بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

تفکیک پذیری زیر داپلری بخار فلز روبیدیوم با استفاده از طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی لیزری

محمد مصلح[۱]، علی میرزایی قبادی[۱]، ملیحه رنجبران[۲]، سیده مهری حمیدی[۱،*]

[۱] آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۲] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

***M_hamidi@sbu.ac.ir**

چکیده - حساسیت ترازهای فوق ریز اتمی به محیط پیرامون، اندازه گیری دقیق گذارهای الکترون در ساختار فوق ریز اتم‌ها را دشوار کرده است. از جمله محدودیتهای جدی در مطالعه تجربی ساختار فوق ریز اتم ها پهن شدگی‌های موجود در محیط اتمی، بویژه پهن شدگی داپلری و برخوردی می‌باشند که باعث می‌گردند کمینه های طیفی اتم‌ها در هم ادغام شده و قابل تفکیک نباشند. در این پژوهش ما با ارایه نتایج تجربی نشان داده‌ایم که طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی بخار اتمی، تفکیک پذیری ساختار فوق ریز را به شکل قابل توجه‌ای افزایش داده است. همچنین نتایج نشان دهنده این هست که با استفاده از این روش امکان طیف سنجی از محیطهای با کمترین میزان نسبت داده به نویز نیز ممکن می‌گردد.

کلید واژه-طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی-پهن شدگی داپلری-بخار روبیدیوم-سلول مرجع بخار اتمی.

Sub Doppler spectral resolution of Rubidium vapor by frequency modulation spectroscopy

M. Mosleh[1], Ali mirzaei Ghobadi[1], M. Ranjbaran[2], S. M. Hamidi[1,*]

[1] Magneto-plasmonic Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

[2]Department of Physics, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

***m_hamidi@sbu.ac.ir**

Abstract- **Accurate measurement of atomic transition between hyperfine splitting needs complicated measurement methods, as hyperfine states are sensitive to small changes in medium. Doppler and collisional broadenings are of Best-known limitations in experimental studies of hyperfine splitting that because hyperfine spectra be not fully resolved. In this study we experimentally show that frequency modulation of atomic transitions significantly increases spectral resolution of hyperfine splitting measurement. Also, our results prove considerable increase of signal to noise ratio because of impact of FM spectroscopic method.**

Keywords: Modulation Frequency spectroscopy; Doppler Broadening; Rubidium vapor; Atomic Cell.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

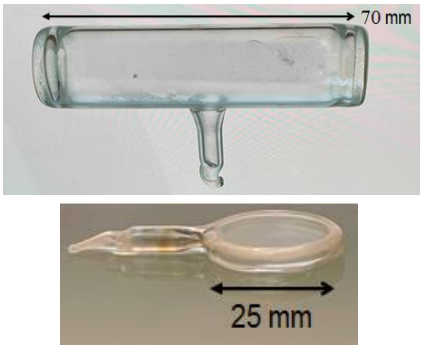
روش‌های طیف‌سنجی نوری با کمینه نوفه ممکن، پیشرفت-های زیادی را در دانش و فناوری برای انسان به وجود آورده اند. این تکنیک‌ها را می‌توان به روش‌هایی مانند پمپاژ و کاوشگر، روش‌های بدون واهلش اسپین تبادلی [۱]، طیف سنجی لیزری داخل کاواک[۲] و روش‌های طیف‌سنجی مبتنی بر مدولاسیون طبقه‌بندی کرد. از جمله در دسترس ترین این روش‌ها می‌توان به طیف سنجی با کمک مدولاسیون اشاره کرد. این روش با هدف افزایش بهره‌وری در خوانش داده و حذف تاثیر نوفه های محیطی بر خط انتقال داده است. باید توجه داشت که هر روش طیف سنجی شامل نوفه هایی از جمله نوفه‌های محیطی قابل سوار شدن بر خطوط انتقال داده، نوفه های ناشی از منبع نوری و همچنین نوفه های ناشی از آشکارسازها و مبدل ها می‌باشد. بنابراین درصورتی که نسبت داده به مجموعه نوفه ها مقدار کمی باشد، امکان تفکیک داده واقعی از نوفه وجود نخواهد داشت.

