



بررسی تأثیر دما و شدت میدان مغناطیسی بر مشخصه فیلتر طیف اتمی در گذار D1 سزیم

محمد کرمی، سعید گلشن خواص و فرخ سررشته داری*

آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید مغناطیسی، دانشکده فیزیک، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

پست الکترونیکی: f.sarreshtedari@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۸/۱۷)

چکیده

فیلتر طیف اتمی فاراده، یک فیلتر میان‌گذر باریک اپتیکی است که کاربردهای زیادی در سامانه‌های مختلف کوانتومی و لیزری دارد. در این فیلترها با مهندسی پارامترهای سامانه از جمله دمای گاز و همچنین شدت میدان مغناطیسی می‌توان فیلتر را با پهنای طیفی و میزان عبور مشخص طراحی کرد. در این کار یک فیلتر طیف اتمی برای طول موج گذار D1 سزیم (۸۹۴/۶ نانومتر) پیاده‌سازی و مشخصه‌یابی شده و تأثیر پارامترهای سامانه در مشخصات فیلتر به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نور عبوری از فیلتر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد سلول و میدان مغناطیسی ۳۹۰ گوس حاصل می‌شود که در این شرایط فیلتری به صورت تک قله و با پهنای ۰/۲۴ گیگاهرتز ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فیلتر طیف اتمی، گذار D1 سزیم، اثر فاراده، اسپکتروسکوپی جذب اتمی

۱. مقدمه

و تأثیری که در کاهش نوفه دارند باعث می‌شود کاربردهای زیادی داشته باشند. به عنوان مثال می‌توان به لیدار جووی [۹-۱۲]، لیدار بریلیم [۱۳ و ۱۴]، سرعت‌سنجی داپلر [۱۵ و ۱۶]، ارتباطات فضای آزاد [۱۷]، اپتیک کوانتومی [۱۸]، فیلتر کردن نور رامان [۱۹]، محدودسازی اپتیکی [۲۰] و پایدارسازی بسامد لیزر [۲۱-۲۵] اشاره کرد. فیلترهای فاراده به صورت آزمایشگاهی روی اتم‌های نئون [۲۶]، کلسیم [۲۷]، سدیم [۲۱، ۲۲، ۲۸-۳۲]، پتاسیم [۱۶، ۳۳ و ۳۴]، روبیدیوم [۳۵-۳۷] و سزیم [۲۰، ۳۸ و ۳۹] پیاده‌سازی شده است. در این مقاله به بررسی تجربی فیلتر فاراده برای خط جذب

اثر فاراده در محیط‌های گازی کاربردهای فراوانی دارد که از آن بین می‌توان به درهم‌تنیدگی ماکروسکوپیک بسامد [۱]، اندازه‌گیری با پهنای گیگاهرتز [۲]، تصویربرداری غیرمخرب [۳]، اندازه‌گیری میدان مغناطیسی [۴]، طراحی لیزرهای پایدار [۵ و ۶] و ساخت ایزولاتورهای اپتیکی [۷] اشاره کرد. یکی دیگر از کاربردهای مهم اثر فاراده، ساخت فیلترهای باریک میان‌گذر اپتیکی با پهنای گیگاهرتز است که اصطلاحاً به آنها فیلترهای طیف اتمی^۱ می‌گویند [۸]. پهنای باریک این فیلترها

۱. Atomic spectral line filter

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 + \chi'_{\pm} + i \chi''_{\pm}} \approx \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{\chi'_{\pm} + i \chi''_{\pm}}{2} \right), \quad (1)$$

در این رابطه c سرعت نور در خلأ، ω بسامد نور و χ'_{\pm} و χ''_{\pm} مولفه‌های حقیقی و موهومی ضریب حساسیت الکتریکی است. لازم به ذکر است که این رابطه برای غلظت‌های پایین گاز برقرار است [۴۱]. بعد از عبور نور با قطبش تصادفی از قطبشگر اول نور قطبیده خطی خارج می‌شود که در اینجا قطبش نور خروجی را در راستای x در نظر می‌گیریم. می‌دانیم نور با قطبش خطی را می‌توان به صورت مجموع نورهای با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد نوشت (رابطه ۲)

$$\hat{x} = -\frac{\hat{+} - \hat{-}}{\sqrt{2}}, \quad \hat{y} = i \frac{\hat{+} + \hat{-}}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

