



## فیلتر خط اتمی کوک پذیر مبتنی بر جفت شدگی قوی اتم-پلاسمون

محمد مصلح<sup>۱</sup>، مهناز اسدالله سلمانپور<sup>۱</sup>، ملیحه رنجبران<sup>۲</sup>، سیده مهتری حمیدی<sup>۱\*</sup>

۱- آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
۲- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

**چکیده:** محدود کردن نور در ابعاد نانو در ساختارهای اتمی-پلاسمونی، می‌تواند کاربردهای بسیاری از جمله ساخت فیلترهای خط اتمی داشته باشد. در چنین سامانه‌های تشدید جفت‌شده‌ای، تشدید پهن پلاسمونی در مقابل تشدید باریک اتمی قرار می‌گیرد که منجر به شکل‌گیری یک فیلتر باریک در طیف بازتاب می‌گردد. در این مقاله با طراحی و ساخت سلول اتمی-پلاسمونی، طیف بازتاب از یک لایه نازک طلا که در مجاورت بخار رویدیم در هندسه کرشمن قرار گرفته است، با استفاده از روش مدولاسیون فرکانسی اندازه‌گیری شد. با تنظیم زاویه نور فرودی، فرکانس تشدید مد پلاسمون-پلاریتون نسبت به فرکانس مرکزی خطوط جذب اتمی تغییر کرده و پدیده تبدیل تشدید فانو به شبه EIT و سپس، بازگشت به شکل خط فانو مشاهده شد. بنابراین، پدیده شبه EIT مشاهده شده به عنوان یک فیلتر خط اتمی کنترل پذیر با زاویه فرود نور معرفی شد.

**واژگان کلیدی:** سیستم اتمی-پلاسمونی، تشدید فانو، شفافیت القای الکترومغناطیسی (EIT)، سلول رویدیم-لایه نازک طلا، فیلتر خط اتمی رویدیم

\*m\_hamidi@sbu.ac.ir

میان‌گذر با باند گذار بسیار باریک هستند، که بر پایه خطوط جذبی یا تشدید بخارهای اتمی کار می‌کنند و بنابراین، فیلتر تشدید اتمی نیز نامیده شوند. فیلترهای نوری اتمی به طور گسترده‌ای در ارتباطات لیزری [۲]، رادار لیزری [۳] و تثبیت فرکانس لیزری [۴] و همچنین، چیدمانهای آزمایشگاهی نور کوانتومی [۵] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کاربردهای نوری مذکور که نور پس زمینه می‌تواند تأثیر کامل مخرب بر کیفیت ارتباط داشته باشد، این فیلترها می‌توانند نور پس زمینه موجود در کنار فرکانس اصلی مورد نظر را مسدود کنند. برای به دست آوردن فیلتر نوری با باند بسیار باریک و دستیابی به گذر باند تقریبی ۱ گیگاهرتز، از پهنای خط گذار اتمی استفاده می‌شود. انواع فیلترهای نوری اتمی در

### ۱- مقدمه

اتم‌های منفرد یا هنگردهای اتمی بستر بسیار مناسبی جهت طراحی کاربردهای کوانتومی فراهم می‌کنند. بخار فلزات قلیایی مانند رویدیم، سزیم و پتاسیم به دلیل دارا بودن تک الکترون در لایه ظرفیت خود، به صورت گسترده‌ای به عنوان محیط کوانتومی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برهمکنش نور با اتم این فلزات، در زمینه‌هایی مانند ساعت‌های اتمی، حسگرهای مغناطیسی، تثبیت کننده‌های فرکانس لیزر و فیلترهای خط اتمی کاربرد داشته است [۱]. یکی از کاربردهای مبتنی بر اندرکنش نور با بخار فلزات قلیایی، فیلترهای خط اتمی هستند. این فیلترها عموماً فیلترهای

عناصر مختلف مانند پتاسیم (۷۷۰ نانومتر)، روبیدیم (۴۲۲ نانومتر، ۷۸۰ نانومتر)، سزیم (۴۵۵ نانومتر، ۴۵۹ نانومتر، ۸۵۲ نانومتر)، کلسیم (۴۲۳ نانومتر) و استرانسیم (۴۶۱ نانومتر) ساخته شده است.