در سالهای نه چندان دور تجاری شدن لیزرهای کوک پذیر و البته با پهنای طول موجی بسیار پایین باعث شد بسیاری از پدیده ها که قبلا انتظار آن می‌رفت، به شکل تجربی مشاهده شوند.. جاروب طول موج این لیزرها با تغییر جریان و یا دمای اعمال شده به محیط بهره لیزر صورت می‌گیرد. یکی از در دسترس‌ترین روش‌ها برای مشاهده خطوط گذار اتمی طیف سنجی جذبی بخار اتمی عناصر با استفاده از این لیزرها می‌باشد، که میزان جذب اتفاق افتاده را به طول مسیر نوری و همچنین ضریب جذب ماده مربوط می‌کند.

این پژوهش به معرفی دو چیدمان آزمایشگاهی مدولاسیون شدت و مدولاسیون فرکانسی لیزر در طیف سنجی از بخار اتمی فلز روبیدیوم می‌پردازد. در ادامه نتایج تجربی به دست آمده در مطالعه میزان پهن شدگی داپلری را در سه چیدمان اپتیکی (بدون مدولاسیون، مدولاسیون شدت و مدولاسیون فرکانسی) مورد بررسی قرار خواهیم داد. پهن شدگی داپلری یکی از سهم‌های اصلی در پهنای خط طیفی در گازها در فشارهای کم است که به دلیل حرکت حرارتی مولکول‌های جاذب یا گسیلنده ایجاد می‌شود، در نتیجه این پهن شدگی فقط وابسته به فرکانس، جرم ذرات گسیل کننده و دما می‌باشد، که در اینجا معیار دما، دمای اتاق می باشد [۳]. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش طیف سنجی مبتنی بر مدولاسیون فرکانسی، باعث حذف پهن‌شدگی داپلری (سهم قالب پهن‌شدگی‌های محیط اتمی روبیدیوم) شده و قابلیت اندازه‌گیری تغییرات بسیارکم محیط بر اتم‌ها را ممکن می‌سازد.

ساخت سلول و داده برداری:

به منظور بررسی تاثیر چگالی و همچنین طول مسیر پویش نور داخل محفظه بخار روبیدیوم در میزان نسبت داده به نوفه سلول‌های بخار روبیدیوم از جنس شیشه بروسیلیکات و با روش شیشه‌گری در دو اندازه مختلف ساخته شد. سلول‌های ساخته شده به شکل استوانه‌ای و با ابعاد ۲۵×۷۰ میلیمتر (طول استوانه ۷۰ میلی متر)، ۲۰×۳ (طول استوانه ۳ میلی متر) ساخته شد. به منظور کاهش اثر پهن شدگی برخوردی و داپلری علاوه بر فلز روبیدیوم یک گاز میانجی به عنوان محیط میزبان بخار اتمی روبیدیوم به داخل سلول تزریق شد. شکل ۱ سلول های ساخته شده و مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



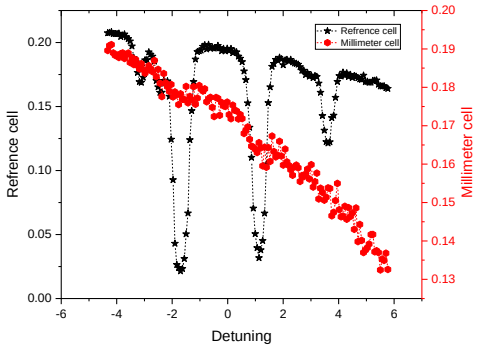
شکل ۱: از بالا سلول مرجع با ابعاد ۷۰×۲۵، و سلول میلیمتری با ابعاد ۳×۲۰ میلی متر.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

