بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تأثیر گاز میانجی بر پهن‌شدگی دوپلری گذارهای اتمی بخار فلز قلیایی در حضور میدان مغناطیسی

ملیحه رنجبران[۱]، فاضله یحیوی کوچکسرایی[۱]، محمد مهدی طهرانچی[۱و۲]، سید محمد حسین خلخالی[۳] و سیده مهری حمیدی[۱]

[۱] پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران، ایران
[۳] دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده - بررسی گذارهای اتمی فوق‌ریز و زیمان در اتم‌های قلیایی، در سال‌های اخیر کاربردهای فراوانی یافته است. در این کاربردها یکی از محدودیت‌های اندازه‌گیری دقیق فاصله‌ی ترازها، پهن‌شدگی دوپلری می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش این پهن شدگی استفاده از گاز میانجی در سلول حاوی فلز قلیایی می‌باشد. در این مقاله اثر گاز میانجی بر کاهش پهن‌شدگی ترازهای اتمی در گذار D_1 اتم‌های روبیدیوم طبیعی بررسی شده است. پرتوی نور لیزر قطبیده خطی و دایره‌ای وارد سلول حاوی روبیدیوم و گاز میانجی می‌شود و گذارهای اتمی در میدان مغناطیسی زمینه و هم چنین در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش نیمه تجربی بررسی می‌شود.

کلید واژه- فلزات قلیایی، جداشدگی زیمان، پهن‌شدگی دوپلری، گاز میانجی

Buffer gas effect on the Doppler broadening of atomic transitions of Alkali metal vapor in the presence of magnetic fields

Malihe Ranjbaran[1], Fazele Yahyavi Koochaksaraee[1], Mohammad Mahdi Tehranchi[1,2], Seyed Mohammad Hosein Khalkhali[3], Seyede Mehri Hamidi[1].

[1] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[3] Physics Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

Abstract- Investigation of hyperfine and Zeeman atomic transitions of alkali metal vapors have found numerous applications in recent years. In these applications, there are some spectral broadening, such as Doppler broadening, which affect the accuracy of measurement of energy difference between two levels. One of the preferable ways for reduction of the Doppler broadening is usage of Buffer gas in the alkali meatal vapor cell. In this paper, the effect of Buffer gas on the reduction of Doppler broadening of D_1 atomic transition of natural rubidium has been investigated. Circularly and linearly polarized beam enters the rubidium cell containing Buffer gas and atomic transitions were studied in the earth magnetic field and also an applied magnetic field with a semi experimental way.

Keywords: Alkali metal, Zeeman effect, Doppler broadening, Buffer gas

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

بررسی ترازهای فوق‌ریز و شکافتگی زیمان اتم‌های قلیایی، توجه ویژه‌ای را در پایدارسازی بسامد لیزرها، سردسازی و گیرانداختن اتمی و هم‌چنین حسگرهای مغناطیسی اتمی به خود معطوف داشته است [۱]. در حسگرهای مغناطیسی اتمی به منظور اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف، نیاز است که فاصله‌ی زیرترازهای زیمان با دقت بالایی اندازه‌گیری شود [۲]. اما وجود انواع پهن‌شدگی‌های طیفی به خصوص پهن‌شدگی دوپلری باعث ایجاد عدم قطعیت در اندازه‌گیری گذارهای اتمی مورد نظر می‌شود. در حال حاضر چیدمان اسپکتروسکوپی جذبی اشباعی [۳] و کوچک کردن سلول بخار [۴] از متداولترین روش‌های مورد استفاده به منظور کاهش پهن‌شدگی ترازهای اتمی می‌باشد که امکان تفکیک گذار بین ترازهای فوق‌ریز و زیرترازهای زیمان را فراهم می‌آورد.

