



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<sup>۱</sup>، علی میرزایی قبادی<sup>۱</sup>، ملیحه رنجبران<sup>۲</sup>، سیده مهری حمیدی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> 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 اتمها 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 توجهی 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 می گردد. 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<sup>1</sup>, Ali mirzaei Ghobadi<sup>1</sup>, M. Ranjbaran<sup>2</sup>, S. M. Hamidi<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Magneto-plasmonic Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>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.

## مقدمه

روش‌های طیف‌سنجی نوری با کمینه نوفه ممکن، پیشرفت‌های زیادی را در دانش و فناوری برای انسان به وجود آورده‌اند. این تکنیک‌ها را می‌توان به روش‌هایی مانند پمپاژ و کاوشگر، روش‌های بدون واهلش اسپین تبادل [۱]، طیف‌سنجی لیزری داخل کاواک [۲] و روش‌های طیف‌سنجی مبتنی بر مدولاسیون طبقه‌بندی کرد. از جمله در دسترس‌ترین این روش‌ها می‌توان به طیف‌سنجی با کمک مدولاسیون اشاره کرد. این روش با هدف افزایش بهره‌وری در خوانش داده و حذف تاثیر نوفه‌های محیطی بر خط انتقال داده است. باید توجه داشت که هر روش طیف‌سنجی شامل نوفه‌هایی از جمله نوفه‌های محیطی قابل سوار شدن بر خطوط انتقال داده، نوفه‌های ناشی از منبع نوری و همچنین نوفه‌های ناشی از آشکارسازها و مبدل‌ها می‌باشد. بنابراین در صورتی که نسبت داده به مجموعه نوفه‌ها 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 پدیده‌ها که قبلاً انتظار آن می‌رفت، به شکل تجربی مشاهده شوند. جاروب طول موج این لیزرها با تغییر جریان و یا دمای اعمال شده به محیط بهره‌لیزر صورت می‌گیرد. یکی از در دسترس‌ترین روش‌ها برای مشاهده خطوط گذار اتمی طیف‌سنجی 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.

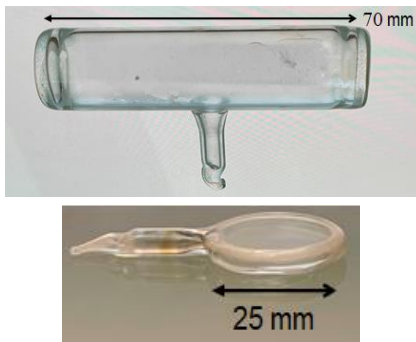
این پژوهش به معرفی دو چیدمان آزمایشگاهی مدولاسیون شدت و مدولاسیون فرکانسی لیزر در طیف‌سنجی از بخار اتمی فلز روبیدیوم می‌پردازد. در ادامه نتایج تجربی به دست آمده در مطالعه میزان پهن‌شدگی داپلری را در سه چیدمان اپتیکی (بدون مدولاسیون، مدولاسیون شدت و مدولاسیون

فرکانسی) مورد بررسی قرار خواهیم داد. پهن‌شدگی 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 پهن‌شدگی فقط وابسته به فرکانس، جرم ذرات گسیل‌کننده و دما می‌باشد، که در اینجا معیار دما، دمای اتاق می‌باشد [۳].

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش طیف‌سنجی مبتنی بر مدولاسیون فرکانسی، باعث حذف پهن‌شدگی داپلری (سهم قالب پهن‌شدگی‌های محیط اتمی روبیدیوم) شده و قابلیت اندازه‌گیری تغییرات بسیار کم محیط بر اتم‌ها را ممکن می‌سازد.

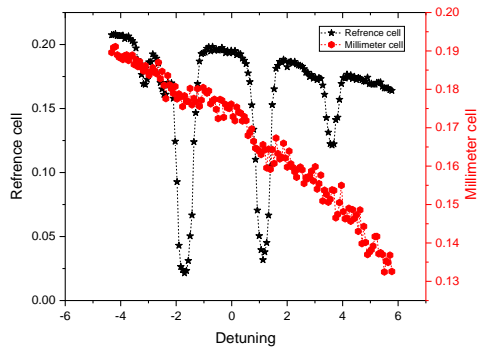
## ساخت سلول و داده برداری:

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 بروسلیکات و با روش شیشه‌گری در دو اندازه مختلف ساخته شد. سلول‌های ساخته شده به شکل استوانه‌ای و با ابعاد  $70 \times 25$  میلی‌متر (طول استوانه ۷۰ میلی‌متر)،  $3 \times 25$  (طول استوانه ۳ میلی‌متر) ساخته شد. به منظور کاهش اثر پهن‌شدگی برخوردی و داپلری علاوه بر فلز روبیدیوم یک گاز میانجی به عنوان محیط میزبان بخار اتمی روبیدیوم به داخل سلول تزریق شد. شکل ۱ سلول‌های ساخته شده و مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



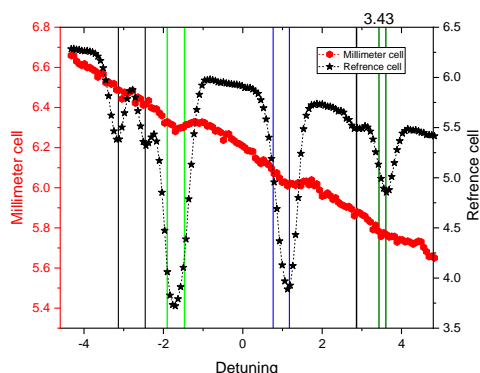
شکل ۱: از بالا سلول مرجع با ابعاد  $25 \times 70$ ، و سلول میلیمتری با ابعاد  $20 \times 3$  میلی‌متر.

