

به دام اندازی میکروموج مولکول های سرد NH_3

فاطمه سادات تحصیلداران^۱، امیر حسین فرهبد^۱، و تاکاماسا موموسه^۲

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران، ایران.

۲. دانشکده فیزیک و نجوم، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکوور، بریتیش کلمبیا، کانادا.

پست الکترونیکی: ftahsildaran@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱)

چکیده:

در این تحقیق تجربی، مهار حرکت انتقالی باریکه فراصوت مولکول های قطبی آمونیاک (NH_3) در تراز پایه چرخشی $J=0$ گونه های *para* با استفاده از میدان میکروموج نشان داده می شود. باریکه سرد مولکول های آمونیاک، مخلوط با گاز آرگون، وارد تشدیدگر ابرسانی فابری-پرو می شود که در آن موج ایستاده مد عرضی TEM_{۰۲} میدان ۲ میکروموج، نزدیک به فرکانس گذار مولکولی و در طول موج ۲۳/۷ GHz تولید شده است. گاز مخلوط به دام افتاده در مرکز محفظه خلأ تا دمای ۲/۳ mK سرد شده و سپس با خط 16101 cm^{-1} لیزر رنگی رودامین، به روش یونش چندفوتونی تقویت شده نوسانی، یونیده می شود و طیف تابشی آن در دو حالت میدان میکروموج خاموش و روشن ثبت می گردد. تغییر اندازه حرکت زاویه ای مولکول قطبی آمونیاک، بدون اعمال انرژی مورد نیاز برای این تغییر، نشان دهنده اثر کوانتومی تونل زنی ناشی از جابه جایی اشتراک است. مقاله حاضر نخستین گزارش از نتایج تجربی این تحقیق در دانشگاه بریتیش کلمبیا است.

واژه های کلیدی: به دام اندازی میکروموجی، تشدیدگر ابرسانا، تونل زنی، جابه جایی اشتراک، مولکول های سرد.

۱. مقدمه

فرکانسی، تمام این مطالعات بر پایه افزایش زمان به دام اندازی

مولکول ها و در واقع افزایش زمان برهم کنش است [۳].

با وجود اینکه کاهش دمای مولکول ها به مراتب دشوارتر از اتم ها است، تاکنون دانشمندان در سراسر جهان روش های سردسازی متنوعی را ارائه کرده اند که به دو دسته کلی سردسازی غیرمستقیم و مستقیم تقسیم می شوند. روش غیرمستقیم با تشکیل مولکول های سرد از اتم های سرد سروکار دارد و از طریق باز ترکیب سه تایی اتم های سرد [۴]، تفکیک نوسانی فشباخ [۵] یا تفکیک فوتونی [۶] انجام می شود. روش مستقیم با سردسازی مولکول ها در ترازهای پایه پایدار یا پایین ترین ترازهای چرخشی آنها سروکار دارد که به کمک روش های سرمایش همرفتی، نظیر سرمایش گاز بافر [۷]، امکان پذیر است. روش پیش سرمایش با کاهش سرعت انتقالی،

مولکول های سرد و فوق سرد بر پایه محاسبات کوانتومی اجازه مطالعه رفتارهای جدیدی از ماده را می دهد که بر اثر طول موج های قابل مقایسه با فواصل بین مولکولی شکل می گیرند [۱]. ایجاد امکان مطالعه خواص ذاتی مولکول های به دام افتاده، گستره وسیع تحقیقات نوین نظیر مطالعه برخورد های سرد و طیف سنجی با تفکیک بالا را در بر می گیرد. به علاوه برهم کنش های زیر ۱۰ کلون، واکنش های شیمیایی فضای بین ستاره ای که هنوز ناشناخته باقی مانده اند را معرفی می کند [۲]. افزایش چگالی مولکول های به دام افتاده و کاهش دمای آنها، برهم کنش های درونی مجموعه ای از مولکول ها را پیش بینی می کند. با توجه به معادله تبدیل فوریه و ارتباط معکوس زمان و پهنای

با حالت‌های کوانتومی آمونیاک محاسبه شده و طیف تابشی خطوط مورد نظر، پیش و پس از اعمال میدان، بررسی می‌شود.