طیف سنجی جذبی مستقیم در این پژوهش با کمک لیزر DFB کوک پذیر با طول موج۷۹۴/۸ نانومتر و پهنای طول موجی ۰/۶ MHz و جاروب طول موجی با جاروب جریان الکتریکی اعمالی به لیزر صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که به رغم سادگی، این چیدمان بسیار نوفه پذیر است. نوفه هایی از جمله نوسانات دما و جریان الکتریکی لیزر، امواج الکترومغناطیسی محیطی و برق شهر، نوسانات شدت لیزر، نوفه ناشی از ادوات داخل چیدمان و ... به سادگی بر روی داده‌ها سوار شده و دقت داده برداری پایین می‌آورند. در طیف سنجی به کمک مدولاسیون شدت نور لیزر با کمک مدولاتور الکترواپتیکی لیتیوم نیوبات ($LiNbO_3$) با فرکانس ۴۱ کیلوهرتز و به شکل سینوسی مدوله شده و پس از عبور از سلول اتمی مورد نظر به آشکارساز می‌رسد. سیگنال الکتریکی به دست آمده از آشکارساز توسط دستگاه قفل کننده فازی[1] تحت عملیات پردازش سیگنال الکترونیکی قرار گرفته و داده نهایی استخراج می‌شود [۴]. همچنین به منظور اندازه‌گیری با طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی نیز جریان الکتریکی لیزر با فرکانس۴۱ کیلوهرتز به شکل سینوسی حول یک مقدار ثابت مدوله شده و همچنین میزان جریان الکتریکی در بازه متناظر با جذب روبیدیوم جاروب شد.

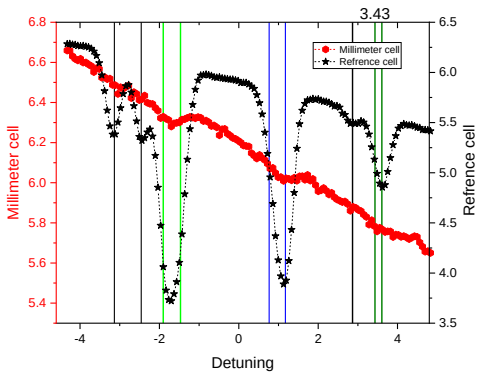
نتایج:

شکل ۲ داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری دو سلول مختلف بخار روبیدیوم با روش طیف سنجی مستقیم را نشان می‌دهد. طیف قرمز رنگ مربوط به سلول روبیدیوم با طول ۳mm و طیف مشکی رنگ مربوط به سلول با طول ۷cm می‌باشند. کمینه‌های موجود در طیف مشکی رنگ نشان‌دهنده گذارهای روبیدیوم در سلول مرجع است، که در مقایسه با داده‌های سلول میلیمتری، از قدرت سیگنال بسیار بالایی برخوردار است. این نتیجه مطابق با این واقعیت فیزیکی است که به دلیل طول مسیر اپتیکی کمتر در سلول میلیمتری، جذب رخ داده بسیار کم بوده و از میان نوفه های موجود قابل تفکیک نمی‌باشد.



شکل ۲. طیف سنجی مستقیم از سلول مرجع (مشکی و ستاره) و سلول میلیمتری (قرمز و دایره).

شکل ۳ نشان دهنده داده‌های به دست آمده با کمک مدولاسیون شدت برای سلول‌های بخار روبیدیوم می‌باشد. مقایسه این داده با شکل ۲ نشان دهنده این واقعیت است که مدولاسیون شدت تا حد قابل توجه‌ای نسبت داده به نوفه را در اندازه گیری از هر دو سلول روبیدیوم افزایش داده است. به گونه‌ای که جذب بخار روبیدیوم در سلول میلیمتری، علی‌رغم طول کم مسیر اپتیکی، با کمک مدولاسیون شدت قابل تشخیص است



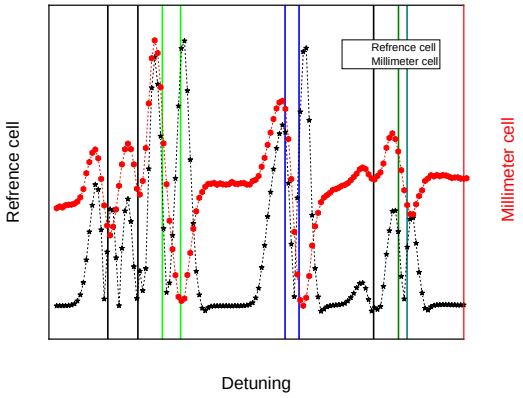
شکل ۳. طیف سنجی مدولاسیون شدت از سلول مرجع (مشکی و ستاره) و سلول میلیمتری (دایره و قرمز)

