

## پیاده سازی چیدمان قفل لیزر بر روی گذار اتمی با روش Sub-Doppler DAVLL

INC29-1331

محمد کرمی، زهرا حیدری نسب، فرخ سررشته داری\*

آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید مغناطیسی، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

## چکیده:

در بسیاری از کاربردهای حوزه اتمی و مولکولی مانند سردسازی و به دام اندازی لیزری، تداخل سنجی اتمی، ساعت اتمی، حسگرهای اتمی، گرانش سنجی کوانتومی و... نیازمند لیزرهای پایدار و قفل شده بر روی یک گذار خاص اتمی می‌باشیم. در این راستا روش‌های مختلفی برای قفل لیزر وجود دارند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. روش قفل لیزر با دو رنگی بخار اتمی زیر حد داپلری (Sub-Doppler DAVLL) ترکیبی از دو روش اسپکتروسکوپی جذب اشباعی (Saturated absorption spectroscopy) و دو رنگی بخار اتمی (Dichroic atomic vapor laser lock) است که مزایای این دو روش را جمع می‌کند. با این تکنیک امکان قفل لیزر بر روی گذارهای فوق ریز اتمی با دقت و حساسیت بسیار بالا فراهم می‌گردد. در کار حاضر با پیاده سازی چیدمان لازم، یک لیزر قابل تنظیم با کاواک خارجی با روش دو رنگی بخار اتمی زیر حد داپلری بر روی گذارهای خط D1 اتم سزیم قفل شده است. همچنین نشان داده شده است که سیگنال خطای حاصل از بکارگیری این روش نسبت به روش DAVLL شیب گذر از صفر بزرگتری دارد که منجر به حساسیت بالاتر این روش در قفل لیزر می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** لیزر با کاواک خارجی، قفل لیزر برگذار اتمی، پایدارسازی لیزر، جذب اشباعی، دو رنگی بخار اتمی زیر حد داپلری.

**Implementation of Sup-Doppler DAVLL laser lock on atomic transition**

M. Karami, Z. Heydari Nasab, F. Sarreshtedari\*

Magnetic Resonance Research Laboratory, Physics Department, Tehran University, Tehran, Iran.

**Abstract:**

Stabilized and locked lasers on atomic transitions have many applications in atomic physics experiments like laser cooling and trapping, Atomic interferometry, Atomic clock, Atomic sensors, Quantum gravimetry and etc. There are different techniques for laser locking, each of them has its own advantages and disadvantages. Laser locking by Sup-Doppler DAVLL method is a combination of the saturation absorption spectroscopy and dichroic atomic vapor laser lock techniques and has the advantages of both these methods. Using this technique, it is possible to lock the laser on hyperfine atomic transitions with a high stability and sensitivity. In this work, implementing the Sup-Doppler DAVLL setup, we have locked an extended cavity diode laser on Cesium D1 line hyperfine transition. It is shown that the obtained error signal in Sup-Doppler DAVLL has larger slope with respect to DAVLL which results in more stabilized laser locking.

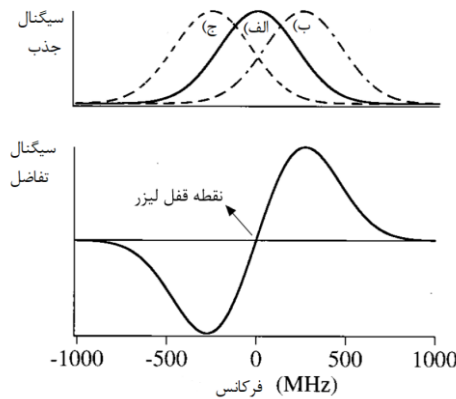
**Keywords:** External cavity diode laser, laser lock on atomic transition, Laser frequency stabilization, saturation absorption, Sup-Doppler DAVLL