روش دیگری که می‌تواند کاهش پهن‌شدگی ترازهای اتمی را به همراه داشته باشد، استفاده از گاز میانجی در سلول حاوی اتم قلیایی می‌باشد [۵]. این روش به نسبت روش‌هایی که در اسپکتروسکوپی دقت بالا استفاده می‌شود، یک روش ساده برای رسیدن به طیف اپتیکی بدون دوپلری می‌باشد. گاز میانجی معمولا شامل گازهای نجیب اتمی مانند هلیوم، نیتروژن و آرگون می‌باشد. وقتی اتم‌های روبیدیوم از میان گاز میانجی منتشر می‌شوند، برخورد اتم‌ها با یکدیگر کمتر شده، مسیر آزاد متوسط بین اتم‌ها کوتاه‌تر از نصف طول موج تشدید می‌شود (شرط دیک) و لذا پهن‌شدگی دوپلری کاهش می‌یابد [۶].

در این مقاله با بررسی عبور نور قطبیده خطی و دایره‌ای از سلول حاوی بخار فلز روبیدیوم و گاز میانجی، خطوط جذبی گذار D1 این اتم، در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی، مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین با استفاده از تحلیل‌های تئوری، گذارهای بین ترازهای اتمی فوق‌ریز و هم‌چنین زیرترازهای زیمان در حضور میدان مغناطیسی، بدست آمده و به همراه داده های تجربی، یک روش نیمه تجربی برای بررسی زیرترازهای زیمان معرفی شده است.

۲- توصیف تئوری

هر تراز انرژی فوق‌ریز (F) شامل 2F+1 زیرتراز مغناطیسی است که توزیع زاویه‌ای تابع موج الکترون را تعیین می‌کند. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی این زیرترازها تبهگن هستند. اما با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، تبهگنی آن‌ها شکسته می‌شود. تاثیر میدان مغناطیسی روی ترازهای فوق ریز یک اتم از هامیلتونی برهم‌کنش بیان می‌شود، که به صورت

$$H_B = \frac{\mu_B}{\hbar}(g_S S + g_L L + g_I I).B, \qquad (۱)$$

می‌باشد. در این هامیلتونی B میدان مغناطیسی ثابت، g_S، g_L و g_I به ترتیب فاکتور g مربوط به اسپین الکترون، اوربیتال الکترون و اسپین هسته می‌باشد.

برای میدان‌های مغناطیسی ضعیف، جداشدگی ترازها به صورت خطی می‌باشد و از رابطه‌ی

$$\Delta E_{|F,m_F\rangle} = \mu_B g_F m_F B_Z, \qquad (۲)$$

محاسبه می‌شود. مقدار تقریبی g_F از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید. جداشدگی در این محدوده را اثر زیمان می‌نامند. تقریب میدان ضعیف را زمانی می‌توان استفاده کرد که شدت میدان مغناطیسی به اندازه‌ای باشد که شرط $g_F \mu_B B = A_F$ را برآورده کند [۳].

$$g_F = g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + J(J+1)}{2F(F+1)} + g_I \frac{F(F+1) + I(I+1) - J(J+1)}{2F(F+1)} + g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + J(J+1)}{2F(F+1)}. \qquad (۳)$$

برای محاسبه‌ی مقدار دقیق جداشدگی ترازها و تغییرات آن‌ها می‌توان از قطری کردن ماتریس هامیلتونی استفاده کرد. نتیجه به صورت تحلیلی با استفاده از فرمول بریت-رابی داده شده است،

$$E(F, m_F) = -\frac{E_{hfs}}{2(2I+1)} - g_I \mu_B B m_F \pm \frac{1}{2} E_{hfs}\left(1 + \frac{4m_F}{2I+1}x + x^2\right)^{1/2}, \qquad (۴)$$

که $E_{hfs} = \frac{1}{2}A_F(2I+1)$ و $x = (g_J + G_I)\mu_B B / E_{hfs}$ می‌باشد [۳].

