بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

بررسی مدهای نوسانی تشدیدگر میکروموج

فاطمه سادات تحصیلداران[۱و۲و۳*]، امیر حسین فرهبد[۲]، رسول ملک فر[۱]، تاکاماسا مومسه[۳]

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

[۲] پژوهشکده پلاسما و 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 ۶۰ mm در بازه تغییرات ۵ mm ± انتخاب شده است تا فرکانس نوسانی تشدیدگر نزدیک به فرکانس گذار مولکول باشد. برای به حداقل رساندن تلفات پراش و به دام انداختن پر قدرت مولکول NH_3 مد پایه $TEM_{0,0,q}$ انتخاب شد. نتایج نشان دادند میدان الکتریکی بدون هیچ برانگیزش عرضی نه بیشینه در طول محور تشدیدگر دارد.

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

Investigating the Resonance Modes of a Microwave Cavity

FatemehS. Tahsildaran[۱,۲,۳*], Amir Hossein Farahbod [۲],Rasoul Malekfar[۱],Takamasa Momose [۳].

[۱] Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[۲] 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. $TEM_{0,0,q}$ mode is chosen to minimize the diffraction losses as it to be used for strong trapping NH_3 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

طی چند دهه اخیر درک اثر مکانیک کوانتومی چاه پتانسیل جدای از کاربردهای فراوان در زمینه تفکیک طیفی تجربه جالبی برای محققان بوده و کنترل باریکه مولکل های قطبی خنثی در فاز گازی به کمک میدان های خارجی پیشرفت چشمگیر داشته است [۳-۱]. مولکول های قطبی مانند مولکول آمونیاک (NH_3) با روش سردسازی همرفتی تا دمای ۲ کلوین سرد می شوند و در میدان الکتریکی خارجی تحت شرایط نزدیک به نوسان در امواج ایستاده میکروموج (MW) AC به دام میافتد. طیف تابشی با روش یونیزاسیون چندفوتونی ارتقا یافته نوسانی آشکار می شود.

مزیت اصلی مهار میکروموج امکان استفاده از مولکول های بزرگ تر و با توجه به طول موج های بلند میکروموج، حجم بیشتر محصور سازی مولکول ها، در حد چند mm^3 است. بعلاوه از آنجا که مولکول های بزرگتر عمدتاً حامل انرژی جنبشی بسیار بزرگتر هستند، با روش های معمول قابل کنترل نیستند و همچنین محاسبات تئوری دقیق برهمکنش با میدان های میکروموج با چالش بزرگتری روبه رو خواهد بود. در این مقاله به بررسی چگونگی شناسایی مدهای نوسانی تشدیدگر و تمرکز میدان MW برمد پایه برای به دام انداختن مولکول های قطبی با بیشترین توان خواهیم پرداخت.

تئوری حاکم بر مدهای نوسانی تشدیدگر

برای کاهش اتلاف پراش بر مد پایه عرضی تشدیدگر یعنی TEM_{plq}:$p=l=0$ متمرکز می شویم. 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 می شود.

$$g_i = 1 + d / R_i \qquad (۱)$$

$$L = 2q / \lambda \qquad (۲)$$

R و d شعاع انحنا و فاصله بین آینه ها است. تشدیدگر مورد استفاده در این تحقیق فابری-پرو دست ساز با شعاع انحنای $R_1=R_2=۸۰\,mm$ است.