انواع اصلی فیلترهای خط اتمی را می‌توان بصورت فیلترهای جذبی-انتشاری [۶]، فیلترهای فارادی [۷]، فیلترهای فویت [۸] و فیلترهای شفافیت القای الکترومغناطیسی (EIT) [۹] دسته بندی کرد. همچنین، فیلترهای اتمی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد، فیلترهایی فعال<sup>۲</sup> و فیلترهای غیرفعال<sup>۳</sup>. در طراحی فیلترهای باند گذار غیر فعال عموماً سعی شده است که عملکرد فیلتر از عوامل خارجی ایزوله شده و همواره طول موج خاصی از نور را عبور دهد. در فیلترهای خط اتمی فعال، از دمش نوری یا الکتریکی خارجی برای تحریک اتم‌های داخل سلول بخار اتمی استفاده می‌شود. بنابراین، این فیلترها قابلیت کوک پذیری در طول موج‌های مختلف را فراهم می‌کنند. برای فیلترهای فعال، ممکن است به سیستم‌های کنترلی در کنار ساختار اصلی فیلترهای معمولی نیاز باشد [۱۰]. وجود فیلتری با قابلیت تنظیم مداوم و سریع مشخصات فیلتری، به ویژه در پردازش اطلاعات کوانتومی به شکل خاصی مورد توجه است [۱۱]. تاکنون روش‌های گوناگونی برای طراحی فیلترهای اتمی میان گذر به کار گرفته شده اند. از آن جمله می‌توان به استفاده از میدان مغناطیسی خارجی برای جابجایی فرکانس کاری اتمی و همچنین روش‌هایی مانند دمش نوری انتخابی بر روی بخار اتمی گرم نام برد [۱۲].

پدیده شفافیت القایی از مواردی است که به منظور طراحی و ساخت فیلترهای اتمی معرفی شده و افزون بر مشخصات فیلتری قابل قبول، کنترل پذیری بسیار خوبی را از خود نشان داده است [۱۳]. پدیده EIT ناشی از جفت‌شدگی هم‌دوس بین دو تشدید پهن و باریک است که منجر به شکل‌گیری یک تشدید تیز و بسیار باریک می‌شود. این پدیده در فیلترهای اتمی در اثر هم‌دوسی اتمی القا شده در یک سامانه چندترازی توسط یک میدان لیزری قوی بوجود می‌آید که پاسخ به نور لیزر کاوشگر را تغییر می‌دهد و باعث می‌شود که محیط نسبت به آن به صورت شفاف عمل کند. بنابراین، نیاز به یک پرتو دمش و یک پرتو

<sup>1</sup> Voigt

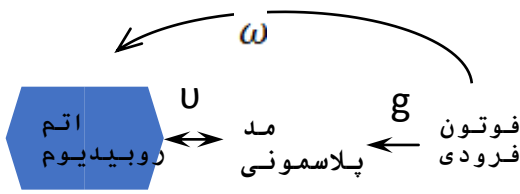
<sup>2</sup> active

<sup>3</sup> passive

کاوشگر وجود دارد. با استفاده از این نوع فیلتر در یک سیستم سه ترازوی نوع  $\Lambda$  مربوط به گذار  $5S_{1/2}-5P_{1/2}$  بخار فلز قلیایی روبیدیم، توانستند نوفه شدت را قویاً کاهش دهند [۱۴]. در تحقیقات اخیر نیز ونگ و همکارانش، بیشینه عبور فیلتر میان گذر EIT را با جفت‌شدگی با میدان مغناطیسی افزایش دادند [۱۵].