[1] Lock in amplifier

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در اندازه‌گیری با مدولاسیون شدت، افزایش طول مسیر اپتیکی تنها منجر به عمیق تر شدن کمینه های جذب می‌گردد. شکل ۴ داده نتایج طیف سنجی با کمک مدولاسیون فرکانسی از دو سلول بخار روبیدیوم را نشان می‌دهد. مقایسه داده‌های شکل ۴ با داده‌های شکل ۲ و ۳ به خوبی نشان می‌دهد که برخلاف دو اندازه‌گیری قبلی برای سلول روبیدیوم با طول ۳mm، که سطح داده به نوفه قابل توجه نبود. اندازه گیری با مدولاسیون فرکانسی مقدار نوفه‌های مخرب را به شکل قابل توجهی کاهش داده و حساسیت

اندازه گیری را افزایش داده است



شکل ۴. داده اندازه گیری با مدولاسیون فرکانسی از سلول مرجع (ستاره و مشکی) و سلول میلیمتری (دایره و قرمز).

در نمودار داده‌های تجربی.جذب متناظز با هر گذار با خطوط عمود رنگی نشان داده شده است. برای وضوح بیشتر گذارهای با انرژی نزدیکتر با خطوط هم‌رنگ نشان داده شده است. همانطور که در داده مربوط به طیف سنجی مدولاسیون شدت دیده می‌شود گذارهای مجاور در هم ادغام شده و جذب حاصل به شک یک کمینه نمایان شده است. داده‌های متناظر با اندازه‌گیری مدولاسیون فرکانسی به خوبی نشان می‌دهد که جذب ناشی از گذارهای اتمی به شکل مشتق کمینه جذب ظاهر شده است. دقت در داده-های مشکی رنگ شکل ۴ مربوط به سلول روبیدیوم با طول ۷cm به خوبی نشان دهنده این نکته است که هر کمینه جذب روبیدیوم به دو قسمت تقسیم شده و به ازای هر خط رنگی معادل یک گذار اتمی، یک منحنی به شکل مشتق وجود دارد. این در حالی است که داده قرمز رنگ مربوط به سلول میلیمتری همچنان نشان دهنده یک سیگنال به ازای گذارهای نزدیک به هم است. این به این معناست که در طیف سنجی با مدولاسیون فرکانسی بر خلاف طیف سنجی با مدولاسیون شدت، افزایش طول مسیر اپتیکی منجر به افزایش تفکیک پذیری طیفی شده است. عامل اصلی از بین برنده تفکیک پذیری طیفی در اندازه گیری با روش طیف سنجی مستقیم و مدولاسیون شدت پهن شدگی داپلری است که باعث ادغام کمینه های جذب با انرژی‌های بسیار نزدیک به هم است.

نتیجه گیری:

مقایسه داده‌های به دست آمده از دو روش طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی و شدت نشان می‌دهد که طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی به طرز قابل توجهی دقت اندازه گیری را افزایش داده و تفکیک پذیری طیفی را در محیط با پهن شدگی غالب داپلری به میزان ملموسی بهبود می‌بخشد.

مرجع‌ها

[1] J. C. Allred, R. N. Lyman, T. W. Kornack, and M. V. Romalis, “High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation”, Phys. Rev. Lett. Vol. 89, No. 13, pp.130801-130804, 2002.

[2] G. Katsoprinakis, D. Petrosyan, and I. K. Kominis, “High frequency atomic magnetometer by use of electromagnetically induced transparency”, Phys. Rev. Lett. Vol. 97, No. 23, pp.230801-230804, 2006.

[3] Bordo, Vladimir G, Rubahn, Horst-Günter. *Optics and spectroscopy at surfaces and interfaces*. John Wiley & Sons, 2008.

[4] Demtroder, Wolfgang. *Laser spectroscopy*: vol. 2: experimental techniques. Springer Science & Business Media, 2008

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]