که در این رابطه $\hat{+}$ و $\hat{-}$ به ترتیب بیانگر قطبش دایروی راستگرد و چپگرد هستند. رابطه (۳) میدان الکتریکی‌ای که وارد سلول گاز اتمی می‌شود را یک میدان تک فام در نظر می‌گیریم که در ابتدای سلول مقدار z برابر صفر است.

$$E(z, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\varepsilon(z, \omega) e^{-i\alpha z} + \varepsilon^*(z, \omega) e^{i\alpha z} \right], \quad (3)$$

با توجه به رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) برای نور خروجی از سلول به طول L داریم:

$$\varepsilon(L, \omega) = -\frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp \left(i \left\{ \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{\chi'_{+}}{2} + \frac{i \chi''_{+}}{2} \right) L \right\} \right) \hat{+} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp \left(i \left\{ \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{\chi'_{-}}{2} + \frac{i \chi''_{-}}{2} \right) L \right\} \right) \hat{-}, \quad (4)$$

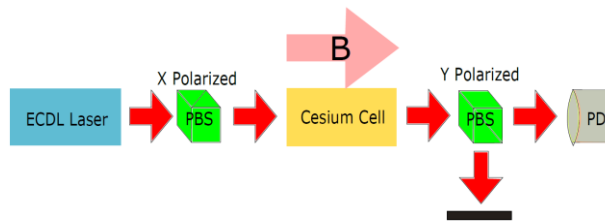
با توجه به این که قطبشگر دوم در راستای y است، نور خروجی از قطبشگر دوم به صورت رابطه (۵) توصیف می‌شود:

$$\xi(v) = \frac{|\hat{x} \cdot \hat{y}|^2}{E_0^2} = \frac{1}{4} \left\{ \exp \left(-\frac{\omega}{c} \chi''_{+} L \right) + \exp \left(-\frac{\omega}{c} \chi''_{-} L \right) \right\} - \frac{1}{4} \left\{ \exp \left(-\frac{\omega}{c} \frac{\chi''_{+} + \chi''_{-}}{2} L \right) \cos \left(\frac{\omega}{c} \frac{\chi'_{+} - \chi'_{-}}{2} L \right) \right\}, \quad (5)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۲) و (۴) میزان چرخش قطبش نور مطابق رابطه (۶) به دست می‌آید که آن را چرخش فاراده می‌نامیم.

$$\theta_F = \frac{\omega}{c} \frac{\chi'_{+} - \chi'_{-}}{2} L = \frac{\pi}{2\lambda} (\chi'_{+} - \chi'_{-}) L = \frac{\pi}{\lambda} (\Delta n) L, \quad (6)$$

که در این رابطه L طول سلول، λ طول موج نور و Δn بیانگر اختلاف ضریب شکست برای قطبش دایروی چپگرد و



شکل ۱. طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش.

D1 سزیم پرداخته شده و تأثیر پارامترهای مختلف سامانه از جمله دما و شدت میدان مغناطیسی روی ضریب عبور و پهنای فیلتر مورد بررسی قرار گرفته است. فیلتر فاراده پیاده سازی شده روی گذار D1 سزیم (۸۹۴ نانومتر) می‌تواند در آزمایش‌های مختلف اپتیک کوانتومی که از این گذار اتمی استفاده می‌کنند بسیار مفید باشد [۴۰].