## ۱. مقدمه

پایدارسازی و قفل لیزر بر روی یک گذار خاص اتمی در بسیاری از آزمایش‌های اتمی مانند سردسازی لیزری، تداخل‌سنجی اتمی، ساعت‌های اتمی، پنجره شفافیت الکترومغناطیسی و ... حائز اهمیت می‌باشد. چرا که در اغلب این آزمایش‌ها، نیاز به اندرکنش کنترل شده لیزر و ترازهای مشخص اتمی می‌باشد. در این راستا برای قفل نمودن لیزر نیازمند ایجاد یک سیگنال خطا هستیم به نحوی که گذر از صفر آن دقیقاً منطبق بر طول موج گذار اتمی مورد نظر باشد. این سیگنال خطا وارد یک سیستم کنترل کننده می‌شود و فیدبک‌های لازم جهت تنظیم پارامترهای لیزر را ایجاد می‌کند. روش‌های مختلفی برای ایجاد این سیگنال خطا مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله آنها می‌توان به اسپکتروسکوپی جذب اشباعی [۱]، اسپکتروسکوپی قطبشی [۱، ۲]، دو رنگی بخار اتمی (DAVLL) [۳-۸]، مدولاسیون و دمدولاسیون [۹-۱۱] و ... اشاره کرد. هر یک از روشهای ذکر شده دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند و لذا در کاربردهای مختلف باتوجه به ملاحظات مختلف روش خاصی انتخاب می‌شود. به‌عنوان مثال چیدمان بعضی روش‌ها ساده‌تر است و با امکانات کمتری قابل پیاده سازی است و در عوض مشخصات قفل قابل دستیابی محدودیت‌هایی دارد. این در حالی است که بعضی روش‌ها نیازمند چیدمان مفصل‌تری شامل EOM، AOM، مدارهای الکترونیک مفصل‌تر و ... می‌باشند. به‌عنوان مثال در روش دمدولاسیون و دمدولاسیون که از روش‌های بسیار رایج قفل لیزر می‌باشد، با مدوله کردن جریان دیود لیزر و یا میدان مغناطیسی در داخل سلول اتمی جذب دریافتی نیز مدوله می‌شود و در نهایت با مدوله کردن سیگنال جذب، سیگنال خطای مورد نیاز برای قفل لیزر ایجاد و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورت به‌کارگیری دمدولاسیون جریان دیود، به‌کارگیری این روش همراه با ایجاد نویز اضافی بر روی نور خروجی مورد استفاده برای آزمایش می‌باشد. لذا این روش برای کاربردهای حساس قابل استفاده نیست اما برای کاربردهایی مانند لیزر پمپاژ اپتیکی در سردسازی اتمی که تنها قرار است اتمها را از یک تراز مشخص خالی نماید، کاملاً مناسب است. دو روش رایج دیگر برای قفل لیزر دو رنگی بخار اتمی (DAVLL) و اسپکتروسکوپی جذب اشباعی می‌باشند. هر یک از این روشها نیز مزایا و معایبی دارند. روش دو رنگی بخار اتمی زیر حد داپلری (Sub-Doppler DAVLL) که در مقاله حاضر مورد توجه قرار گرفته است، روشی است که ترکیبی از روش DAVLL و اسپکتروسکوپی جذب اشباعی بشمار می‌رود و مزایای هر دوی آنها را دارد. این روش قفل لیزر برای کاربردهای حساس اتمی که نیاز به قفل دقیق و پایدار بر روی گذار اتمی دارند، بسیار مناسب است. لازم به ذکر است که این روش قفل لیزر تاکنون بر روی اتم‌های مختلفی مانند سزیم [۱۲]، روبیدیوم [۱۳، ۱۴]، لیتیوم [۱۵] و ... پیاده سازی شده است. در ادامه ابتدا به مبانی علمی این روش قفل اشاره می‌شود و سپس به چیدمان پیاده سازی و نتایج حاصل می‌پردازیم.

