



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴۰۰-۱۲ بهمن



بررسی مدهای نوسانی تشدیدگر میکروموج

فاطمه سادات تحصیلداران^{۱،۲،۳*}، امیر حسین فرهبد^۲، رسول ملک فر^۱، تاکاماسا موکوسه^۳

^۱ گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ پژوهشکده پلاسمای گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران

^۳ دانشکده فیزیک و نجوم، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکور، بریتیش کلمبیا، کانادا

tfmahdieh@chem.ubc.ca*

چکیده - در این پژوهش مدهای نوسانی تشدیدگر میکروموج برای به دام انداختن مولکول ها شناسایی شدند. فاصله مرکز تا مرکز آینه های کروی بطور تقریبی 60 ± 5 mm در بازه تغییرات 5 ± 1 mm است تا فرکانس نوسانی تشدیدگر نزدیک به فرکانس گذار مولکول باشد. برای به حداقل رسانیدن تلفات پراش و به دام انداختن پر قدرت مولکول NH₃ مد پایه TEM₁₁₁ انتخاب شد. نتایج نشان دادند میدان الکتریکی بدون هیچ برانگیزش عرضی نه بیشینه در طول محور تشدیدگر دارد.

کلید واژه- تشدیدگر میکروموج، طیف سنجی، مدهای نوسانی، مولکول آمونیاک.

Investigating the Resonance Modes of a Microwave Cavity

Fatemeh S. Tahsildaran^{۱،۲،۳*}, Amir Hossein Farahbod^۱, Rasoul Malekfar^۱, Takamasa Momose^۳.

^۱ دانشگاه تربیت مدرس، دانشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

^۲ دانشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای،
Sciences and Technologies, AEOI, Tehran, Iran.

^۳ Department of Physics and Astronomy, The University of British Columbia, Vancouver,
Canada.

tfmahdieh@chem.ubc.ca*

Abstract- In the present project, resonance modes of the microwave cavity for trapping molecules were assigned. The distance between of the mirrors is exactly ۶۰ mm can be varied by ± ۵ mm in order to achieve the resonator mode close to the molecular transition frequency. TEM₁₁₁ mode is chosen to minimize the diffraction losses as it to be used for strong trapping NH₃ molecules. The electric field has nine antinodes located along the length of the cavity as there are no transverse excitation.

Keywords: Microwave Cavity, Spectrometry, Frequency Mode, Ammonia Molecule.

R و d شعاع انحنا و فاصله بین آینه‌ها است. تشدیدگر مورد استفاده در این تحقیق فابری-پرو دست ساز با شعاع انحنای $R_1=R_2=80\text{ mm}$ است.

فرکانس‌های نوسانی مدهای TEM_{plq} در این تشدیدگر با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\nu_{p,l,q} = \frac{c}{2d} \left[q + \frac{p+l+1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{d}{R}\right) \right] \quad (3)$$

از طرفی توزیع میدان الکتریکی برای مدهای $\text{TEM}_{..q}$ در نوسانگر باز بصورت

$$\vec{E}(\rho, \phi, z) = \begin{pmatrix} E_\rho(\rho, z) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

است که در آن مولفه شعاعی میدان الکتریکی از رابطه (5) پیروی می‌کند.

$$E_\rho = \frac{E_0}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}}} \exp \left[\frac{k\rho^2}{2z_0(1 + \frac{z^2}{z_0^2})} \right] \times \cos \left[kz - \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{k\rho^2}{2z(1 + \frac{z^2}{z_0^2})} \right] \quad (5)$$

بردار موج، z_0 طول ریلی، $w(z)$ پهنای باریکه وابسته به موقعیت در امتداد محور طولی نوسانگر، w_0 کمر باریکه (پهنای باریکه گاوی در مرکز تشدیدگر) است. در رابطه ۶، انحنای آینه تشدیدگر و d فاصله دو آینه از یکدیگر mm است.