۲. مبانی علمی

به طور ساده فیلتر طیف اتمی فاراده از دو قطبشگر خطی و یک سلول گاز اتمی که در میان قطبشگرها قرار گرفته است، تشکیل می‌شود. قطبشگرها به نحوی تنظیم می‌شوند که جهت قطبش آنها نسبت به یکدیگر عمود باشد (شکل ۱). با اعمال میدان مغناطیسی در راستای انتشار نور، بر اثر شکافتگی زیمن ترازهای تبهگن اتمی جدا می‌شوند و تفاوت علامت ضریب لانده (g) برای ترازهای مختلف باعث می‌شود که بسامد گذار برای نور دایروی چپگرد و راستگرد متفاوت شود. بنابراین نور قطبیده دایروی چپگرد و راستگرد تغییر فاز متفاوتی را احساس می‌کنند، که در نهایت منجر به چرخش قطبش نور ورودی می‌شود. حالت آرمانی، چرخش ۹۰ درجه‌ای قطبش نور به واسطه اثر فاراده است که نور قطبیده شده توسط قطبشگر اول به طور کامل از قطبشگر دوم عبور کند. برای محاسبه ضریب عبور فیلتر، ضریب حساسیت الکتریکی^۱ محیط را به شکل $\chi_{\pm}(\omega) = \chi'_{\pm} + i \chi''_{\pm}$ در نظر می‌گیریم که علامت‌های \pm مربوط به راستگرد و یا چپگرد بودن قطبش نور است. همچنین می‌توان عدد موج را با توجه به ضریب شکست محیط به صورت رابطه (۱) تعریف کرد.

۱. Electric susceptibility



شکل ۲. تصویر چیدمان آزمایش.

PBS دیگر (در راستای عمود بر PBS قبلی) برخورد می‌کند و شدت نور خروجی توسط فوتودیود اندازه‌گیری می‌شود. به منظور تغییر دمای گاز اتمی، یک محفظه گرمکن شامل سیم پیچ طراحی شده است که سلول را در برمی‌گیرد. با کنترل جریان سیم پیچ و همچنین به‌کارگیری یک مدار ترموستات، دمای سلول تنظیم شده و ثابت نگه داشته می‌شود. لازم به ذکر است که در طراحی سیم پیچ گرم‌کننده به گونه‌ای عمل شده است که عبور جریان الکتریکی، حداقل میدان مغناطیسی ممکن را در داخل سلول ایجاد کند و تأثیری در مشخصه یابی سیستم نداشته باشد. در این مقاله تأثیر میدان مغناطیسی و دما روی مشخصات فیلتر فاراده مورد ارزیابی واقع شده است. برای ایجاد میدان مغناطیسی از سیم پیچ هلمهولتز دو محوره با شعاع‌های ۱۰ و ۱۶ سانتی‌متر استفاده شده که با تنظیم جریان سیم پیچ‌ها، میدان مغناطیسی یکنواخت با مقدار مورد نظر در محل سلول ایجاد کند. به وسیله شبیه‌سازی با COMSOL و همچنین به‌کارگیری یک مگنتومتر AMR برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی پایین و یک مگنتومتر اثر هال برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بالا، ضریب تبدیل ولتاژ اعمالی به پیچه‌ها به میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آنها (با توجه به ابعاد، تعداد دور و مقاومت الکتریکی) محاسبه شد. این ضریب برای جفت پیچه با میدان مغناطیسی در راستای انتشار نور برابر با ۱۹۵۰ میلی‌گوس بر ولت و برای جفت پیچه با میدان مغناطیسی در راستای عمود بر انتشار نور برابر با ۴۰۸/۱۶ میلی‌گوس بر ولت به دست آمده است. به منظور تأمین ولتاژهای بالا برای ایجاد

راست‌گرد است. همچنین با توجه به شکافتگی زیمن ترازها، Δn از رابطه (۷) حاصل می‌شود [۴۲]:

$$\Delta n = \frac{fg\mu B}{\hbar\Gamma}, \quad (7)$$

که در این رابطه g ضریب لانده، μ مگنتون بوهر، B شدت میدان مغناطیسی و Γ پهنای جذبی نور است که معمولاً توسط پهنای داپلری به دست می‌آید و حدود چند صد مگاهرتز است.