با تقریب خوبی می‌توان گفت در همه فیلترهای اتمی از جمله فیلترهای مبتنی بر پدیده EIT که تاکنون معرفی شده‌اند، اساس کار فیلتر و همچنین، فرایندهای کنترلی مبتنی بر فیزیک و پدیده‌های نهفته در اتم‌ها است. در مواردی مانند علاقه به مجتمع سازی فیلترها و همچنین، کاهش ابعاد ادوات ترکیب طیف سنجی اتمی و نانوفوتونیک می‌تواند بسیار راه گشا و نوید بخش فناوریهای نو باشد. در سال‌های اخیر، مطالعاتی در حوزه اندرکنش مدهای موجبری فیبرهای نوری [۱۶]، موج میرا [۱۷]، مدهای نوری فرامواد [۱۸]، با اتم‌های قلیایی انجام شده و گزارش شده‌اند. از جمله پدیده‌های جالبی که در خلال این مطالعات صورت گرفته می‌توان به مشاهده گذارهای چهارقطبی در اتم‌ها بواسطه اندرکنش با مد پلاسمونی [۱۹] و یا مشاهده پدیده شفافیت القای (EIT<sup>۴</sup>) در اندرکنش موج میرا با اتم [۲۰] و پدیده فانو ناشی از جفت‌شدگی اتم با مد پلاسمونی سطحی اشاره کرد [۲۱]. بررسی گزارش‌های مذکور نشان دهنده اهمیت جفت‌شدگی کوانتومی گذارهای اتمی با مدهای نوری مواد برای مشاهده پدیده‌های فیزیکی است. از جمله مواردی که به شکل ویژه به این اهمیت می‌افزاید قابلیت کنترل پذیری کامل با عامل خارجی برای فوتون مدهای نوری مواد (پلاریتون) و یا فرامواد نسبت به فوتون فضای آزاد است. عوامل خارجی مانند ولتاژ و یا جریان الکتریکی و حتی شدت نور به شکل سنتی در زمینه‌های زیادی برای کنترل خصوصیات مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله شکل‌های مد نوری که توجهات فوق العاده زیادی را به خود اختصاص داده مدهای پلاسمون-پلاریتون سطحی هستند [۲۲]. در صورتی که یک لایه نازک فلزی بر روی یک منشور شفاف داشته باشیم، می‌توانیم با تاباندن نور در یک زاویه خاص یک مد پلاسمون-پلاریتون سطحی ایجاد کنیم. ساده ترین راه برای کنترل این مد پلاسمونی تغییر زاویه تابش نور خواهد بود. مدهای پلاسمون-پلاریتون سطحی به شکل جالبی قابلیت اندرکنش و

<sup>4</sup> Electromagnetically-Induced-Transparency (EIT)



شکل ۲: طرحواره جفت شدگی بین ترازهای سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی.

با حل هامیلتونی سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی جفت شده، شکل خط تشدید فانو را می‌توان به صورت معادله

$$\sigma(E) = \frac{(e+q)^2}{e^2+1} \quad (1)$$

$$q = 2vw / (g\Gamma_d(E)) + 2\Delta / \Gamma_p$$

$$e = 2E / \Gamma_d(E) - 2\Delta / \Gamma_p$$

است.

$\Gamma_p$  و  $\Gamma_d$  به ترتیب نشان‌دهنده ی پهنای خط تشدید گذار اتمی و پهنای خط تشدید پلاسمونی است.  $\Delta$  نشان دهنده ی اختلاف انرژی نور فرودی به سیستم هیبریدی و تشدید پلاسمونی است. با توجه به اینکه انرژی نور لیزر در مجاورت تشدید اتمی اسکن می‌شود،  $\Delta$  نشان دهنده اختلاف انرژی تشدید اتمی و پلاسمونی است [۲۴].

سه رژیم پیش‌بینی شده توسط فانو، یعنی شکل خط شبیه پراکندگی طبیعی، شکل خطوط متقارن و شکل خط شبیه پراکندگی غیرعادی در سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی قابل مشاهده است. این واقعیت که در  $q=0$  به شکل خطوط متقارن دست می‌یابیم، نشانه واضحی است که جفت شدگی مستقیم نور به حالت گسسته اتمی ( $w$ ) بسیار ضعیف است و تحریک گذار اتمی روبییدیوم فقط از طریق پلاسمون‌ها صورت می‌گیرد [۲۳]. طبق روابط در حالت  $q=0$ ، مقدار  $\Delta$  باید صفر باشد که این به معنای این است که انرژی تشدید اتمی و پلاسمونی با هم برابر است. بنابراین هنگامی که نور فرودی را در زاویه ی تشدید پلاسمون به سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی می‌تابانیم پدیده شبیه به EIT، با حداکثر عبورندگی نور فرودی، ناشی از حضور مد

