. Phillips, *Noble lectures, " for development of methods to cool and trap atoms with laser light ",1997.*

[3] P. Molenaar, P. van der Straten, H. Heideman, and H. Metcalf, "Diagnostic technique for Zeeman-compensated atomic beam slowing: Technique and results," *Phys. Rev. A,V.**55**, 605 (1997)*

[4] B. Ohayon, and G.Ron, *Rev. Sci.Instrum. 86, 103110 (2015)*

[5] ERYN C. COOK, *LASER COOLING AND TRAPPING OF NEUTRAL STRONTIUM FOR SPECTROSCOPIC MEASUREMENTS OF CASIMIR-POLDER POTENTIALS*, **PHD Thesis**, Department of Physics and the Graduate School, The University of Oregon, 2017.

[6] M. Schioppo, Development of a Transportable Strontium Optical Clock, **PHD Thesis**, Dept. Physics, Degli University, France, 2010.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]