$$\begin{aligned} z_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{2Rd - d^2} \\ E_{0,\max} &= \sqrt{\frac{4P_{IN}Q}{\pi\varepsilon_0cz_0d}} \\ w(z) &= w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

توزیع میدان الکتریکی $E(\rho, z)$ به موقعیت سطحی (ρ, z) در نوسانگر فابری-پرو و فاکتورهای مربوط به تشدیدگر و آینه‌های کروی وابسته است. حل معادله میدان

مقدمه

طی چند دهه اخیر در کاربردهای فراوان در زمینه تفکیک طیفی تجربه جالبی برای محققان بوده و کنترل باریکه مولکل‌های قطبی خنثی در فاز گازی به کمک میدان‌های خارجی پیشرفت چشمگیر داشته است [۱-۳]. مولکول‌های قطبی مانند مولکول آمونیاک (NH_3) با روش سردسازی همrfقی تا دمای ۲ کلوین سرد می‌شوند و در میدان الکتریکی خارجی تحت شرایط نزدیک به نوسان در امواج ایستاده میکروموج (AC) (MW) به دام میافتد. طیف تابشی با روش یونیزاسیون چندفوتوئی ارتقا یافته نوسانی آشکار می‌شود.

مزیت اصلی مهار میکروموج امکان استفاده از مولکول‌های بزرگ‌تر و با توجه به طول موج‌های بلند میکروموج، حجم بیشتر محصور سازی مولکول‌ها، در حد چند mm^3 است. بعلاوه از آنجا که مولکول‌های بزرگ‌تر عمدتاً حامل انرژی جنبشی بسیار بزرگ‌تر هستند، با روش‌های معمول قابل کنترل نیستند و همچنین محاسبات تئوری دقیق برهmekنش با میدان‌های میکروموج با چالش بزرگتری روبه رو خواهد بود. در این مقاله به بررسی چگونگی شناسایی مدهای نوسانی تشدیدگر و تمرکز میدان MW برداشته شده از دام انداختن مولکول‌های قطبی با بیشترین توان خواهیم پرداخت.

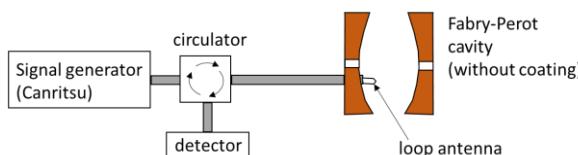
تئوری حاکم بر مدهای نوسانی تشدیدگر

برای کاهش اتلاف پراش بر مد پایه عرضی تشدیدگر $\text{TEM}_{plq}: p=l=0$ متمرکز می‌شویم. q معرف تعداد مد طولی و متناسب با طول تشدیدگر L است. پایداری تشدیدگر فابری-پرو و برقراری شرط نوسان به ترتیب با روابط ۱ و ۲ مشخص می‌شود.

$$g_i = 1 + d / R_i \quad (1)$$

$$L = 2q / \lambda \quad (2)$$

و توسط آشکارساز دیود Agilent ۸۴۷۳، مجهز به کاہنده Midisco ۵۲۳۳۵ MDC ۸۱۶۵-۳۰، آشکار می‌شود.



شکل ۲: آرایش تجربی برای اندازه گیری بازتاب میدان میکروموج از تشدیدگر فابری-پرو، [۴].