جفت شدگی کوانتومی با گذارهای اتمی بخارات روبییدیوم را دارا هستند. جفت شدگی بین اتم و پلاسمون به مشخصات مد پلاسمونی و گذار اتم وابسته است و بنابراین تغییر زاویه تابش نور فرودی خروجی این جفت شدگی اتمی را تحت تاثیر قرار خواهد داد [۲۳]. در این مقاله روشی نوین نسبت به سامانه‌های اتمی برای ساخت یک فیلتر شبه EIT معرفی شده است. فیلتر خط اتمی معرفی شده دارای باند گذری برابر با پهنای خط جذب اتم روبییدیوم و مبتنی بر جفت شدگی قوی اتم و مد پلاسمونی است. در طراحی این فیلتر، به جای اندازه‌گیری تابش فلورسانس یا شدت پرتو کاوشگر، عبور شبه EIT اندازه‌گیری شده است. مد پلاسمونی افزون بر نقش موجبری و جفت شدگی با گذار اتمی مانند فیلتر عمل کرده و تمام نور پس زمینه در طول موجهای متفاوت از طول موج گذار اتم روبییدیوم را حذف کرده و تنها به طول موج معادل گذار اتمی اجازه عبور خواهد داد. همچنین، به شکل واضح نشان داده می‌شود که با تغییر زاویه می‌توان نوع فیلتر را به شکل موثر از یک فیلتر میان گذر به فیلتر جذبی تبدیل کرد. بدین ترتیب یک فیلتر EIT ساده‌تر، بدون نیاز به پرتو کاوشگر و با قابلیت کنترل بوسیله زاویه پرتو فرودی ارائه شده است.

## ۲. مبانی نظری و طیف‌سنجی محیط اتمی پلاسمونی

تشریح برهم‌کنش بین گذارهای گسسته اتمی بخار فلز قلیایی روبییدیوم و تشدید پیوستار پلاسمون سطحی که منجر به تشکیل خط جذب فانو می‌شود، شکل ۲ رسم شده است. حالت  $|i\rangle$  نشان دهنده تراز<sup>۱</sup> نور فرودی است که به صورت مستقیم به حالت پیوستار پلاسمون سطحی  $|spp\rangle$  با ضریب جفت شدگی  $g$  جفت می‌شود. در اینجا،  $v$  نشان دهنده جفت شدگی بین حالت اتمی  $|Rb\rangle$  و حالت پیوستار پلاسمونی  $|spp\rangle$  است،  $w$  ضریب جفت شدگی مستقیم نور به حالت اتمی است.

<sup>1</sup> state

پلاسمونی<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد و محیط جاذب را برای میدان پرتو فرودی شفاف می‌کند.

### ۳. چیدمان تجربی

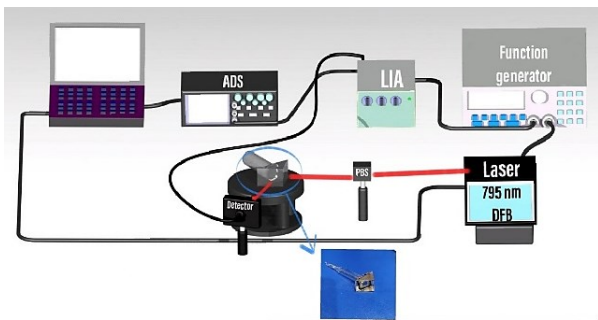
به منظور بررسی طیف بازتابی از چین سامانه هیبریدی اتمی-پلاسمونی، نیاز به طراحی سلول بخار اتمی با امکان تماس مستقیم مد پلاسمونی و بخار اتمی داریم. بدین منظور، با استفاده از لایه نشانی کند و پاش لایه نازک طلا با ضخامت ۳۵ نانومتر بر روی وجه منشور ایجاد شد. با قرار دادن منشور در انتهای سل اتمی، چین سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی طراحی شد (مطابق شکل ۲). جهت دستیابی به چگالی مناسب بخار اتمی، سلول روبیدیم تا دمای ۸۵ درجه سلسیوس توسط گرماساز تعبیه شده در محفظه عایق دمایی گرم شد. نور لیزر DFB منطبق بر خط جذبی D<sub>1</sub> اتم روبیدیم توسط درایور جریان مدوله شده و پس از عبور از منشور گلن-تیلور، از سطح جدایی طلا-بخار روبیدیم در هندسه کرشمن بازتاب شد. نور بازتاب شده به آشکارساز نوری متصل به دستگاه قفل شونده در فرکانس ویژه رسیده و تغییرات شدت نور با جاروب فرکانس لیزر توسط رایانه ثبت گردید.

در این سیستم به دلیل اثر متقابل تشدید فانو بین تشدید پلاسمونی و اتمی، با وجود داشتن پنج مرتبه اختلاف در اندازه عرض خط طیفی آنها (پهنای خط پلاسمون پنج برابر پهنای خط جذب اتمی است)، تشدید سیستم ترکیبی ممکن است با تغییر شرایط جفت شدگی به شدت تغییر کند و انتقال مشابه Fano-EIT رخ دهد.