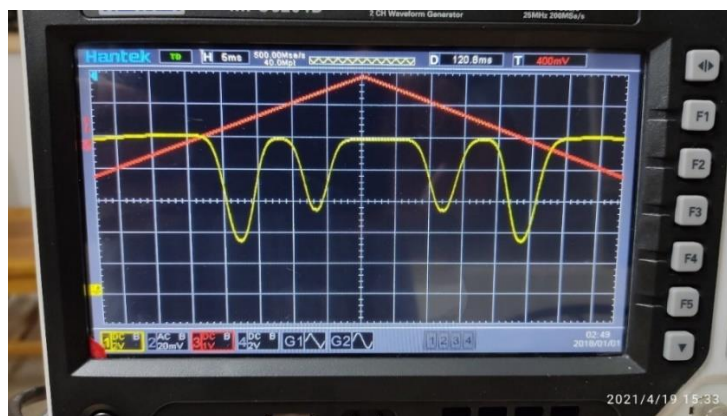
## ۲. مبانی علمی روش Sub-Doppler DAVLL

همانطور که اشاره شد، روش قفل لیزری Sub-Doppler DAVLL ترکیبی از روش دو رنگی بخار اتمی (DAVLL) و جذب اشباعی می‌باشد. لذا برای توضیح مبانی این روش لازم است ابتدا به اصول DAVLL و جذب اشباعی اشاره‌ای داشته باشیم. در روش DAVLL با اعمال میدان مغناطیسی به سلول اتمی و جداسازی ترازهای زمین؛ ضریب جذب محیط برای نور با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد متفاوت می‌شود (شکل ۱). حال با عبور یک باریکه با قطبش خطی (که ترکیبی از قطبش دایروی چپگرد و راستگرد می‌باشد) از داخل سلول اتمی و جدا کردن این دو قطبش و مشاهده بر روی دو آشکارساز مجزا می‌توان این جداسازی را مشاهده کرد. با تفاضل این دو سیگنال از یکدیگر می‌توان سیگنال خطای مورد نیاز برای قفل لیزر را به‌دست آورد.



شکل ۱: ایجاد سیگنال خطا با روش DAVLL. الف) خط جذب در غیاب میدان مغناطیسی. ب) خط جذب نور دایروی چپگرد در حضور میدان مغناطیسی. ج) خط جذب نور دایروی راستگرد در حضور میدان مغناطیسی. د) تفاضل دو سیگنال ب و ج.

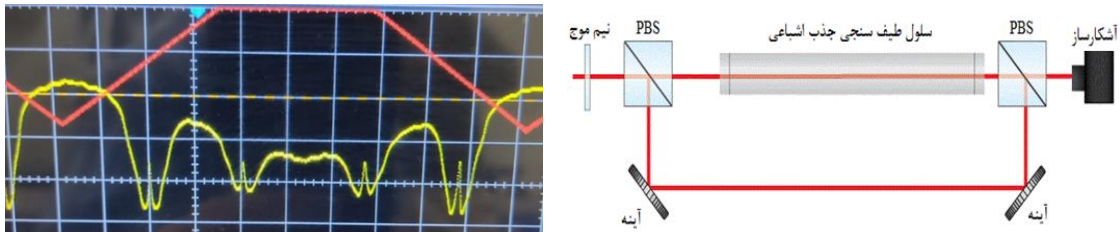
محدودیت اصلی روش DAVLL، پهنای داپلری بزرگ خطوط جذب اتمی در دمای محیط است که موجب می‌شود در بسیاری موارد نتوان لیزر را با این روش بر گذارهای فوق ریز اتمی قفل کرد. همانطور که میدانیم به دلیل توزیع سرعت اتم‌ها، برهمکنش لیزر و اتم‌ها در یک بازه فرکانسی حول فرکانس مرکزی تشدید امکان‌پذیر است که موجب پهن شدن داپلری در خطوط جذب می‌شود. پهن شدن داپلری وابستگی زیادی به دمای سلول دارد و برای فلزات قلیایی در دمای اتاق چیزی در حدود ۴۰۰ مگاهرتز است [۱۶]. حال اگر فاصله بین گذارهای اتمی به اندازه کافی زیاد باشند گذارها از هم قابل تفکیک می‌باشند و لذا می‌توان با روش DAVLL لیزر را بر روی هر یک از آن گذارها قفل کرد. به عنوان مثال در شکل ۲ گذار از تراز فوق ریز پایه  $F=3$  به دو تراز فوق ریز برانگیخته ( $F=3$  و  $F=4$ ) اتم سزیم (خط  $D1$ ) مشاهده می‌شود. چون فاصله بین این دو گذار حدود ۱٫۲ گیگاهرتز بوده و به اندازه کافی بزرگتر از پهنای داپلری است، می‌توان لیزر را با روش DAVLL بر روی هر یک از آنها قفل کرد. اما در بسیاری موارد فاصله بین گذارهای فوق ریز کمتر از (یا در حدود) پهنای داپلری اتم‌ها می‌باشد، و لذا گذارهای مزبور در هم ادغام می‌شوند و در نتیجه قفل لیزر بر روی تک تک گذارها با روش DAVLL امکان‌پذیر نمی‌باشد. علاوه بر این محدودیت مهم، پهنای داپلری گذارها موجب می‌شود که سیگنال خطا در گذر از صفر (نقطه قفل لیزر) شیب کمی داشته باشد که واضحا تأثیری منفی در پایداری قفل لیزر دارد.