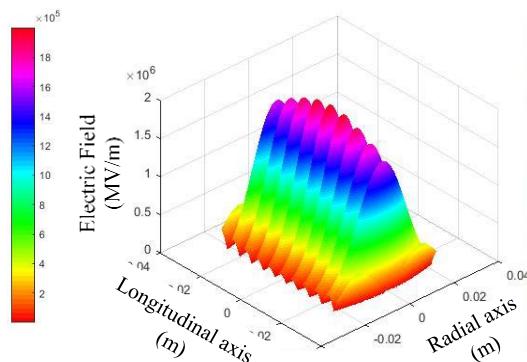
انطباق فرکانس گذار مولکول مورد نظر بر یکی از نه مد طولی محاسبه شده هدف اصلی این پژوهش است. در عمل تنها در حوزه فرکانسی ۱۱ تا ۳۱ GHz تشدید مشاهده می‌شود. شناسایی دقیق مدهای نوسانی مستلزم اسکن فرکانس و شدت تمامی خطوط نوسانی است و دریافت الگوی تکرارشونده درون آن‌ها است. بازه ۱۰ GHz تا ۳۰ و گام ۰/۰۱ GHz رصد شد. به علت سنگین شدن حجم اطلاعات بازه‌ی مورد نظر به ۲۰ بخش تقسیم شد و نتایج حاصل در شکل ۳ ترسیم شده است.

تطبیق فرکانس گذار وارونی تراز پایه ارتعاشی- چرخشی آمونیاک (۲۴/۰۸۵ GHz) بر مد پایه تشدیدگر است. به کمک روابط ۲ و ۷ با تنظیم فاصله دو آینه، اختلاف فرکانس خط بیشینه مرکز طیف تجربی تا حد امکان به فرکانس ۲۴/۱ GHz نزدیک شد.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (7)$$

فرکانس نوسانی، c سرعت نور و L فاصله بین مدهای نوسانی است. در صورتیکه بیشینه میدان ارتعاشی بر یکی از مدهای تخمینی منطبق شود قله تمامی مدهای همسایه بر مد پایه عرضی منطبق خواهد شد.

الکتریکی قطبیده خطی با تقارن استوانه‌ای با نرم افزار متلب بصورت شکل ۱ انجام شده است. تمرکز بر مد پایه عرضی اهمیت به سزاوی در کاهش اتلاف پراش تشدیدگر فابری-پرو دارد. در اینجا توزیع میدان الکتریکی با مد TEM_{0..0} معرف ۹ بیشینه دامنه بر محور طولی تشدیدگر است.

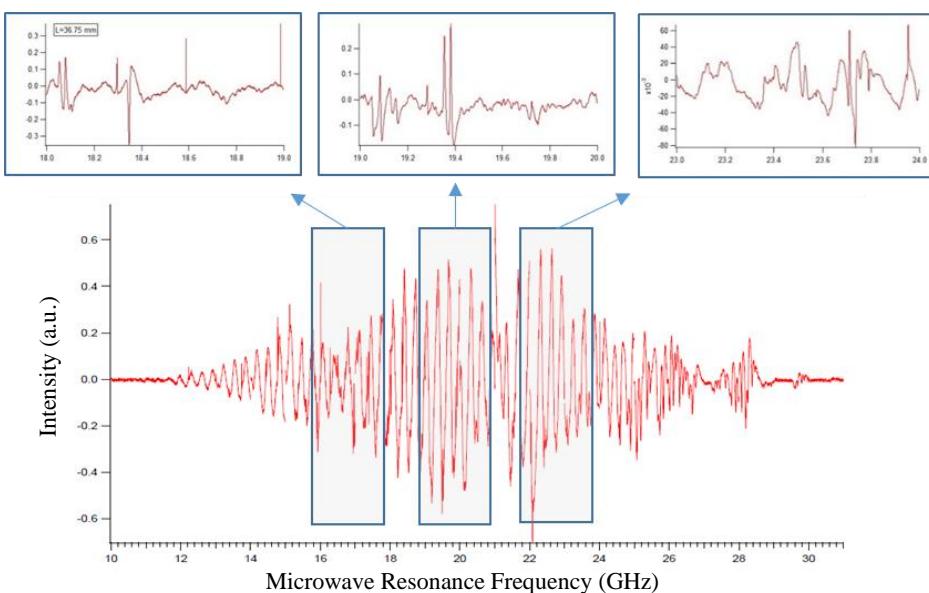


شکل ۱: توزیع میدان الکتریکی مد TEM_{0..0} تشدیدگر فابری-پرو.