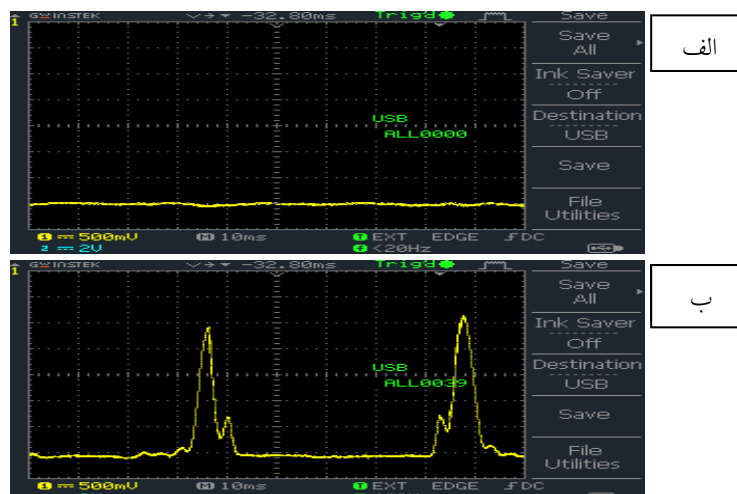
۳. روش آزمایش

چیدمان آزمایش از یک لیزر قابل تنظیم^۱ ECDL (ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید مغناطیسی)، یک سلول گاز سزیم، دو باریکه‌شکن قطبشی نور (PBS) و یک سامانه هلمهولتز دو محوره جهت ایجاد میدان مغناطیسی تشکیل شده است. در شکل ۱ طرحواره‌ای از چیدمان سامانه و در شکل ۲ تصویری از پیاده‌سازی سامانه مذکور نشان داده شده است.

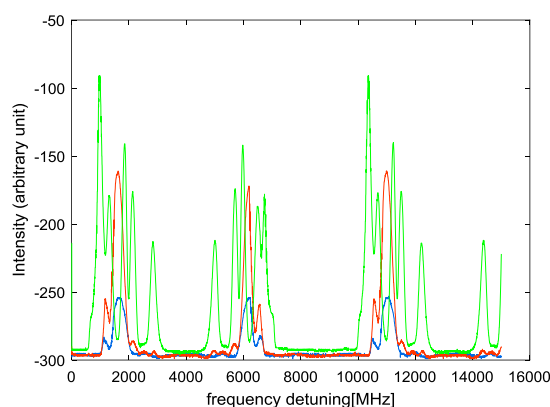
منبع نوری مورد استفاده، یک لیزر قابل تنظیم ECDL در طول موج خط جذب D1 اتم سزیم (۸۹۴/۶ نانومتر) است که قابلیت قفل پایدار روی هر یک از گذارهای اتمی و همچنین جاروب طول موج را دارد که برای مشخصه‌یابی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چیدمان آزمایش از PBS^۲ به عنوان قطبشگر نور استفاده شده است. باریکه نور پس از خروج از لیزر به یک PBS برخورد کرده و نور عبوری با قطبش خطی وارد سلول گازی می‌شود. پس از عبور نور از سلول به یک

۱. Extended cavity diode laser

۲. Polarizing beam splitter



شکل ۳. سیگنال خروجی فوتودیود (الف) بدون اعمال میدان مغناطیسی و (ب) با اعمال میدان ۳۹۰ گوس.



شکل ۴. تغییرات مشخصه فیلتر بر حسب دما برای میدان ۳۹۰ گوس. نمودار آبی: دمای ۳۰ درجه، نمودار قرمز: دمای ۴۰ درجه و نمودار سبز: دمای ۵۰ درجه.