شکل ۲: اسپکتروسکوپی جذبی اتم سزیم (خط  $D1$ ) با استفاده از لیزر ECDL ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید مغناطیسی. سیگنال قرمز رنگ مربوط به جاروب طول موج (و تریگر اسیلوسکوپ) است و سیگنال زرد رنگ، جذبه‌های اتمی از تراز فوق ریز پایه  $F=3$  به دو تراز فوق ریز برانگیخته ( $F=3$  و  $F=4$ ) اتم سزیم (خط  $D1$ ) را نشان می‌دهد.

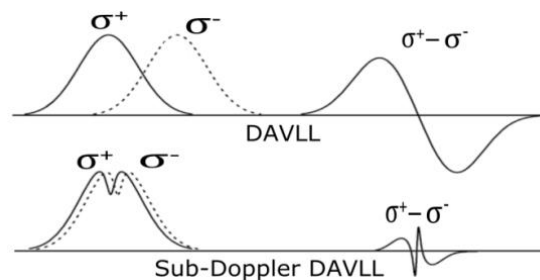
برای حل این مشکل و ایجاد امکان قفل لیزر بر روی گذارهای فوق ریز از روش جذب اشباعی استفاده می‌شود. در چیدمان جذب اشباعی باریکه لیزر ورودی به دو باریکه پروب و پمپ تقسیم شده (توان باریکه پمپ بسیار بیشتر از باریکه پروب است) و باریکه پمپ خلاف جهت باریکه پروب از داخل سلول اتمی عبور داده می‌شود. اتم‌هایی که دارای سرعتی

در راستای انتشار باریکه پروب (خلاف راستای انتشار باریکه پروب) می‌باشند، فرکانس باریکه پروب را کمتر (بیشتر) از فرکانس واقعی لیزر و فرکانس باریکه پمپ را بیشتر (کمتر) از فرکانس واقعی لیزر می‌بینند. لذا هنگامی که فرکانس لیزر در مقداری باشد که این اتم با باریکه پروب برهمکنش داشته باشد، دیگر با باریکه پمپ برهمکنشی ندارد. اما اتم‌هایی که دارای سرعت صفر هستند همزمان با باریکه پمپ و پروب برهمکنش خواهند داشت و شدت بیشتر باریکه پمپ باعث می‌شود این دسته از اتم‌ها به تراز برانگیخته بروند و به حالت اشباع در بیایند و باریکه پروب نتواند با آن‌ها برهمکنشی داشته باشد. به کارگیری این تکنیک موجب از بین رفتن اثر داپلر و مشاهده پیک‌های جذب اشباعی با پهنای بسیار باریک (در حد پهنای طبیعی) می‌شود. نمونه‌ای از پیک‌های جذب اشباعی برای گذارهای تراز فوق ریز پایه  $F=3$  به دو تراز فوق ریز برانگیخته ( $F'=4$  و  $F'=3$ ) اتم سزیم (خط D1) در شکل ۳ نشان داده شده است. در روش معمول قفل لیزر با جذب اشباعی (بدون استفاده از EOM یا AOM)، با مدولاسیون جریان دیود و دمودولاسیون نور خروجی، سیگنال خطا جهت قفل لیزر بر روی پیک دلخواه که مربوط به گذار فوق ریز مشخصی می‌باشد، فراهم می‌گردد. همانطور که ذکر شد، این روش در ازای سادگی چیدمان، نویزی (ناشی از مدولاسیون) بر روی باریکه لیزر ایجاد می‌کند که به کارگیری آن را در کاربردهای حساس محدود می‌نماید.