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 نمی باشد.



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

شکل ۳ نشان دهنده داده های به دست آمده با کمک مدولاسیون شدت برای سلول های بخار روبیدیوم می باشد. مقایسه این داده با شکل ۲ نشان دهنده این واقعیت است که مدولاسیون شدت تا حد قابل توجهی نسبت داده به نوفه را در اندازه گیری از هر دو سلول روبیدیوم افزایش داده است. به گونه ای که جذب بخار روبیدیوم در سلول میلیمتری، علی رغم 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)

طیف سنجی جذبی مستقیم در این پژوهش با کمک لیزر DFB کوک پذیر با طول موج ۷۹۴/۸ 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 داده ها سوار شده و دقت داده برداری پایین می آورند. در طیف سنجی به کمک مدولاسیون شدت نور لیزر با کمک مدولاتور الکترواپتیکی لیتیوم نیوبات ( $\text{LiNbO}_3$ ) با فرکانس ۴۱ کیلوهرتز و به شکل سینوسی مدوله شده و پس از عبور از سلول اتمی مورد نظر به آشکارساز می رسد. سیگنال الکتریکی به دست آمده از آشکارساز توسط دستگاه قفل کننده فازی<sup>۱</sup> تحت عملیات پردازش سیگنال الکترونیکی قرار گرفته و داده نهایی استخراج می شود [۴]. همچنین به منظور اندازه گیری با طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی نیز جریان الکتریکی لیزر با فرکانس ۴۱ 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 داده های به دست آمده از اندازه گیری دو سلول مختلف بخار روبیدیوم با روش طیف سنجی مستقیم را نشان می دهد. طیف قرمز رنگ مربوط به سلول روبیدیوم با طول ۳mm و طیف مشکی رنگ مربوط به سلول با طول ۷cm می باشند. کمینه های موجود در طیف مشکی رنگ نشان دهنده گذارهای روبیدیوم در سلول مرجع است، که در مقایسه با داده های سلول میلیمتری، از قدرت سیگنال بسیار بالایی برخوردار است. این نتیجه مطابق با این واقعیت

<sup>۱</sup>Lock in amplifier

$\gamma$ cm 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 انرژی های بسیار نزدیک به هم است.

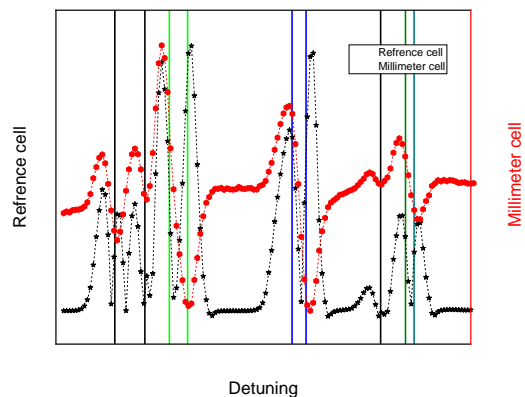
### نتیجه گیری:

مقایسه داده های به دست آمده از دو روش طیف سنجی مدولاسیون فرکانسی و شدت نشان می دهد 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 می بخشد.

### مرجع ها

- [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

همچنین می توان نتیجه گرفت که در اندازه گیری با مدولاسیون شدت، افزایش طول مسیر اپتیکی تنها منجر به عمیق تر شدن کمینه های جذب می گردد. شکل ۴ داده نتایج طیف سنجی با کمک مدولاسیون فرکانسی از دو سلول بخار روبیدیوم را نشان می دهد. مقایسه داده های شکل ۴ با داده های شکل ۲ و ۳ به خوبی نشان می دهد که برخلاف دو اندازه گیری قبلی برای سلول روبیدیوم با طول ۳mm، که سطح داده به نوبه قابل توجه نبود. اندازه گیری با مدولاسیون فرکانسی مقدار نوبه های 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 داده های تجربی، جذب متناظر با هر گذار با خطوط عمود رنگی نشان داده شده است. برای وضوح بیشتر گذارهای با انرژی نزدیکتر با خطوط هم رنگ نشان داده شده است. همانطور که در داده مربوط به طیف سنجی مدولاسیون شدت دیده می شود گذارهای مجاور در هم ادغام شده و جذب حاصل به شک یک کمینه نمایان شده است. داده های متناظر با اندازه گیری مدولاسیون فرکانسی به خوبی نشان می دهد 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