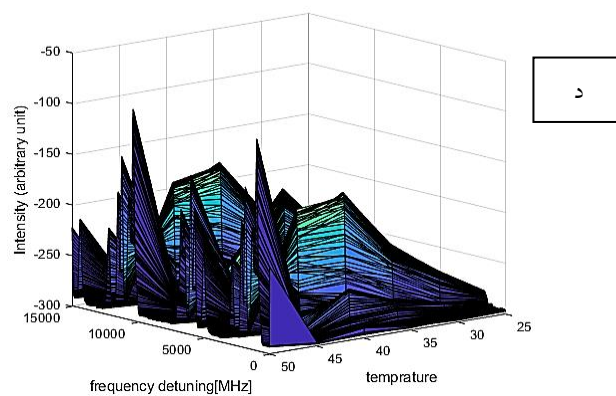
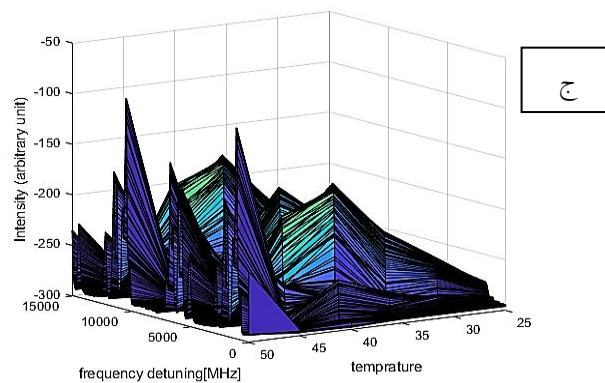
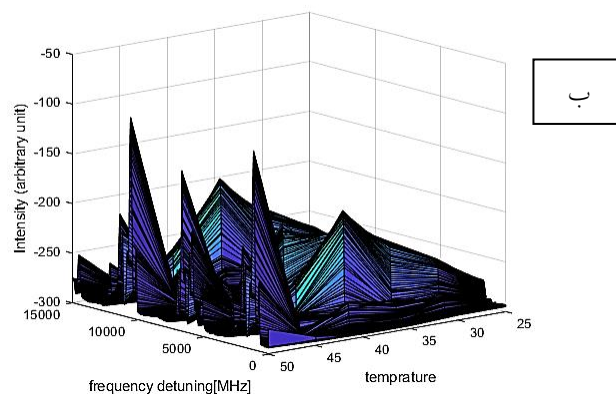
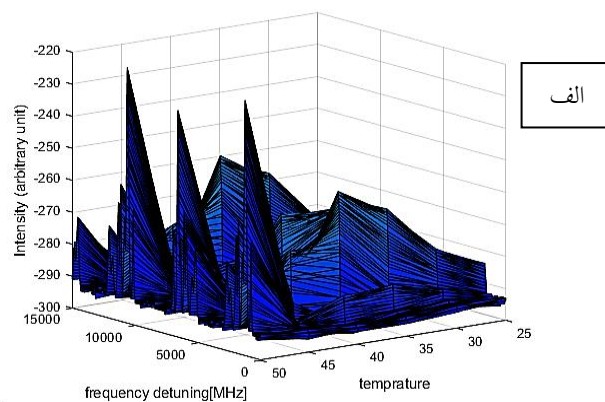
در این شکل‌ها، محور افقی طول موج را نشان می‌دهد که توسط لیزر ECDL جاروب می‌شود. محور عمودی نیز شدت نور خروجی سیستم است که توسط فوتودیود ثبت می‌شود. همان طور که به خوبی ملاحظه می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی، یک فیلتر بسامدی ایجاد شده که اصطلاحاً فیلتر طیف اتمی فاراده نامیده می‌شود.

مشخصات فیلتر طیف اتمی به دمای گاز و میدان مغناطیسی اعمالی وابستگی زیادی دارد. برای بررسی این موضوع نتیجه مشخصه اندازه گیری شده فیلتر در سه دمای ۳۰ درجه، ۴۰ درجه و ۵۰ درجه در شکل ۴ قابل مشاهده است. در شکل ۵ تغییر مشخصه فیلتر بر حسب دمای گاز برای

میدان مغناطیسی مورد نیاز و متغیر با استفاده از یک واریاک، پل دیود، خازن و ترانس مداری طراحی شد تا برق متناوب شهری به ولتاژ DC تبدیل شود. ولتاژ خروجی از ۲۰۰ تا ۲۰ ولت بر روی سیم پیچ‌ها اعمال شد تا میدان مورد نیاز تأمین شود.