شکل ۳: سمت راست: شماتیک چیدمان استفاده شده برای اسپکتروسکوپی جذب اشباعی. سمت چپ: سیگنال جذب اشباعی خط D1 اتم سزیم.

روش قفل لیزری Sub-Doppler DAVLL از مزایای دو روش ذکر شده (DAVLL و جذب اشباعی) بهره می‌برد. در شکل ۴ نحوه ایجاد سیگنال خطا در روش Sub-Doppler DAVLL و مقایسه آن با سیگنال خطای DAVLL نشان داده شده است.

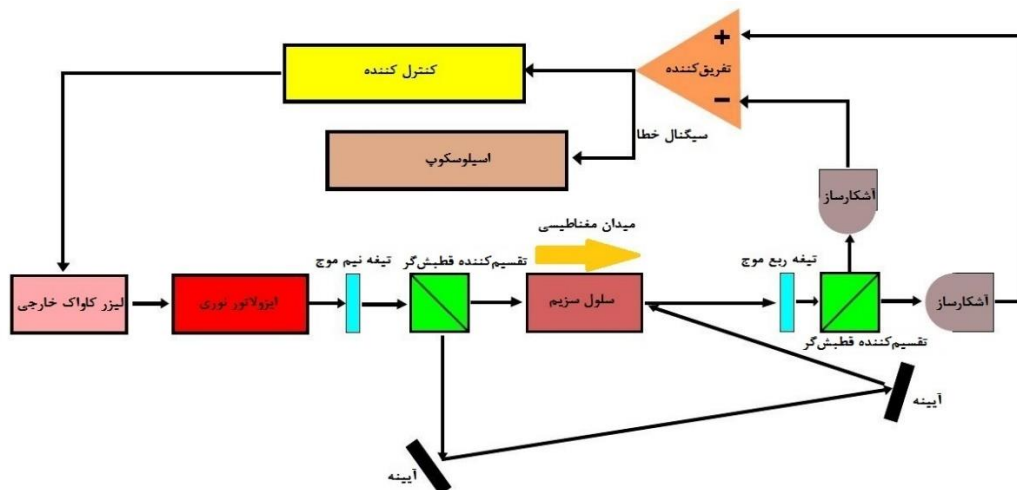


شکل ۴ نحوه ایجاد سیگنال خطا در روش Sub-Doppler DAVLL و مقایسه آن با سیگنال خطای DAVLL [۱۳].

همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، در غیاب میدان مغناطیسی دو سیگنال جذب اشباعی دریافت شده (مربوط به قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد) کاملاً یکسان و بریکدیگر منطبق هستند ولی با اعمال میدان مغناطیسی، خطوط جذب مزبور از هم جدا می‌شوند. با تفاضل این دو سیگنال جذب از یکدیگر می‌توان سیگنال خطای Sub-Doppler DAVLL را ایجاد کرد که نسبت به سیگنال خطای DAVLL شیب بسیار بزرگتری دارد و در نتیجه با این روش می‌توان قفل لیزر را با حساسیت بیشتری انجام داد. حساسیت بیشتر قفل به این معنی است که تغییرات کوچک در فرکانس موجب سیگنال خطای بزرگتری می‌گردد که در نتیجه سیستم فیدبک سریع‌تر تغییرات را جبران کرده و لیزر را به نقطه قفل بر می‌گرداند. این روش قفل در کاربردهای مختلف اتمی مانند سردسازی اتمی [۱۷، ۱۸]، ایجاد پنجره شفافیت الکترومغناطیسی [۱۹] و بسیاری موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