فرکانس های نوسانی مدهای TEM_{plq} در این تشدیدگر با رابطه زیر داده می شود:

$$\nu_{p,l,q} = \frac{c}{2d}\left[q + \frac{p+l+1}{\pi}\arccos\left(1-\frac{d}{R}\right)\right] \qquad (۳)$$

از طرفی توزیع میدان الکتریکی برای مد TEM_{00q} در نوسانگر باز بصورت

$$\vec{E}(\rho,\phi,z) = \begin{pmatrix} E_\rho(\rho,z) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

است که در آن مولفه شعاعی میدان الکتریکی از رابطه (۵) پیروی میکند.

$$E_\rho = \frac{E_0}{\sqrt{1+\frac{z^2}{z_0^2}}}\exp\left[\frac{k\rho^2}{2z_0(1+\frac{z^2}{z_0^2})}\right]\times \cos\left[kz - \arctan(\frac{z}{z_0}) + \frac{k\rho^2}{2z(1+\frac{z_0^2}{z^2})}\right] \qquad (۵)$$

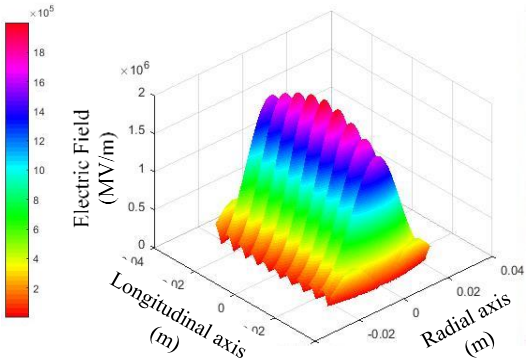
k بردار موج، z_0 طول ریلی، $w(z)$ پهنای باریکه وابسته به موقعیت در امتداد محور طولی نوسانگر، w_0 کمر باریکه (پهنای باریکه گاوسی در مرکز تشدیدگر) است. در رابطه ۶، R انحنای آینه تشدیدگر و d فاصله دو آینه از یکدیگر mm ۶۰ است.

$$z_0 = \frac{1}{2}\sqrt{2Rd - d^2}$$
$$E_{0,\max} = \sqrt{\frac{4P_{IN}Q}{\pi\varepsilon_0 c z_0 d}} \qquad (۶)$$
$$w(z) = w_0\sqrt{1+\frac{z^2}{z_0^2}}$$

توزیع میدان الکتریکی $E(\rho,z)$ به موقعیت سطحی (ρ,z) مد TEM_{00q} در نوسانگر فابری- پرو و فاکتورهای مربوط به تشدیدگر و آینه های کروی وابسته است. حل معادله میدان

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

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

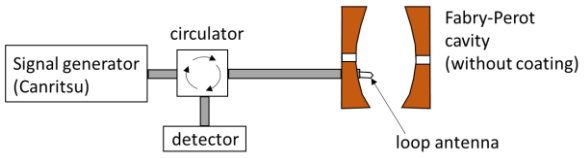


شکل ۱: توزیع میدان الکتریکی مد $TEM_{0,q}$ تشدیدگر فابری-پرو .

ساختار تجربی

آرایش تجربی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. سیگنال میکروموج با ترکیب یک ژنراتور (Anritsu MG۳۶۹۳C) و تقویت کننده (MKU ۲٤۱۰ A) تا ۱۰ W تولید می شود. آنتن تطبیق دهنده از کابل کوآکسیال نیمه سخت احاطه شده با یک سامانه انتقال دهنده که می تواند عمق نفوذ آنتن را در تشدیدگر تغییر دهد احاطه شده است. آنتن از حفره درون یکی از آینه گذشته و وارد تشدیدگر می شود. ارسال نمونه ای از سیگنال پیوسته میکروموج به کامپیوتر امکان پیش نمایش سیگنال قبل از ارسال به تشدیدگر را فراهم می کند.

بازگشت این دامنه از توان تقویت شده صدمات جبران ناپذیری به ژنراتور وارد می کند. چرخاننده SMC۱۸۲٦ هرگونه بازتاب به منبع تغذیه را مسدود می کند. میکروموج تقویت شده با آنتن به تشدیدگر تزریق می شود و پس از نوسان از طریق همین آنتن به چرخاننده تک جهته برگشته و توسط آشکارساز دیود Agilent۸٤۷۳، مجهز به کاهنده ۳۰-MDC۸۱٦٥ ٥۲۳۳٥ Midisco، آشکار می شود.