۲. وارونگی طیف آمونیاک

در این تحقیق تجربی، پدیده تونل‌زنی که از پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی است، با استفاده از روش کندسازی میکروموجی مولکول‌ها برای نخستین بار در دانشگاه بریتیش کلمبیا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. روش‌ها و امکانات موجود برای کندسازی اشتراک، علاوه بر جرم کم و اثر اشتراک مناسب، مولکول NH_3 را به گزینه‌ای مناسب برای مشاهده اثر کندسازی تبدیل کرده‌اند. گذار وارونگی آمونیاک به‌طور مستقیم به جرم کاهش‌یافته مولکول وابسته است. مولکول آمونیاک، به‌عنوان یک مولکول بالامتقارن، تنها با اعمال میدان در یک جهت، گشتاور دوقطبی و اندازه حرکت زاویه‌ای جدیدی پیدا می‌کند. اندازه حرکت دوقطبی دائمی مولکول، نقطه شروعی ایده‌آل برای برهم‌کنش قوی با میدان الکتریکی خارجی است. در حضور میدان میکروموج، اختلال ترازهای کوانتومی موجب شکسته شدن تقارن ترازها شده و جابه‌جایی طیف ارتعاشی-چرخشی مولکول NH_3 مشاهده می‌شود.

شناخت مدهای ارتعاشی و خواص تقارنی محورهای کارترین با استفاده از نظریه تقارن مولکول‌های غیرجامد، برای طیف‌سنجی مولکول‌های گازی با تفکیک بالا ضروری است. در این آزمایش، مولکول آمونیاک سرد در ترازهای ارتعاشی و الکترونی پایه، اما در ترازهای چرخشی برانگیخته، مطابق شکل ۱ مورد توجه است. بر اساس قوانین اندازه حرکت زاویه‌ای، دو گونه هسته‌ای برای مولکول NH_3 در نظر گرفته می‌شود: اورتو، با اسپین‌های هم‌راستای هسته‌ها، و پارا، با اسپین‌های مخالف هسته‌ها. طبق گزارش‌ها، مولکول آمونیاک تنها در ترازهای پارا دچار جابه‌جایی اشتراک می‌شود [۱۳].

منحنی انرژی پتانسیل به شکل دو چاه پتانسیل متصل به یکدیگر است که دو حالت قرارگیری اتم نیتروژن در دو سوی صفحه اتم‌های هیدروژن در کمینه‌های انرژی متناظر قرار دارند.

مولکول‌ها را برای سرمایش نهایی آماده می‌کند. کندسازی با مهار باریکه مولکولی به کمک میدان الکتریکی خارجی [۹۸]، میدان مغناطیسی خارجی [۱۰]، میدان الکترومغناطیسی نوری [۱۱] یا روش‌های مکانیکی نظیر نازل چرخان انجام می‌شود.

طبیعت کوانتومی گازها در دماهای پایین به‌صورت رفتارهای موجی و برهم‌کنش‌های کوانتومی، نظیر تونل‌زنی، بروز می‌کند و با افزایش سرعت برهم‌کنش، رفتارهای شیمیایی و فیزیکی کاملاً جدیدی را نشان می‌دهد. گازهای کوانتومی اختلال‌یافته و برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی آن‌ها، و نیز مهار مولکول‌ها از طریق تأثیرگذاری بر ترازهای کوانتومی، پنجره‌ای به سوی طیف‌سنجی دقیق ساختار فوق‌ریز می‌گشاید [۱۲]. بنابراین، برای مشاهده رفتار گازهای کوانتومی در دماهای کمتر از دمای چگالش بوز-اینشتین، دیگر نیازی به لیزرهای فمتوثانیه نیست و چنین مطالعاتی در بسیاری از آزمایشگاه‌ها امکان‌پذیر می‌شود. در تحقیق حاضر، ترکیبی از روش سرمایش با گاز بافر، انبساط فراصوتی و برخورد عمود لیزر با مولکول‌ها در حضور میدان الکتریکی میکروموج به‌کار گرفته شده است. انبساط فراصوتی، باریکه مولکول‌های قطبی آمونیاک (NH_3) را جهت‌دار کرده و درجات آزادی آن‌ها را کاهش می‌دهد. سرمایش همرفتی تا دمای ۲ کلوین سبب می‌شود مولکول‌ها ترازهای پایه الکترونی و ارتعاشی و نیز تعدادی از پایین‌ترین ترازهای چرخشی را اشغال کنند و در نهایت، با اعمال میدان الکتریکی خارجی و تحت شرایط نزدیک به شدید، در دام امواج ایستاده میکروموج قرار گیرند. آشکارسازی مولکول‌های به‌دام‌افتاده آمونیاک با استفاده از روش فوق‌حساس یونش دوفوتونی تقویت‌شده نوسانی^۱ توسط آشکارساز MCP^2 انجام می‌شود.