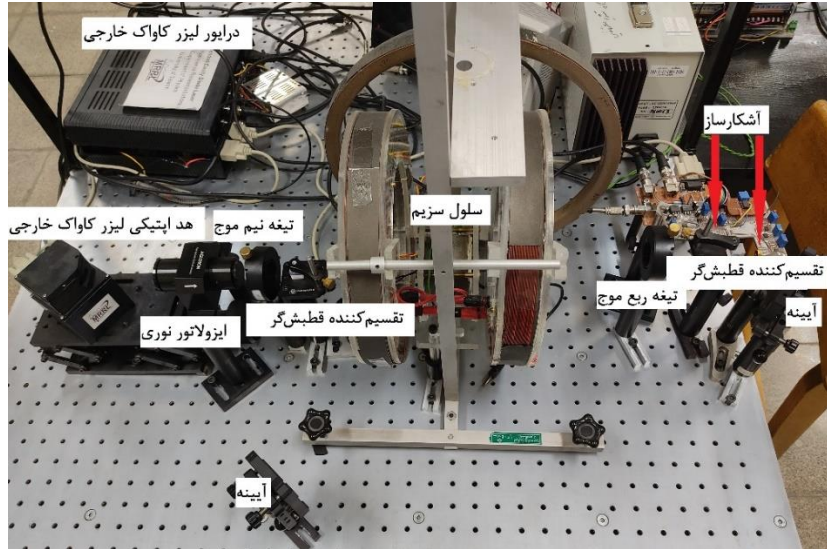
## ۳. پیاده سازی چیدمان قفل لیزر با روش Sub-Doppler DAVLL

در شکل ۵ شماتیکی از چیدمان قفل لیزر با روش Sub-Doppler DAVLL و در شکل ۶ تصویری از پیاده سازی آزمایشگاهی آن نشان داده شده است. در این چیدمان از یک لیزر قابل تنظیم با کاواک خارجی استفاده شده است که طول موج آن ۸۹۵ نانومتر و منطبق با گذار D1 اتم سزیم می‌باشد. با قرار دادن یک ایزولاتور فارادی مانع از برگشت نور به داخل لیزر می‌شویم. پس از آن با استفاده از یک تیغه نیم موج و یک عدد تقسیم کننده نوری قطبش گر<sup>۱</sup> شدت باریکه پمپ و پروب را به نحوی تنظیم می‌کنیم که شدت باریکه پمپ بسیار بیشتر از شدت باریکه پروب باشد. در این آزمایش توان باریکه پمپ ۰٫۸ میلی وات و نسبت توان باریکه پروب به پمپ ۱:۴۰ می‌باشد. باریکه پروب به طور مستقیم از داخل سلول اتمی عبور کرده و باریکه پمپ خلاف جهت باریکه پروب از داخل سلول عبور داده می‌شود. باریکه پروب دارای قطبش خطی و به صورت ترکیبی از نور با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد می‌باشد. پس از عبور از سلول اتمی، با استفاده از یک تیغه ربع موج قطبش دایروی چپگرد و راستگرد به قطبش‌های خطی عمود بر هم تبدیل می‌شوند و با استفاده از یک تقسیم کننده قطبش گر دیگر آنها را به صورت جداگانه توسط دو فوتودتکتور (سیلیکونی با زمان پاسخ ۱۰ نانو ثانیه) آشکار می‌نماییم. لازم به ذکر است که به منظور تنظیم مشخصات سیگنال خطا، امکان تنظیم بهره و آفست سیگنال در مدار آشکارساز فراهم شده است. شکل ۷ سیگنال خطای حاصل شده از پیاده سازی چیدمان Sub-Doppler DAVLL را برای گذار D1 line ( $F=3$  to  $F'=4$ ) اتم سزیم نشان می‌دهد.

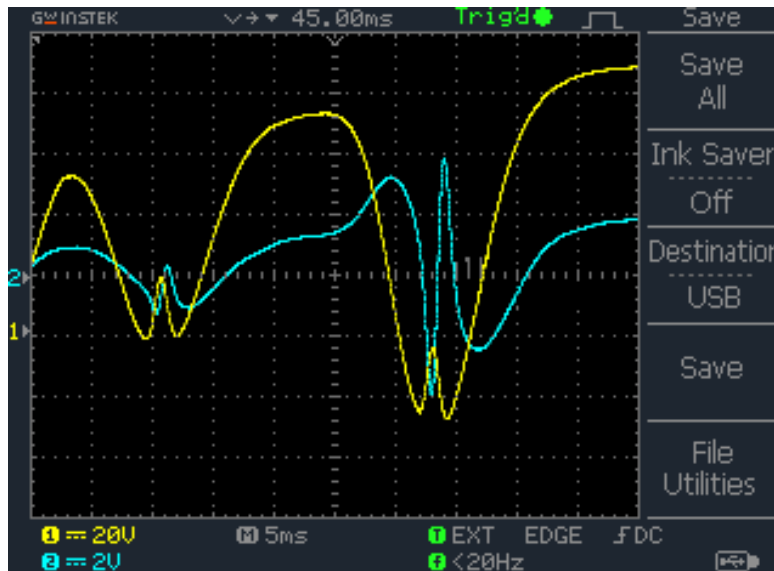


شکل ۵: شماتیک چیدمان قفل لیزر به روش Sub-Doppler DAVLL.