هر دو انتقال شبه EIT و Fano از اتصال بین مسیرهای نوری دو تشدیدگر (یک نوسانگر پلاسمونی و یک نوسانگر اتمی) منشأ می‌گیرند که شبیه تداخل کوانتومی در یک سیستم اتمی چند سطحی است. با تنظیم قدرت جفت شدگی بین نوسانگر پلاسمونی و نوسانگر اتمی که توسط تغییر دادن زاویه فرود نور بر سیستم هیبریدی اتمی-پلاسمونی انجام می‌شود، تبدیل از تداخل سازنده به تداخل مخرب بین دو نوسانگر اتفاق می‌افتد. در نتیجه، انتقال از شکل خط شبه EIT به شکل خط فانو مشاهده می‌شود. انتقال شبه EIT دارای یک قله شفافیت نوری باریک است که در دره جذب وسیع‌تری قرار دارد، که کاربردهایی در پردازش سیگنال

و میکرو خطوط تأخیر زمانی دارد. انتقال فانو دارای یک خط نامتقارن تیز است و به طور گسترده در حسگری و مدولاسیون استفاده می‌شود [۲۵].

جهت بررسی این جفت شدگی به منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه اندازه‌گیری شده از روش طیف‌سنجی مدولاسیون فرکانسی (FM) استفاده شد. در این طیف‌سنجی، فرکانس نور لیزر (طول موج لیزر) در مدوله می‌شود (با مدولاسیون جریان لیزر) و هنگامی که فرکانس لیزر در محدوده فرکانس جذب اتمی جاروب می‌شود، جذب اتم‌های Rb منجر به مدوله شدن شدت لیزر می‌شود و در نتیجه اختلاف جذب با دستگاه قفل شونده در فرکانس ویژه تنظیم شده<sup>۳</sup>، اندازه‌گیری می‌شود. خروجی طیف‌سنجی FM مشتق از خطوط جذب اتم‌های Rb است [۲۶] و به خاطر ماهیت مشتق‌گیری این روش طیف‌سنجی، تمام نتایج بدست آمده از این روش در واقع مشتق نتایج تئوری هستند. چیدمان این طیف‌سنجی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. طرحواره چیدمان طیف‌سنجی مدولاسیون فرکانسی. تصویر پیوست، سل اتمی-پلاسمونی طراحی و ساخته شده را نشان می‌دهد.

### ۴. نتایج و بحث

به منظور ثبت طیف بازتاب و بررسی کوک‌پذیری زاویه‌ای اثر فانو، ابتدا با تغییر زاویه فرود نور به سیستم، زاویه‌ای که در آن شدت نور بازتاب کمینه می‌شود (زاویه تشدید پلاسمون)، اندازه‌گیری شد. سپس، طیف بازتاب سیستم اتمی-پلاسمونی در سه زاویه متفاوت پیش از زاویه تشدید پلاسمونی (شکل ۳ سطر بالایی)، زاویه تشدید (شکل ۳ سطر میانی) و پس از زاویه تشدید پلاسمونی (شکل ۳ سطر پایینی) اندازه‌گیری شد.

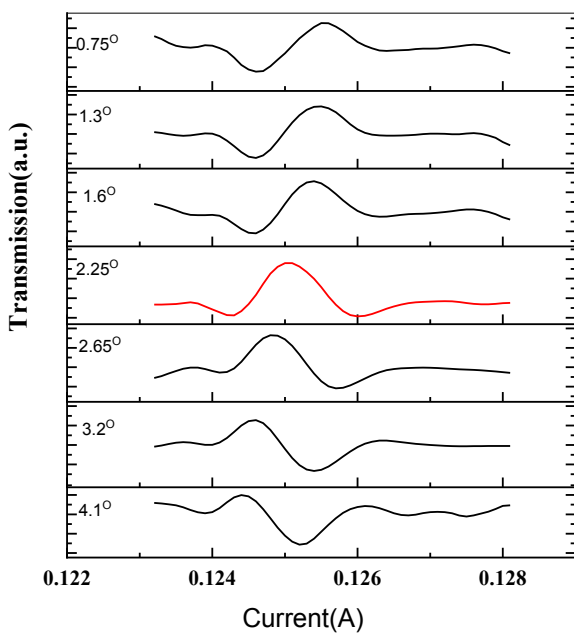
<sup>2</sup> Frequency Modulation

<sup>3</sup> Lock-in Amplifier

<sup>1</sup> Electromagnetically induced transparency ...