مزیت اصلی مهار میکروموجی، فراهم کردن امکان استفاده از مولکول‌های بزرگ‌تر و نیز افزایش حجم ناحیه به‌دام‌اندازی به دلیل طول موج بلند تابش میکروموج است؛ به‌طوری‌که حجم مولکول‌های محصورشده می‌تواند به چند mm^3 برسد. برای این منظور، ابتدا باید تقارن‌های ارتعاشی-چرخشی و حالت‌های کوانتومی مولکول NH_3 در دماهای پایین شناسایی شوند. سپس برای مشاهده اثر اشتراک، میدان الکتریکی با طول موج و شدت متناسب

۱. (2+1) REMPI

۲. Micro-Channel Plate

آن روی محور تقارن مولکول و محور آزمایشگاهی هستند. h ثابت پلانک است. در میدان میکروموج، تراز $|11M\rangle$ انحراف آبی^۱ ($\Delta > 0$) پتانسیل با مقدار منفی رابطه (۱) را تجربه می کند. بزرگی جابه جایی اشتراک را میدان میکروموج رابطه (۲) و انحراف از فرکانس $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ در مرکز تشدیدگر تعیین می کند که در آن $\nu_0 = 23.7 \text{ GHz}$ و ν فرکانس تابشی پس از به دام افتادن مولکول NH₃ در میدان MW است.

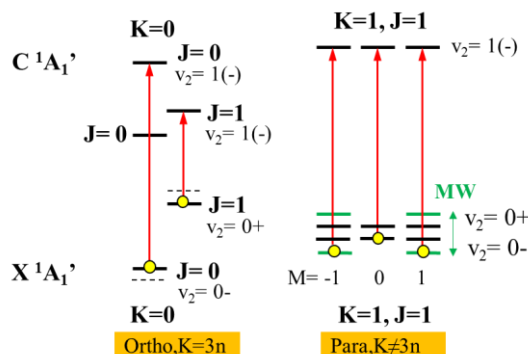
P توان ورودی، Q فاکتور کیفیت، L و Z ابعاد تشدیدگر هستند.

$$E_{MW} = \sqrt{\frac{4.2 Q P_{MW}}{\pi \epsilon_0 \nu_{1,1} V}} \quad (2)$$

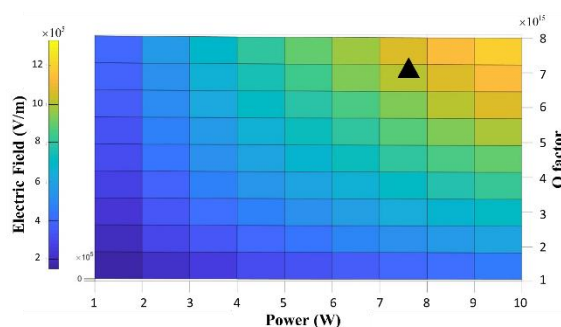
$$Q = \frac{2\pi\nu W}{P_{loss}} \quad (3)$$

بستگی قدرت میدان میکروموج و فاکتور کیفیت تشدیدگر به توان ورودی، طبق روابط (۲) و (۳)، در شکل ۲ نشان داده شده است. رنگ های گرم تر بیانگر افزایش هم زمان قدرت میدان و فاکتور کیفیت تشدیدگر با افزایش توان ورودی هستند. علامت مثلث، محدوده پارامترهای تشدیدگر را پیش از شروع آزمایش با توان ورودی ۸۰ W و فاکتور کیفیت 7×10^6 نشان می دهد.