<sup>1</sup> Polarizing Beam Splitter

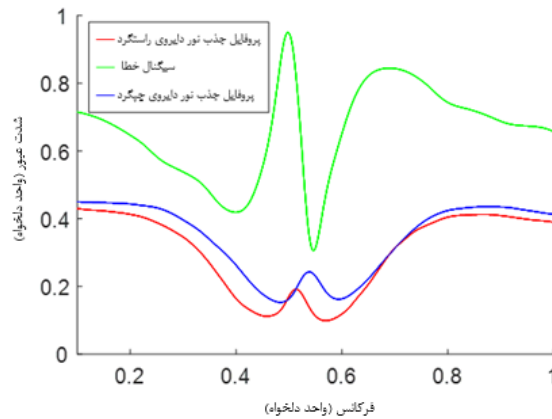


شکل ۶: چیدمان آزمایشگاهی قفل لیزر به روش Sub-Doppler DAVLL



شکل ۷: سیگنال زرد رنگ: جذب اشباعی گذار های  $F=3$  به  $F'=3$  و  $F'=4$  از خط D1 سزیم، آشکار شده در خروجی یکی از آشکارسازهای چیدمان شکل ۶. سیگنال آبی رنگ: سیگنال خطای حاصل شده از تفاضل خروجی دو آشکارساز چیدمان مذکور.

برای بررسی دقیق تر سیگنال خطای مربوط به یک گذار خاص، با کم کردن دامنه جاروب پیزوالکتریک کنترل کننده لیزر (جاروب فرکانس)، می توان لیزر را به نحوی تنظیم کرد که تنها خط جذب مورد نظر مشاهده شود. در شکل ۸ سیگنال های جذب اشباعی مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد با رنگهای آبی و قرمز و همچنین سیگنال خطا (حاصل شده از تفاضل دو سیگنال مذکور) با رنگ سبز برای گذار  $F=3$  به  $F'=4$  از خط D1 سزیم مشاهده می گردد. همانطور که مشاهده می شود در حضور میدان مغناطیسی خطوط آبی رنگ و قرمز رنگ بر یکدیگر منطبق نیستند و البته از کم کردن این دو سیگنال، سیگنال خطا به دست می آید.



شکل ۸: سیگنالهای جذب اشباعی مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد و همچنین سیگنال خطا برای گذار  $F=3$  به  $F=4$  از خط D1 سزیم.

سیگنال خطای به دست آمده دارای پهنای حدود ۲۰ مگاهرتز می‌باشد. همچنین می‌توان با تنظیم دقیق‌تر میدان مغناطیسی شیب و دامنه‌ی سیگنال خطا را بهینه کرد [۲۰]. در این آزمایش با تنظیم جریان کویل هلمهولتز و اعمال میدان مغناطیسی حدود ۲۰ گاوس، دامنه و شیب سیگنال خطا بهینه شده است. در شکل ۸ سیگنال خطای DAVLL نیز قابل مشاهده می‌باشد، که در صورت حذف باریکه پمپ می‌تواند به عنوان سیگنال خطا مورد استفاده قرار بگیرد. در واقع سیگنال خطای DAVLL همان منحنی سبز رنگ بدون تغییرات بین دو اکستریم ابتدایی و انتهایی می‌باشد. همانطور که مشخص است پهنای سیگنال خطای مربوط به روش sub-Doppler DAVLL نسبت به روش DAVLL کوچکتر و شیب آن بزرگتر است و در نتیجه حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات فرکانس لیزر دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این کار ضمن بیان مبانی علمی و اصول پیاده سازی تجربی Sub-Doppler DAVLL، یک لیزر ECDL با این روش بر روی گذارهای خط D1 جذب اتم سزیم قفل شده است. نشان داده شده است که شیب گذر از صفر سیگنال خطایی که با این روش به دست می‌آید به مراتب بزرگتر از شیب سیگنال خطای روش DAVLL است و لذا نسبت به DAVLL حساسیت و پایداری بهتری دارد. این در حالی است که در این روش به دلیل استفاده از اسپکتروسکوپی جذب اشباعی و حذف پهنای داپلری، امکان قفل بر گذارهای فوق ریز اتمی با پهنای بسیار کم (در حدود پهنای خط طبیعی) نیز فراهم می‌باشد. در این روش بر خلاف روش مدولاسیون، نویزی بر روی باریکه نور ایجاد نمی‌شود و تنها با اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت امکان قفل لیزر با حساسیت بالا فراهم می‌شود و لذا برای بکارگیری در آزمایش‌های مختلف اتمی و مولکولی بسیار کارآمد می‌باشد.