نتایج اندازه‌گیری شده شباهت قابل توجهی با حالت پیش بینی شده در مقاله پیشین گروه ما دارد که به صورت تئوری با شروع از زاویه  $q$  کمتر از تشدید پلاسمونی یک منحنی پاشنده غیرعادی بدست آمد. در زاویه تشدید پلاسمونی یک رفتار متقارن و بیشینه‌ای و در زاویه بزرگتر از تشدید رفتار پاشنده عادی مشاهده شد [۲۵].

به منظور بررسی دقیق‌تر انتقال فانو-EIT-فانو در سیستم اتمی-پلاسمونی، جاروب فرکانس لیزر حول یک گذار اتمی رویدیدم انجام شد ( $F=3 \rightarrow F'=2$  or  $3$   $^{85}\text{Rb}$ ). با در نظر گرفتن زاویه تشدید پلاسمونی در زوایای کمتر و بیشتر از این زاویه با دقت  $0.3^\circ$  درجه زاویه نور فرودی تغییر و طیف بازتابی اندازه‌گیری شد.

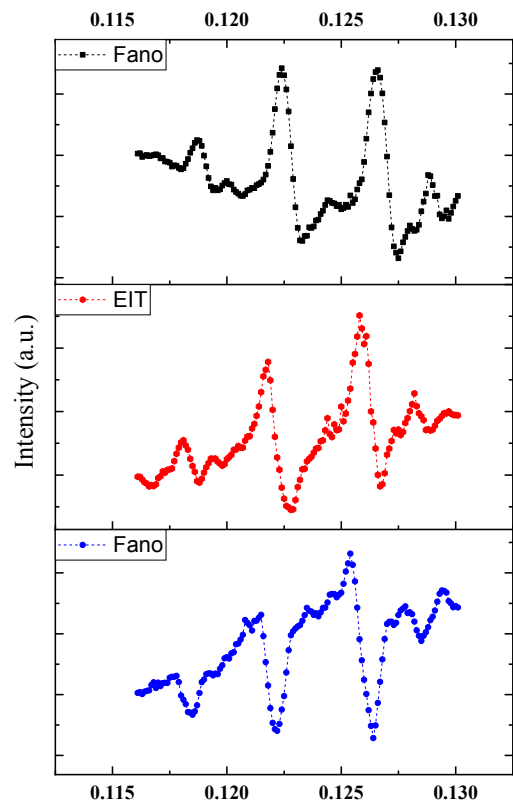


شکل ۴: کوک‌پذیری طیف بازتابی از سل اتمی-پلاسمونی با کنترل زاویه نور فرودی.

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در زوایای قبل از زاویه تشدید ( $0.75^\circ - 1.6^\circ$ ) رفتار پاشنده پدیده فانو قابل مشاهده است. با نزدیک شدن به زاویه تشدید پلاسمونی نقطه عطف نمودار فانو به سمت رفتار متقارن و تک بیشینه شدن میل می‌کند و در نهایت، در زاویه  $2.25^\circ$  جفت شدگی قوی اتفاق می‌افتد و پدیده EIT مشاهده می‌شود (در شکل ۴، با نمودار قرمز رنگ مشخص شده است). در این زاویه بیشترین شدت بازتابی ثبت

با توجه به سه رژیم ذکر شده در بخش مبانی نظری که به پارامتر  $q$  مربوط هستند، هر کدام از شکل خط‌های شکل ۳ مربوط به یک مقدار  $q$  مشخص است که به ترتیب برای  $q$  مثبت،  $q=0$  و  $q$  منفی هستند. بنابراین، با کنترل زاویه نور فرودی قابلیت کوک‌پذیری با زاویه خط جذب اتم رویدیدم مشاهده می‌شود. همان طور که اشاره شد، در این مقاله از روش طیف‌سنجی مدولاسیون فرکانسی استفاده شده است. پس، نتایج همه اندازه‌گیری‌ها مشتق نتایج تئوری هستند.

هر کدام از نمودارهای ارائه شده در شکل (۳) با زاویه  $q$  فرود متفاوتی بدست آمده است که مربوط به شرایط جفت شدگی متفاوتی با تشدید پلاسمونی است. نتایج مشاهده شده، توصیفی کامل از اثر مشابه فانو-EIT-فانو است. بنابراین با ثبت طیف بازتاب در زاویه تشدید پلاسمونی می‌توان آن را به عنوان یک فیلتر اتمی-پلاسمونی در نظر گرفت.