در رابطه‌ی (۴)، g ضریب لانده، m_F عدد کوانتومی مغناطیسی، B شدت میدان مغناطیسی، I تکانه زاویه‌ای اسپین هسته و A ثابت ساختار فوق‌ریز می‌باشد. به این ترتیب می‌توان موقعیت هر تشدید اپتیکی را برای هر زیرتراز

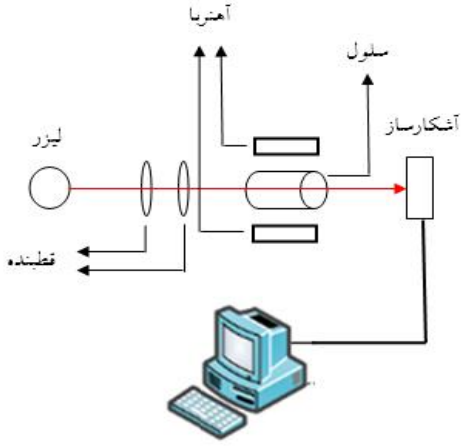
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

زیمان در میدان مغناطیسی داده شده با استفاده از رابطه‌ی (۴) محاسبه کرد.

۳- چیدمان آزمایشگاهی

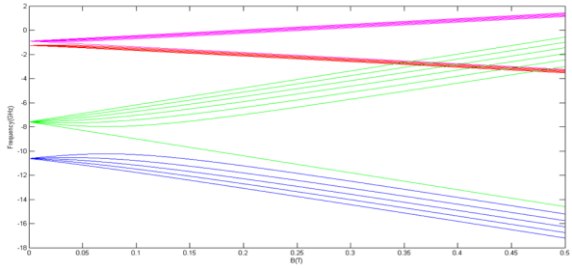
به منظور اندازه‌گیری ترازهای فوق‌ریز، پرتوی لیزر در طول موج λ=۷۹۴/۸ nm (گذار D_1) از سلول حاوی روبیدیوم طبیعی (شامل دو ایزوتوپ ^{85}Rb و ^{87}Rb) و ۵۵۰ تور گاز میانجی He عبور می‌کند. با عبور نور لیزر از این سلول، در صورتیکه بسامد لیزر با بسامد گذار بین ترازهای فوق زیر روبیدیوم برابر باشد نور لیزر جذب اتم‌های روبیدیوم شده و آن‌ها را برانگیخته می‌کند، در غیر این صورت، نور لیزر بدون جذب از سلول شیشه‌ای عبور می‌کند. بنابراین با ثبت و بررسی نور عبوری از سلول می‌توان بسامد گذارهای اتمی در ترازهای فوق‌ریز را تعیین نمود. به منظور بررسی گذار بین زیرترازهای زیمان، نور لیزر بعد از عبور از قطبنده به صورت نور قطبیده خطی و بار دیگر پس از عبور از تیغه ربع موج به صورت نور قطبیده دایره‌ای، وارد سلول بخار قلیایی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت قرار گرفته است، می‌شود و با توجه به قاعده‌ی انتخابی گذار، اتم‌های روبیدیوم را به تراز بالا برانگیخته می‌کند. میدان مغناطیسی از طریق دو آهنربای قوی که در دو طرف سلول به صورت عرضی قرار گرفته‌اند اعمال می‌شود. با تغییر فاصله‌ی آهنرباها نسبت به سلول روبیدیوم میزان میدان اعمالی به سیستم کنترل می‌شود. در نهایت با جاروب بسامد لیزر، طیف عبوری از سلول توسط آشکارساز ثبت می‌شود.



شکل ۱: چیدمان اندازه‌گیری ترازهای زیمان با استفاده از نور قطبیده خطی

۴- بحث و نتایج:

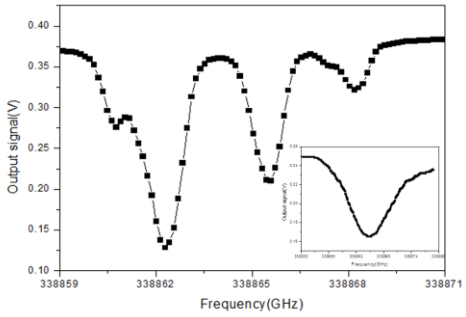
با حل معادله‌ی (۴) در میدان‌های مغناطیسی مختلف، می‌توان ساختار فوق ریز و زیمان را برای هر کدام از ایزوتوپ‌های ^{85}Rb و ^{87}Rb بدست آورد. در شکل (۲) نمودار تئوری جداشدگی زیمان برای گذار D1 روبیدیوم ۸۵ در میدان مغناطیسی صفر تا ۵۰۰ میلی‌تسلا آورده شده است.