تعامل بین ممان دوقطبی مولکول و میدان های الکتریکی خارجی با حذف اختلال ترازهای انرژی مولکول همراه است. ترازهایی که سطح انرژی آنها با افزایش میدان خارجی افزایش می یابد، ترازهای جستجوگر میدان ضعیف (LFS^2) و ترازهایی که سطح انرژی آنها با افزایش میدان کاهش می یابد، ترازهای جستجوگر میدان قوی (HFS^3) نامیده می شوند. تنها ایزومر پارای اسپین هسته ای آمونیاک با اعداد کوانتومی $K=1$ و $J=1$ جابه جایی اشتراک قوی نشان می دهد. خطوط رسم شده در شکل ۳ نشان می دهند که اثر اشتراک بر روی خط $|J K\rangle = |11\rangle$ مولکول آمونیاک تابعی از میدان الکتریکی است. بعد از تفکیک مولکول ها در تراز HFS، $|J K M\rangle = |1-1\rangle$ مورد نظر ما خواهند بود و جابه جایی اشتراک قوی را نشان می دهند. توان ورودی برای دریافت انحراف به سمت آبی مد عرضی TEM_{۰۲} [۱۴]، برابر با ۱۰ W،



شکل ۱. گذارهای پایه مولکول NH₃ که دارای REMPI قوی می باشند. تنها خطوط $|X^1A_1'; v_2=0\pm, K=1, J=1, M=\pm 1\rangle$ جابه جایی اشتراک قوی نشان می دهند. ترازهای حساس به اثر اشتراک با رنگ سبز مشخص شده اند [۱۲].



شکل ۲. بستگی فاکتور کیفیت تشدیدگر فابری -پرو میکروموج به مشخصات تشدیدگر و پارامترهای ورودی آن.

چاه های پتانسیل با سدی به ارتفاع 2023 cm^{-1} از یکدیگر تفکیک می شوند. مهار چرخش مولکول قطبی با اعمال میدان الکتریکی انجام می شود و وارونی مولکول با یک حرکت ارتعاشی خاص در تراز پایه تفکیک می شود. حین این نوسانات، اتم نیتروژن از سد پتانسیل تونل زنی می کند و نوسان در سمت دیگر آغاز می شود. رفتار شبه کلاسیک نشان می دهد جابه جایی اشتراک NH₃ با رابطه زیر بیان می شود [۱۳].

$$w_{ac-Stark} = \pm \sqrt{\left(\frac{h\Delta}{2}\right)^2 + \left(\mu E_{MW} \frac{KM}{2J(J+1)}\right)^2} \mp \frac{h\Delta}{2} \quad (1)$$

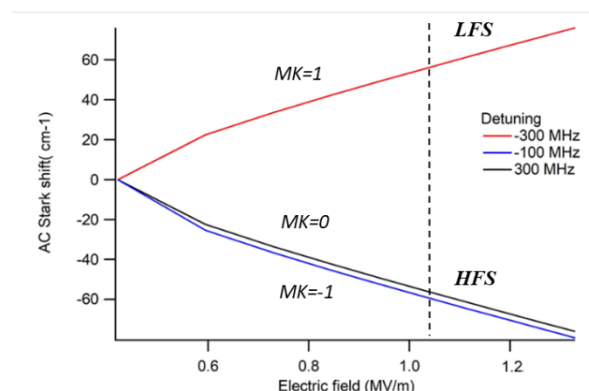
اندازه حرکت مولکول دوقطبی μ ، $1/468 \text{ D}$ ، میدان الکتریکی میکروموج E، J اندازه حرکت زاویه ای مجموع، K و M تصویر