۴. نتایج اندازه گیری و بحث

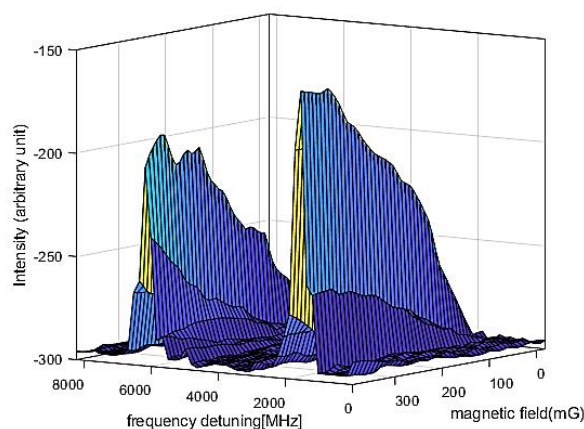
در شکل ۳ مشخصه اندازه گیری شده فیلتر طیف اتمی فاراده برای میدان ۳۹۰ گوس و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. در شکل ۳ الف سیگنال خروجی فوتودیود بدون اعمال میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود و در شکل ۳ ب سیگنال فوتودیود با اعمال میدان ۳۹۰ گوس مشاهده می‌شود.



شکل ۵. تأثیر دما روی مشخصه فیلتر طیف اتمی (الف) میدان مغناطیسی ۷۸ گوس، (ب) میدان مغناطیسی ۱۷۵/۵ گوس، (ج) میدان مغناطیسی ۲۹۲/۵ گوس و (د) میدان مغناطیسی ۳۹۰ گوس.

جدول ۱. تغییرات FWHM بر حسب دما.

FWHM(MHZ)	دما (درجه سانتی گراد)
۲۹۲/۶۴۳۳	۲۵
۲۳۲/۶۱۳۹	۳۰
۲۴۷/۶۲۱۲	۳۵
۲۴۰/۱۱۷۶	۴۰
۱۲۷/۵۶۲۴	۴۵
۱۱۲/۵۵۵۱	۵۰



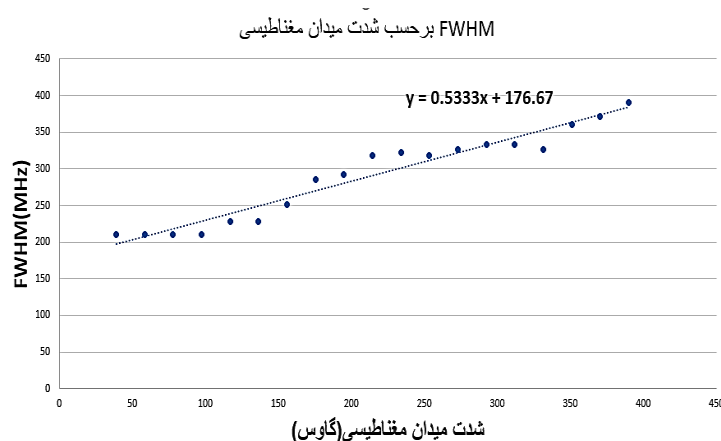
شکل ۶. میزان عبور فیلتر با افزایش ولتاژ از ۰ تا ۲۰۰ ولت (معادل ۳۹۰ گوس).

واقع گذارهایی که در دماهای بالاتر تفکیک شده و پهنای کمی دارند، با کاهش دما با یکدیگر ادغام می‌شوند و تبدیل به تعداد قله‌هایی کمتر اما با پهنای بزرگ‌تر می‌شوند. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از روند تغییر مشخصات فیلتر با دما با نتایج گروه‌های دیگر تحقیقاتی در این زمینه نیز در تطابق است [۴۳]. برای بررسی کمی تأثیر میدان مغناطیسی بر مشخصات فیلتر، با ثابت نگهداشتن دما، شدت میدان مغناطیسی اعمالی (در راستای انتشار نور) را از ۰ تا ۳۹۰ گوس تغییر دادیم. نتایج در دمای ۴۰ درجه در شکل ۶ قابل مشاهده است. میزان عبور فیلتر با افزایش شدت میدان مغناطیسی در راستای انتشار نور، افزایش می‌یابد که به دلیل چرخش بیشتر قطبش و در نتیجه عبور بیشتر از قطبشگر دوم است.