ساختار تجربی

آرایش تجربی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. سیگنال میکروموج با ترکیب یک ژنراتور (Anritsu) و تقویت کننده MG3693C و تقویت کننده MKU ۲۴۱۰ A (۱۰ W) تولید می‌شود. آنتن تطبیق دهنده از کابل کوآکسیال نیمه سخت احاطه شده با یک سامانه انتقال دهنده که می‌تواند عمق نفوذ آنتن را در تشدیدگر تغییر دهد احاطه شده است. آنتن از حفره درون یکی از آینه گذشته وارد تشدیدگر می‌شود. ارسال نمونه ای از سیگنال پیوسته میکروموج به کامپیوتر امکان پیش نمایش سیگنال قبل از ارسال به تشدیدگر را فراهم می‌کند.

بازگشت این دامنه از توان تقویت شده صدمات جبران ناپذیری به ژنراتور وارد می‌کند. چرخاننده SMC1826 هرگونه بازتاب به منبع تغذیه را مسدود می‌کند. میکروموج تقویت شده با آنتن به تشدیدگر تزریق می‌شود و پس از نوسان از طریق همین آنتن به چرخاننده تک جهته برگشته



شکل ۳: اسکن فرکانسی تمام مدهای نوسانی تشدیدگر میکروموج.

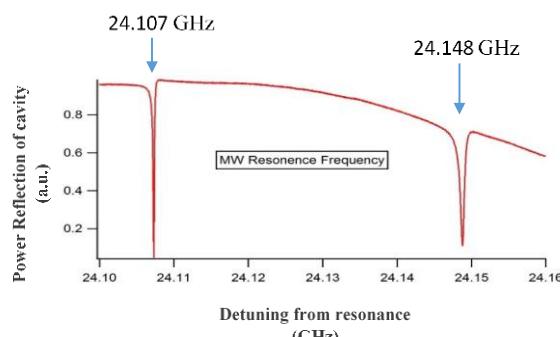
نتیجه‌گیری

تشدیدگر میکروموج دست ساز برای به دام انداختن مولکول های قطبی مشخصه یابی شد. به منظور اعمال بیشینه محصورسازی در محل برخورد باریکه مولکول NH_3 با میدان میکروموج در مرکز تشدیدگر مدهای نوسانی تشدیدگر شناسایی شدند.

مرجع‌ها

- [۱] S. D. Hogan, C. Seiler, and F. Merkt, "Rydberg-state-enabled deceleration and trapping of cold molecules," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, no. 12, p. 123001, 2009.
- [۲] L. D. Pietanza, G. Colonna, A. De Giacomo, and M. Capitelli, "Kinetic processes for laser induced plasma diagnostic: a collisional-radiative model approach," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 65, no. 8, pp. 616–626, 2010.
- [۳] H. L. Bethlem, F. M. H. Crompvoets, R. T. Jongma, S. Y. T. van de Meerakker, and G. Meijer, "Deceleration and trapping of ammonia using time-varying electric fields," *Phys. Rev. A*, vol. 65, no. 5, p. 05416, 2002.
- [۴] F. S. Tahsildaran F et al., "A superconducting Fabry-Perot cavity for trapping cold molecules," *J. Phys. B At. Mol. Phys.*, vol. 54, no. 1, p. 10101, 2021.

بالای شکل ۳ سه مد مجاور در بالای طیف کلی آورده شده است. نهایتاً میزان تاثیر تقویت کننده روی جابجایی فرکانس ها را تعیین و در فرکانس نهایی در نظر می گیریم. تکرار مدهای مجاور در اسکن های بعدی جفت شدن فرکانس مدنظر بر مد مرکزی را نشان می دهد، شکل ۴. با توجه به خاصیت تقارنی تشدیدگر در این محدوده دو پالس نوسانی مشاهده می شود که هردو آنها نزدیک به فرکانس گذار مولکول NH_3 است.



شکل ۴: فرکانس های نوسانی تشدیدگر میکروموج پس از تنظیم تشدیدگر.