۱. Blue Detuning

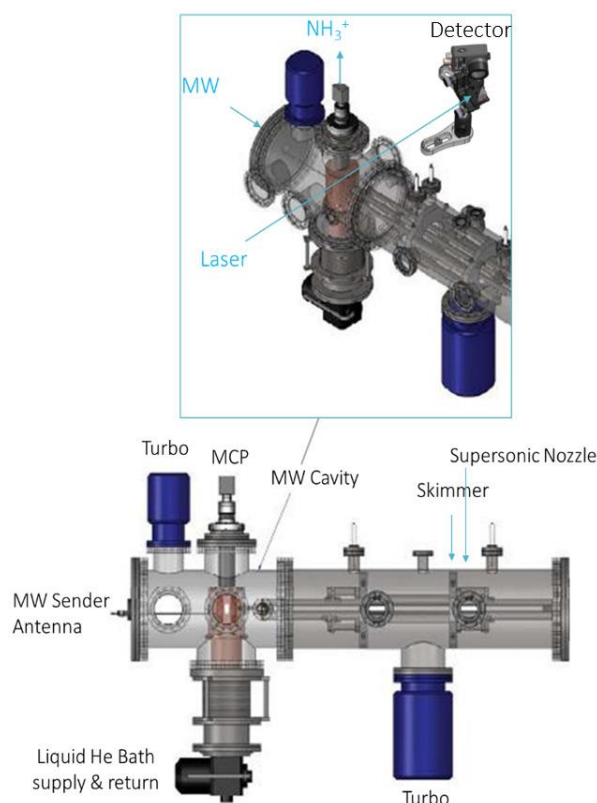
۲. Low Field Seeking

۳. High Field Seeking

متناظر با میدان الکتریکی با دامنه $1/06 \text{ MV/m}$ انتخاب شد که با خط چین عمود در شکل ۳ مشخص شده است.



شکل ۳. جابجایی استارک تراز پایه آمونیاک پارا ($|J K M\rangle = |1 1 1\rangle$) برای انحراف های مختلف.



شکل ۴. بخش های مختلف محفظه خلاء و مسیر عبوری باریکه مولکولی و لیزر تا برخورد در مرکز تشدیدگر میکروموج.

۳. ساختار تجربی

نمایی از بخش های مختلف محفظه و مسیرهایی که نور لیزر و باریکه مولکولی پیموده اند تا با یکدیگر تلاقی کنند، در شکل ۴

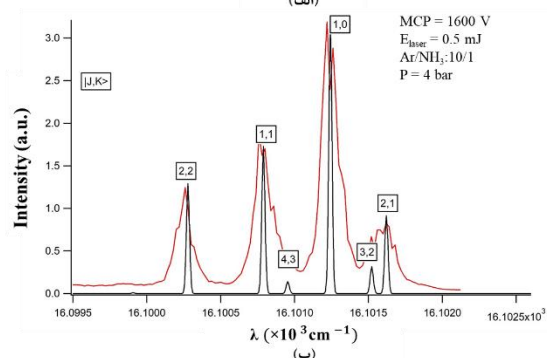
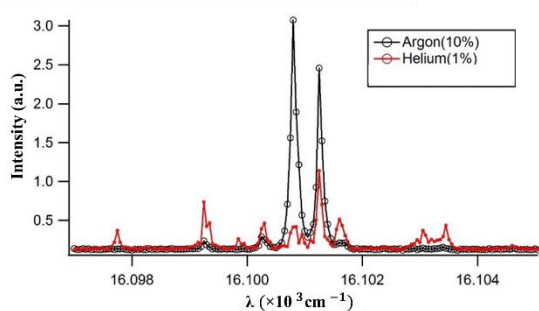
آورده شده است. باریکه مولکولی مرکب از گاز NH_3 و گاز Ar با نسبت غلظت های ۱۰ به ۹۰ درصد، به صورت پالسی به محفظه تزریق می شود. مولکول های گاز مرکب پس از خروج از نازل با فشار ۲ bars داخل محفظه منتشر می شوند. فشار محفظه از طریق پمپ هیدرولیکی متصل به اولین توربو از راست به 10^{-6} Torr می رسد.