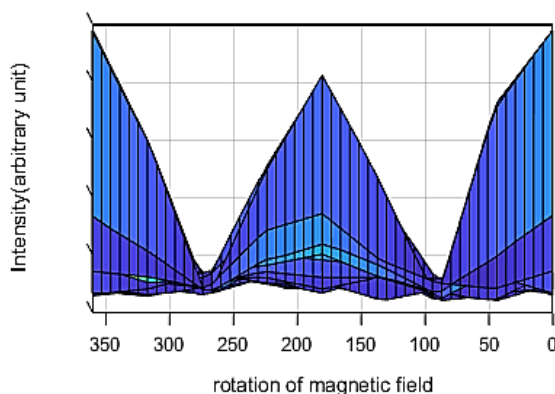
نتایج اندازه‌گیری پهنای فیلتر طیف اتمی (FWHM) با تغییر شدت میدان مغناطیسی در نمودار شکل ۷ آورده شده است.

میدان‌های متفاوت آمده است. با بررسی این اندازه‌گیری‌ها دو نتیجه مهم به دست می‌آید. تا دمای حدود ۴۰ درجه، با افزایش دما میزان عبور فیلتر افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش مشارکت اتم‌های سزیم در برهمکنش است. پس از آن تا دمای ۵۰ درجه شدت کاهش یافته و تعداد قله‌های خروجی فیلتر افزایش می‌یابد که نشان دهنده این است که با افزایش دما گذارهای دیگری نیز رخ می‌دهند. نمایان شدن این گذارها به این دلیل است که به خاطر اثر زمین، ترازهای فوق ریز دیگر تبهگن نیستند. پهنای فیلتر طیف اتمی (مقدار FWHM) نیز تابع دما است و با افزایش دما کاهش می‌یابد. نتایج تغییر پهنای فیلتر با دما در جدول ۱ آورده شده است.

با افزایش دما بالاتر از ۴۵ درجه سانتی گراد پدیده جالبی اتفاق می‌افتد. پس از دمای ۴۵ درجه تعداد قله‌های سیگنال افزایش یافته و پهنای آنها نسبت به قبل بسیار کمتر می‌شود. در



شکل ۷. اندازه FWHM بر حسب شدت میدان مغناطیسی.



شکل ۸. مشاهده تأثیر چرخش ۳۶۰ درجه میدان مغناطیسی روی خروجی فیلتر.

۵. نتیجه گیری

در این کار به صورت تجربی تأثیر پارامترهای سامانه روی مشخصه یک فیلتر طیف اتمی در طول موج خط جذب D1 سزیم مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خلاصه ملاحظه شد که افزایش دما تا حدود ۴۰ درجه با افزایش ضریب عبور همراه است، اما در دماهای بزرگتر از آن هر یک از قله‌های فیلتر به قله‌های جدیدی با پهنای کمتر تقسیم می‌شوند. همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی نیز افزایش ضریب عبور را در ازای افزایش پهنای فیلتر به همراه دارد. در آزمون‌های انجام شده با اعمال میدان مغناطیسی با شدت ۳۹۰ گوس و تنظیم دمای ۴۰ درجه برای سلول گاز اتمی، حداکثر قله عبوری فیلتر با پهنای حدود ۰/۲۴ گیگاهرتز ایجاد شد. این در حالی است که چنانچه پهنای باریک‌تری برای فیلتر مورد نظر باشد، با

همان طور که ملاحظه می‌شود پهنای فیلتر با افزایش میدان مغناطیسی به تدریج افزایش پیدا می‌کند.

برای بررسی تأثیر جهت میدان مغناطیسی اعمالی بر روی خروجی فیلتر، علاوه بر اعمال میدان در راستای انتشار نور، یک میدان عمود بر راستای انتشار نور نیز اعمال کردیم. با تنظیم جریان‌های دو سیم‌پیچ هلمهلتز و ایجاد میدان برابری، میدان مغناطیسی را ۳۶۰ درجه چرخانده و خروجی فیلتر را ثبت کردیم. این نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است.

همان طور که مشاهده می‌شود میدان کاملاً عمود بر راستای انتشار با تقریب خوبی تأثیری در چرخش قطبش و در نتیجه نور خروجی از قطبشگر دوم ندارد.