شکل ۳: طیف بازتابی اندازه‌گیری شده از سل اتمی-پلاسمونی در سه زاویه متفاوت: پیش از زاویه تشدید پلاسمونی (سطر بالا)، بر روی زاویه تشدید (سطر میانی) و پس از زاویه تشدید پلاسمونی (سطر پایین).

- internal frequency stabilized laser pumping. Optics express, 22, 7416-7421, 2014.
5. J.A. Zielińska, F.A. Beduini, V.G. Lucivero and M.W. Mitchell. Atomic filtering for hybrid continuous-variable/discrete-variable quantum optics, optics express, 22, 25307-25317, 2014.
  6. S. Liu, Y. Zhang, H. Wu and P. Yuan. Ultra-narrow bandwidth atomic filter based on optical-pumping-induced dichroism realized by selectively saturated absorption. Optics Comm, 285, 2012.
  7. W. Kiefer, R. Löw, J. Wrachtrup and I. Gerhardt. Na-Faraday rotation filtering: The optimal point. Sci Rep 4, 6552-6558, 2014.
  8. L. Yien, B. Luo, J. Xiong, H. Guo, "Tunable excited state voigt atomic optical filter." Opt. exp. 24(16), 6088-6093, 2016.
  9. J. Odeurs, R.N. Shakhmuratov. "Optical filter with electromagnetically induced transparency". European Quantum Electronics Conference, IEEE, 12, 90, 2005.
  10. J.A. Gelbwachs, "Atomic resonance filters." IEEE journal of quantum electronics, 24, 1266-1277, 1988.
  11. M.-Xing Luo, H.-Ran Li, X. Wang, "Distributed atomic quantum information processing via optical fibers", Scientific Reports volume 7, 1234, 2017.
  12. S.Liu, E. Zhao, D.Liu, H.Li & W.Sun. A tunable atomic line filter without sacrificing transmission based on the combination of selective pump and magnetic field. Optik, 148, 244-250, 2017.
  13. Z. Zhang, G.I. Ng, T. Hu, H. Qiu, X. Guo, W. Wang, M. S Rouifed, C. Liu & H. Wang. Conversion between EIT and Fano spectra in a microring-Bragg grating coupled-resonator system. Applied Physics Letters, 8, 081105, 2017.
  14. T. Jeong, I.H. Bae, H.S. Moon. "Noise filtering via electromagnetically induced transparency". Optics Communications. 15; 383:31-5, 2017.
  15. G. Wang, Y.S. Wang, E.K. Huang, W. Hung, K.L. Chao, P.Y. Wu, Y.H. Chen, I.A. Yu, "Ultrannarrow-bandwidth filter based on a thermal EIT medium", Scientific Reports. 21; 8(1):1-7, 2018.
  16. S. M. Spillane, G. S. Pati, K. Salit, M. Hall, P. Kumar, R. Beausoleil, and M. S. Shahriar,

شد. پهنای طیف EIT دقیقاً برابر با پهنای خط جذبی اتم روبیدیم است بنابراین در زاویه  $2/25^\circ$ ، سل اتمی-پلاسمونی را می‌توان به عنوان یک فیلتر اتمی در نظر گرفت. با دور شدن از زاویه تشدید رفتار متقارن به آرامی به سمت رفتار پاشنده فانو میل می‌کند.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله طیف بازتابی از سیستم اتمی-پلاسمونی طراحی شده اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری این طیف حول یکی از گذارهای اتم روبیدیم، پدیده انتقال فانو-EIT-فانو با کنترل زاویه نور فرودی بررسی شد. از آنجایی که اثر EIT در زاویه تشدید پلاسمون رخ داده و باعث افزایش عبور از سل اتمی-پلاسمونی می‌شود، پیشنهاد طراحی و ساخت فیلتر خط اتمی-پلاسمونی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. برتری این فیلتر اتمی-پلاسمونی پیشنهادی نسبت به فیلترهای اتمی رایج، در اندازه‌گیری طیف EIT به جای فلورسانس است که این خود نیاز به فیلترهای پایین گذر در خروجی سل بخار اتمی را از بین می‌برد. همچنین، در مقایسه با فیلترهای اتمی EIT موجود، در این روش نیاز به پرتو کاوشگر حذف شده است. فیلتر میان گذر پیشنهادی بسیار باریک و پهنای آن برابر با پهنای خط جذب اتم روبیدیم است.