فشار خلأ محفظه REMPI با گنجایش ۵ لیتر، حاوی آشکارساز حساس MCP، 10^{-9} Torr است و دمای آن از طریق اتصال کانال زیر محفظه به یخچال ^4He طی مدت ۴ ساعت به mK می رسد. بسته های سرد و همسوی مولکول های آمونیاک با سرعت فراصوت از طریق حفره مرکزی یکی از آینه ها وارد تشدیدگر می شوند. مولکول ها در مرکز تشدیدگر با نور لیزر برخورد می کنند. برای ثبت طیف، فرآیند غیرخطی REMPI به تابش فوتون با شدت بالا نیاز دارد که توسط سامانه لیزر دای کوک پذیر پمپ شده با Nd:YAG تامین می شود. برای این منظور، از دای نارنجی روشن DCM حل شده در اتانول برای پهنای طیفی $620\text{--}640 \text{ nm}$ استفاده شده است. لیزر دای رودامین قرمز رنگ با فرکانس 1064 nm لیزر Nd:YAG پمپ شده و به خط 16101 cm^{-1} کوک می شود. یون آمونیاک به واسطه میدان الکتریکی DC حاکم بر تشدیدگر جذب آشکارساز فوق حساس MCP شده و نهایتاً طیف تابشی مولکول ها با قدرت تفکیک بیش از 0.1 nm ثبت می شود. همان طور که در شکل ۴ مشخص شده است، لیزر از پنجره وارد محفظه شده و پس از عبور از تشدیدگر از پنجره مقابل محفظه خارج می شود. آشکارساز نوری PDA10A که در سمت دیگر محفظه قرار دارد، هم تراز و برخورد مناسب لیزر با مسیر باریکه مولکولی آمونیاک در مرکز تشدیدگر را تضمین می کند.

پیش از این، تشدیدگر میکروموج فابری-پرو با فاکتور کیفیت $5/1 \times 10^4$ در فرکانس $4/5 \text{ GHz}$ توسط Dunseith و همکارانش معرفی شده است [۱۴]. اولین نمونه تشدیدگر میکروموج فابری-پرو با دو آینه کروی از جنس مس و لایه نشانی سرب-قلع (Pb-Sn)، دست ساز بوده و آن را به یک تشدیدگر ویژه با خاصیت ابررسانایی فوق العاده و بالاترین فاکتور کیفیت

۴. نتایج و مشاهدات

سامانه اپتیک یونی شامل دو صفحه فلزی ولتاژ بالا با ولتاژهای V_{۳۰۰}- و V_{۱۶۰۰}+ در بالا و پایین بیرون تشدیدگر است که میدان الکتریکی DC قوی را برای هدایت یون آمونیاک از تشدیدگر به سمت آشکارساز واقع در بخش فوقانی محفظه تأمین می کند.

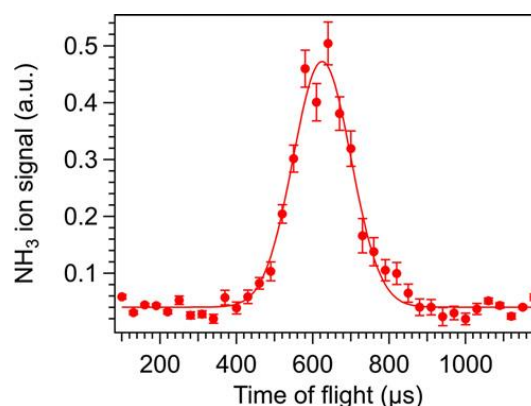


شکل ۷. الف) خطوط تابشی گازهای بافر آرگون (خط مشکی) و هلیوم (خط قرمز) در بازه طول موج رصد مولکول آمونیاک ب) طیف تابشی خطوط با REMPI قوی باریکه مولکولی NH₃/Ar، خط قرمز و منحنی برازش یافته خط مشکی است.

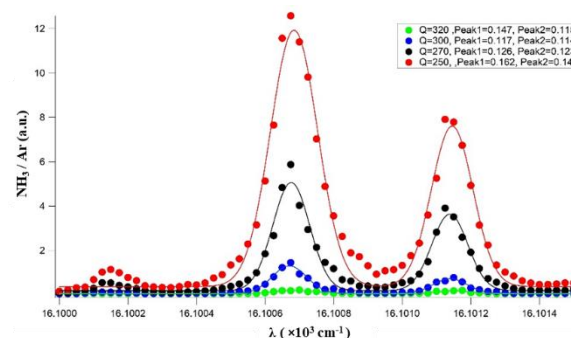
شکل ۵ توزیع زمانی پرواز ترکیب گاز آرگون و آمونیاک با نسبت ده به یک را در طول تشدیدگر نشان می دهد. زمان پرواز میانگین ۶۵ μs برای ثبت بهترین نسبت سیگنال به نوفه به دست آمده است.