افزایش دما قله‌های باریک‌تر با پهنای ۰/۱۲ گیگاهرتز نیز به دست می‌آید. به طور کلی بر اساس نتایج حاصل، با تغییر شدت میدان مغناطیسی و دمای سامانه، می‌توان فیلتر طیف اتمی با میزان عبور و پهنای دلخواه ایجاد کرد.

مراجع

1. B Julsgaard, A Kozhekin, and E S Polzik, *Nature* **413** (2001) 400.
2. P. Siddons, *et al.*, *Nat. Photonics* **3** (2009) 225.
3. M. Gajdacz, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum* **84**, 8 (2013) 083105.
4. N. Behbood, *et al.*, *APPL. Phys. Lett.* **102** (2013) 173504.
5. A. L. Marchant, *et al.*, *Opt. Lett.* **36** (2011) 64.
6. M. A. Zentile, *et al.*, *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **47** (2014) 075005.
7. L. Weller, *et al.*, *Opt. Lett.* **37** (2012) 3405.
8. Y Ohman, *Stockholms Obs. Ann.* **19** (1956) 4.
9. C. Fricke-Begemann, M. Alpers, and J. Hoffner, *Opt. Lett.* **27** (2002) 1932.
10. H. Chen, *et al.*, *Opt. Lett.* **21** (1996) 1093.
11. W. Huang, *et al.*, *Opt. Lett.* **34** (2009) 199.
12. S. D. Harrell, *et al.*, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **72** (2010) 1260.
13. A. Popescu, *et al.*, *Opt. Commun.* **264** (2006) 475.
14. A. Rudolf and T. Walther, *Opt. Lett.* **37** (2012) 4477.
15. A. Cacciani and M. Fofi, *Sol. Phys.* **59** (1978) 179.
16. S. H. Bloom, *et al.*, *Opt. Lett.* **18** (1993) 244.
17. T. Junxiong, *et al.*, *Appl. Opt.* **34** (1995) 2619.
18. J. A. Zielińska, *et al.*, *Opt. Express* **22** (2014) 25307.
19. R. P. Abel, *et al.*, *Opt. Lett.* **34** (2009) 3071.
20. R. Frey and C. Flytzanis, *Opt. Lett.* **25** (2000) 838.
21. P. P. Sorokin, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **15** (1969) 179.
22. T. Endo, *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.* **13** (1977) 866.
23. P. Wanninger, E. C. Valdez, and T. M. Shay, *IEEE Photon Technol. Lett.* **4** (1992) 94.
24. K. Choi, *et al.*, *Opt Commun.* **96** (1993) 240.
25. X. Miao, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **82** (2011) 086106.
26. T. E. T. Endo, *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.* **14** (1978) 977.
27. Y. C. Chan and J. A. Gelbwachs, *IEEE J. Quant. Electron.* **29** (1993) 2379.
28. G. Agnelli, A. Cacciani, and M. Fofi, *Sol. Phys.* **44** (1975) 509.
29. H. Chen, *et al.*, *Opt. Lett.* **18** (1993) 1019.
30. Z. Hu, *et al.*, *Opt. Commun.* **156** (1998) 289.
31. Y. Yang, *et al.*, *Opt. Lett.* **36** (2011) 1302.
32. W. Kiefer, *et al.*, *Sci. Rep.* **4** (2014) 6552.
33. B. Yin and T. M. Shay, *Opt. Commun.* **94** (1992) 30.
34. R. I. Billmers, *et al.*, *Opt. Lett.* **20**, (1995) 106.
35. D. J. Dick and T. M. Shay, *Opt. Lett.* **16** (1991) 867.
36. J. A. Zielińska, *et al.*, *Opt. Lett.* **37** (2012) 524.
37. Q. Sun, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 211102.
38. J. Menders, *et al.*, *Opt. Lett.* **16** (1991) 846.
39. Y. Wang, *et al.*, *Opt. Express* **20** (2012) 25817.
40. D. Hockel and O. Benson, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 153605.
41. S. D. Harrell, *et al.*, *J. Opt. Soc. Amer. B, Opt. Phys.*, **26**, 4 (2009) 659.
42. D. Budker, *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **74** (2002)
43. X Xue, Z Tao, and Q Sun, *Optics Letters* **37**, 12 (2012).