شکل۲: ساختار فوق‌ریز ترازهای مربوط به گذار D_1 روبیدیوم ۸۵ در حضور میدان مغناطیسی خارجی

به همین ترتیب با جایگذاری پارامترهای روبیدیوم ۸۷ برای گذار خط D1 در معادله‌ی (۴) ، جداشدگی ترازهای فوق‌ریز ^{87}Rb در حضور میدان مغناطیسی خارجی بدست آمده است.

طیف نور عبوری از سلول حاوی روبیدیوم با حضور گاز میانجی و بدون آن (شکل درونی) در میدان مغناطیسی زمینه در شکل (۳) نشان داده شده است.



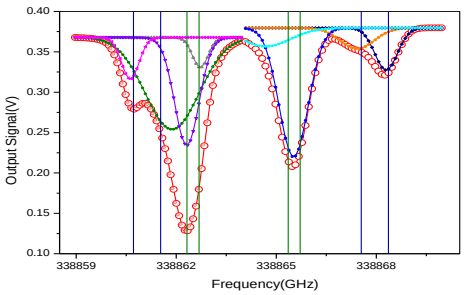
شکل ۳: طیف عبوری از سلول حاوی روبیدیوم با حضور گاز میانجی و بدون آن (شکل درونی) در میدان مغناطیسی زمینه

با استفاده از یک روش نیمه تجربی می‌توان به بسامدهای تشدیدی جذبی موجود در منحنی تجربی رسید. با استفاده از منحنی‌های تئوری، محل بیشینه‌ها را می‌توان تعیین کرد، به این صورت که در محل گذارهایی که از تئوری بدست می‌آید، بیشینه نسبت داده شود. با توجه به این که هر بیشینه در منحنی تجربی به صورت یک برهم‌نهی از دو یا چند بیشینه بدست آمده از تئوری می‌باشد، با استفاده از برنامه‌ی اریجین تعداد بیشینه‌های مجاز بدست آمده از نتایج تئوری بر منحنی‌های تجربی منطبق می‌شود تا هر بیشینه به

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

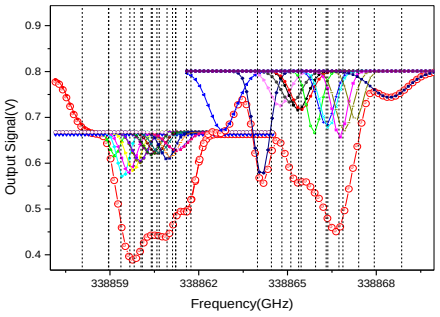
بیشینه‌های تشکیل دهنده‌اش تجزیه شده و محل دقیق بسامدهای تشدید را نشان داده شود.



شکل ۴: کل گذارهای ساختار فوق ریز روبیدیوم ۸۵ و ۸۷ در میدان مغناطیسی زمینه روی نمودار تجربی

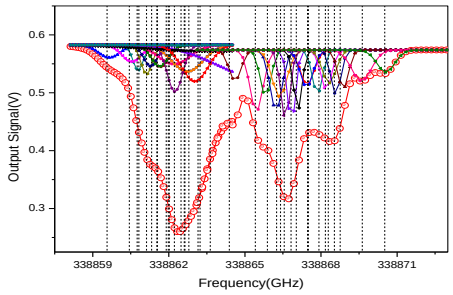
در شکل (۴) خطوط عمودی سبز مربوط به گذارهای فوق‌ریز $F_g = 2 \to F_e = 2$، $F_g = 2 \to F_e = 3$، $F_g = 3 \to F_e = 2$ و $F_g = 3 \to F_e = 3$ برای ^{85}Rb و خطوط عمودی آبی مربوط به گذارهای فوق‌ریز $F_g = 1 \to F_e = 1$، $F_g = 1 \to F_e = 2$، $F_g = 2 \to F_e = 1$ و $F_g = 2 \to F_e = 2$ برای ^{87}Rb می‌باشد.