تعداد بین بیشینه قله و کمینه پهنای نیمه بیشینه^۱ سیگنال آمونیاک، در گرو تعیین حد بهینه انرژی لیزر برهم کنش است. برای این منظور، با افزایش پله ای توان سوئیچ Q لیزر، طیف NH₃/Ar برای نقاطی با فواصل ۱ cm⁻¹ و میانگین ۳۲ شات برای هر نقطه ثبت گردید (شکل ۶). مادامی که FWHM خطوط به صورت خطی با چگالی مولکول ها تغییر کند، مجاز به

گزارش شده تاکنون تبدیل کرده است [۱۵]. شعاع انحنای آینه ها R=۸۰ mm، قطر D=۹۰ mm و دمای بحرانی تشدیدگر ۷/۲ K است.



شکل ۵. توزیع زمان پرواز باریکه مولکولی NH₃/Ar.



شکل ۶. مقایسه پهنای و شدت دو خط آمونیاک، V_{MCP}=۱۸۰۰ V.

فاصله کانونی لنز کانونی کننده لیزر ۱۰ cm، گام های نمونه برداری ۲۵ cm⁻¹ و تعداد شات هایی که در هر نقطه میانگین گرفته شده ۳۲ است.

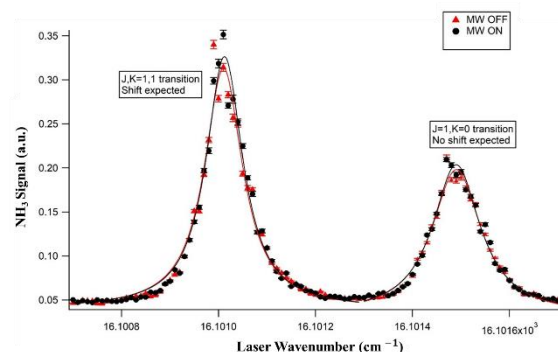
آنتن حاوی میدان میکروموج از طریق حفره کوچک درون یکی از آینه ها به تشدیدگر جفت شده است و توان ورودی ۱۰ W را در محدوده فرکانسی ۲۴۰۰ MHz تا ۲۴۲۵ MHz با بهره ۲۰ dBm پوشش می دهد. در حالت جفت شدگی کامل آنتن به تشدیدگر، فاکتور کیفیت در فرکانس نوسانی آمونیاک، ۲۴/۰۱۲۷ GHz، برابر با ۱۰^۶ است [۱۶]. بر پایه مشخصات تشدیدگر، مدهای TEM_{۰,۰,۹} و TEM_{۰,۲,۹} در فرکانس نوسانی نزدیک به ۲۳/۷ GHz برای به دام انداختن مولکول های NH₃ مناسب هستند [۱۷].

در شرایط آزمایشگاهی مشابه، بازه عدد موج $0/1 \text{ cm}^{-1}$ از طیف تابشی آمونیاک با میانگین ۶۴ ضربه لیزر برای هر پله $0/001 \text{ cm}^{-1}$ رصد شد. همانطور که انتظار می‌رفت خط $|J=1, K=1\rangle$ مولکول آمونیاک در دام میدان الکتریکی، بر اثر برهم‌کنش نزدیک به رزونانس با مد نوسانی $\text{TEM}_{0,2,9}$ میدان میکروموج در مرکز تشدیدگر و از بین رفتن اختلال اسپین هسته، به سمت آبی جابه‌جا شده است؛ در صورتی که حالت غیرحساس به اشتراک $|J=1, K=0\rangle$ بدون تغییر باقی می‌ماند. جابه‌جایی اشتراک خط 16101 cm^{-1} حدود $0/005 \text{ cm}^{-1}$ است.