#### ۵. مراجع

- Demtröder, W., Laser spectroscopy: vol. 2: experimental techniques. Vol. 2. 2008: Springer Science & Business Media.
- Wieman, C. and T.W. Hänsch, Doppler-free laser polarization spectroscopy. Physical Review Letters, 1976. 36(20): p. 1170.
- Corwin, K.L., et al., Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor. Applied Optics, 1998. 37(15): p. 3295-3298.
- Kim, J.I., et al., Frequency-stabilized high-power violet laser diode with an ytterbium hollow-cathode lamp. Optics letters, 2003. 28(4): p. 245-247.
- Millett-Sikking, A., et al., DAVLL lineshapes in atomic rubidium. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2006. 40(1): p. 187.
- Yin, S., et al., Observation and optimization of DAVLL spectra on the  $^1S_0-3P_1$  transition of neutral mercury atom. Optics Communications, 2012. 285(24): p. 5169-5174.

7. Ghashghaei, F., et al., Effect of the magnetically induced dichroism on the distribution of atomic polarization in Cesium vapor cells. *Advanced Optical Technologies*, 2020. 9(4): p. 209-215.
8. Su, D.-Q., et al., Laser frequency stabilization in sub-nanowatt level using nanofibers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018. 51(46): p. 465001.
9. Couturier, L., et al., Laser frequency stabilization using a commercial wavelength meter. *Review of Scientific Instruments*, 2018. 89(4): p. 043103.
10. Zi, F., et al., Laser frequency stabilization by combining modulation transfer and frequency modulation spectroscopy. *Applied Optics*, 2017. 56(10): p. 2649-2652.
11. Jia, F., et al., Frequency stabilization method for transition to a Rydberg state using Zeeman modulation. *Applied Optics*, 2020. 59(7): p. 2108-2113.
12. Su, D.-Q., et al., Application of sub-Doppler DAVLL to laser frequency stabilization in atomic cesium. *Applied optics*, 2014. 53(30): p. 7011-7016.
13. Petelski, T., et al., Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking. *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, 2003. 22(2): p. 279-283.
14. Wasik, G., et al., Laser frequency stabilization by Doppler-free magnetic dichroism. *Applied Physics B*, 2002. 75(6): p. 613-619.
15. Rowan, M.E., *Doppler-Free Saturated Fluorescence Spectroscopy of Lithium Using a Stabilized Frequency Comb*. 2013, Oberlin College.
16. Steck, D.A., *Cesium D line data*. 2003.
17. Jung, K., Y. Yamamoto, and S. Hasegawa, Development of multiple laser frequency control system for Ca+ isotope ion cooling, in *TCP 2014*. 2017, Springer. p. 39-51.
18. Valenzuela, V., L. Hernández, and E. Gomez, High power rapidly tunable system for laser cooling. *Review of Scientific Instruments*, 2012. 83(1): p. 015111.
19. Lopez, H.E.G., Tunable delay of photons using electromagnetically induced transparency in cesium vapor.
20. Heydarinasab, Z., M. Karami, and F. Sarreshtedari, Investigation of the error signal characterization in sub-Doppler DAVLL laser stabilization. submitted Dec 2022.