به همین ترتیب در حضور میدان مغناطیسی گذارهای زیمان با استفاده از پرتوی لیزر با قطبش دایره‌ای چپگرد در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه این نور دارای تکانه زاویه‌ای ۱- می‌باشد، در این حالت اسپین الکترون پس از گذار باید یک واحد کاهش پیدا کند، در نتیجه گذارهایی مجاز می‌شوند که $\Delta m_F = -1$ باشد.



شکل ۵: کل گذارهای زیمان مجاز برای نور قطبیده دایره‌ای در ^{85}Rb و ^{87}Rb در میدان مغناطیسی ۱۲۹ میلی‌تسلا روی نمودار تجربی.

در حضور میدان مغناطیسی گذارهای زیمان با استفاده از پرتوی لیزر با قطبش خطی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در شکل (۶) نشان داده شده است. تفاوت این نتیجه با شکل ۵ در این نکته است که نور قطبیده خطی گذارهایی را مجاز می‌کند که $\Delta m_F = 0$ باشد.



شکل ۷: کل گذارهای زیمان مجاز برای نور خطی در روبیدیوم ۸۵ و ۸۷ در میدان مغناطیسی ۱۲۹ میلی‌تسلا روی نمودار تجربی

۵- نتایج:

با توجه به کاربرد گسترده مطالعه گذارهای اتمی در فلزات قلیایی، روش‌های بسیاری جهت کاهش پهن‌شدگی این ترازها ارائه شده است. در این مقاله، یکی از ساده‌ترین روش‌های کاهش پهن‌شدگی دوپلری جهت مطالعه ترازهای فوق ریز و زیمان مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از یک روش نیمه تجربی، متشکل از اندازه‌گیری طیف تجربی و گذارهای تعیین شده از تحلیل‌های تئوری، در عدم حضور و با اعمال میدان مغناطیسی گذارهای بین زیرترازهای زیمان با تابش نور قطبیده خطی و قطبیده دایره‌ای بدست آمد.

مراجع:

[1] V. B. Tiwari, S. Singh, S.R. Mishra, H.S. Rawat, S.C. Mehendale, “Laser frequency stabilization using Doppler-free bi-polarization spectroscopy”, Optics Communications, Vol. 263, pp. 249–255, 2006.

[2] M. Ranjbaran, M. M. Tehranchi, S. M. Hamidi, S. M. H. Khalkhali, “Harmonic detection of magnetic resonance for sensitivity improvement of optical atomic magnetometers” J. Magn. Magn. Mater, Vol. 424, PP. 284–290, 2017.

[3] J. B. Kim, H. A. Kim, H. S. Moon, H. S. Lee, “Saturated-absorption spectroscopy of weak-field Zeeman splittings in rubidium: comment”, J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 14, pp. 2946-2947, 1997.

[4] D. G. Sarkisyan, A. V. Papoyan, T. S. Varzhapetyan, K. Blush, M. Auzinsh, “Zeeman Effect on the Hyperfine Structure of the D1 Line of a Submicron Layer of 87Rb Vapor”, Optics and Spectroscopy, Vol. 96, pp. 328–334, 2004.

[5] P. Gill, “*Frequency standards and metrology*, Proceedings of the sixth symposium”, World scientific publishing Co. pp. 184, 2001.

[6] C. Audoin, B. Guinot, “*The Measurement of Time: Time, Frequency and the Atomic Clock*”, Cambridge University Press, pp. 124, 2001.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]