۵. نتیجه‌گیری

طیف سنجی دقیق گازها در گرو کنترل درجات آزادی داخلی و خارجی از طریق سردسازی مولکول‌های گازی در فضای خلأ است. مهار چرخش در میدان الکتریکی، ترازهای کوانتومی مولکول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طیف REMPI مولکول یون آمونیاک نشان می‌دهد که در حالی که خط اورتوی غیرحساس به جابه‌جایی اشتراک همواره ثابت است، خط طیفی پارا قطعیت وارونگی مولکول آمونیاک را پس از اعمال میدان میکروموج اثبات می‌کند. گذارهای جفت‌شده ارتعاشی-چرخشی مولکول قطبی NH_3 بر اثر مهار میکروموج در تشدیدگر فابری-پرو جابه‌جا می‌شود و با وجود عدم اعمال انرژی لازم، مولکول آمونیاک در سمت دیگر چاه پتانسیل در ترازهای چرخشی برانگیخته خود قرار می‌گیرد.

افزایش توان لیزر هستیم. مشخص است که خط مشکی، آستانه اشباع توان لیزر معادل انرژی $0/5 \text{ mJ}$ را نشان می‌دهد. از مقایسه خطوط تابشی گازهای نجیب هلیوم و آرگون در شکل ۷ (الف) می‌توان دریافت که با وجود مشاهده تنوع بیشتر خطوط در طیف تابشی هلیوم، گاز بافر آرگون با توجه به خطوط پر قدرت در محدوده طیفی مورد نیاز، انتخاب بهتری برای ترکیب با گاز آمونیاک است.



شکل ۸. طیف فرکانس چرخشی آمونیاک. خط مشکی طیف REMPI(۲+۱) را نشان می‌دهد زمانی که پالس میکروموج روشن است.

طیف تابشی خطوط با REMPI قوی باریکه مولکولی NH_3/Ar با نرخ آمونیاک $1/10\%$ ، ولتاژ آشکارساز 1600 V ، انرژی لیزر $0/5 \text{ mJ}$ و فشار محفظه 4 bar در شکل ۷ (ب) ترسیم شده است. با برازش خطوط مشکی به خط قرمز رنگ، طول موج هر خط در طیف تابشی تعیین گردید. انطباق خطوط مجاور ناحیه مورد نظر با طول موج‌های خطوط ارتعاشی-چرخشی نشانه‌گذاری شده [۱۷]، معرف صحت نشانه‌گذاری طول موج خط ارتعاشی-چرخشی $|J=1, K=1\rangle$ آمونیاک است.

مراجع

1. R Krems, B Friedrich, and W C Stwalley, CRC Press (2009).
2. H L Bethlem, G Berden, F M H Crompvoets, R T Jongma, A J A Van Roij, and G Meijer, *Nature* **406** (2000) 491.
3. R. V Krems, *Int. Rev. Phys. Chem.* **24** (2005) 99.
4. S. Jochim et al., *Science* **302** (2003) 2101.
5. T. Köhler, K. Góral, and P. S. Julienne, *Rev. Mod. Phys.* **78** (2006) 1311.
6. H. R. Thorsheim, J. Weiner, and P. S. Julienne, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2420.
7. J. M. Doyle, B. Friedrich, J. Kim, and D. Patterson, *Phys. Rev. A.* **52** (1995) 2515.
8. H. L. Bethlem, G. Berden, and G. Meijer, *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 1558.
9. F. S. Tahsildaran F et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23** (2021) 4094.
10. Z. Sida, Diss. University of British Columbia (2014).

11. K. Enomoto and T. Momose, *Phys. Rev. A.* **72** (2005) 61403.
12. C. H. Townes and A. L. Schawlow, *Microwave spectroscopy*. Courier Corporation (2013).
13. H. Odashima, S. Merz, K. Enomoto, M. Schnell, and G. Meijer, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 253001.
14. D. P. Dunseith, S. Truppe, R. J. Hendricks, B. E. Sauer, E. A. Hinds, and M. R. Tarbutt, *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys* **48** (2015) 45001.
15. K. Enomoto et al., *Appl. Phys. B.* **109** (2012) 149.
16. F. S. Tahsildaran F et al., *J. Phys. B At. Mol. Phys.* **54** (2021) 15101.
17. O. Nourbakhsh, Diss. University of British Columbia (2015).