#### مراجع

1. T.F. Cutler, W.J. Hamlyn, J. Renger, K.A. Whittaker, D. Pizzey, I.G. Hughes, V. Sandoghdar, and C.S. Adams, Nanostructured alkali-metal vapor cells. Physical Review Applied, 14, 034054-034059, 2020.
2. Z. J. Liang, G. Gao, B. Wang, X. Guan, Background noise resistant underwater wireless optical communication using Faraday atomic line laser and filter. Journal of Lightwave Technology, 45, 3118447-3118452, 2021.
3. C. Fricke-Begemann, M. Alpers, and J. Höffner, Daylight rejection with a new receiver for potassium resonance temperature lidars. Optics letters, 27, 1932-1934, 2002.
4. L. Yin, B. Luo, A. Dang, H. Guo. An atomic optical filter working at 1.5  $\mu\text{m}$  based on

- “Observation of nonlinear optical interactions of ultralow levels of light in a tapered optical nanofiber embedded in a hot rubidium vapor,” *Phys. Rev. Lett.* 100, 233602-233606, 2008.
17. S. Tojo, Y. Murkami, M. Hasuo, and T. Fujimoto, “Attenuated Total Reflection of the Rubidium D2 Line in Optically Dense Vapor,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1069-1072, 2002.
  18. S. A. Aljunid, E. A. Chan, G. Adamo, M. Ducloy, D. Wilkowski, and N. I. Zheludev, "Atomic Response in the Near-Field of Nanostructured Plasmonic Metamaterial," *Nano Lett.* 16, 3137–3141, 2016.
  19. E. A. Chan, G. Adamo, S. A. Aljunid, M. Ducloy, N. I. Zheludev and D. Wilkowski, "Plasmono-Atomic Interactions on a Fiber Tip," *Appl. Phys. Lett.* 116, 183101-183105, 2020.
  20. R. Thomas, C. Kupchak, G. S. Agarwa, and A. I. Lvovsky, "Observation of electromagnetically induced transparency in evanescent fields," *Opt. Express* 21, 6880 – 6888, 2013.
  21. C. Stehle, C. Zimmermann, S. Slama, "Cooperative coupling of ultracold atoms and surface plasmons," *Nature Physics* 10, 937–942, 2014.
  22. F. Sohrabi, S. M. Hamidi, “Fabrication methods of plasmonic and magnetoplasmonic crystals: a review”, *the european physics journal plus.* 132, 1-22, 2017.
  23. L. M. Stern, M. Grajower, and U. Levy, Fano resonances and all-optical switching in a resonantly coupled plasmonic–atomic system. *Nature communications.*, 5, 1-9, 2014.
  24. R. Zektzer, Enhanced light–matter interactions in plasmonic–molecular gas hybrid system. *Optica*, 5(4): 486-494, 2018.
  25. M. Mosleh, M. Ranjbaran, S. M. Hamidi, Nanoscale Atom-Plasmon interaction at Gold-Alkali vapor interface, *Nanoscale*, 7, 1-8, 2021.
  26. W. Demtröder, *Laser spectroscopy: basic concepts and instrumentation.* 2013: Springer Science & Business Media.

# Tunable atomic filter based on atom-plasmon coupling

M. Hamidi<sup>\*1</sup>, M. Mosleh<sup>1</sup>, M. Ranjbaran<sup>2</sup>, M. Salmanpour<sup>1</sup>

1-Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
2-Islamic Azad University of Central Tehran Branch

**Abstract:** Confinement of light at nanoscale dimensions in atomic plasmonic structures has many applications such as atomic line filters. In such coupled resonant systems, broad plasmonic resonance in contrast to narrow atomic resonance gives rise to a very fine filter in the reflection spectrum. In this paper, an atomic-plasmonic cell was modeled and fabricated and the reflection from a thin gold layer in the vicinity of the rubidium vapor in the Kretschmann configuration was measured by frequency modulation setup. By tuning the angle of incidence of light we could change the frequency of resonance of surface plasmon-polariton mode from the central frequency of atomic resonance lines, so the EIT to Fano resonance phenomena and vice versa have been observed. So, the EIT-like phenomena was introduced as an atomic line filter, controllable with a light entrance angle.

**Keywords:** Atomic-plasmonic resonant interaction; Rubidium atom; Tunable filter; Fano resonance.