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

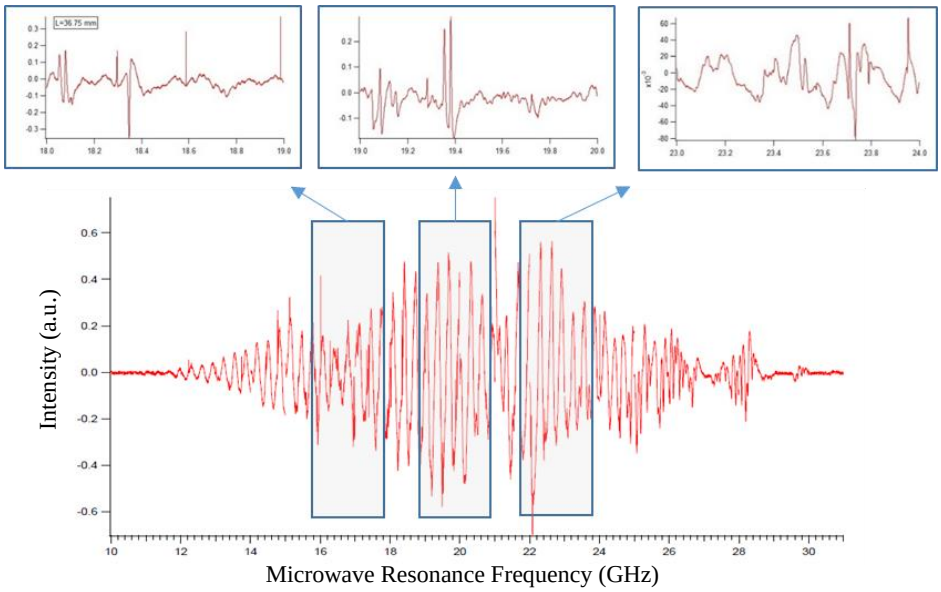
انطباق فرکانس گذار مولکول مورد نظر بر یکی از نه مد طولی محاسبه شده هدف اصلی این پژوهش است. در عمل تنها در حوزه فرکانسی ۱۱ GHz تا ۳۱ تشدید مشاهده می شود. شناسایی دقیق مدهای نوسانی مستلزم اسکن فرکانس و شدت تمامی خطوط نوسانی است و دریافت الگوی تکرارشونده درون آن ها است. بازه ۱۰GHz تا ۳۰ و گام های ۰/۰۱ GHz رصد شد. به علت سنگین شدن حجم اطلاعات بازه ی 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.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \qquad (۷)$$

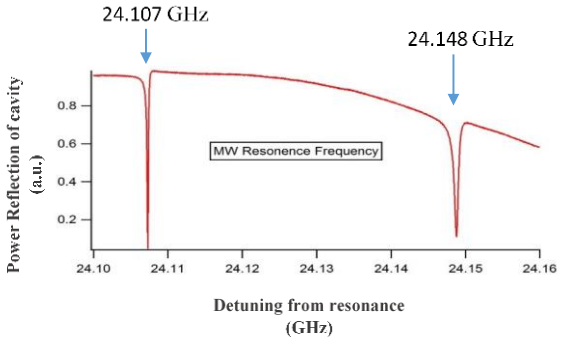
ν فرکانس نوسانی، c سرعت نور و L فاصله بین مدهای نوسانی است. در صورتیکه بیشینه میدان ارتعاشی بر یکی ازمدهای تخمینی منطبق شود قله تمامی مدهای همسایه بر مد پایه عرضی منطبق خواهد شد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]



شکل ۳: اسکن فرکانسی تمام مدهای نوسانی تشدیدگر میکروموج.

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 ازتنظیم تشدیدگر.

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. ۱۰۳, no. ۱۲, p. ۱۲۳۰۰۱, ۲۰۰۹.

[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. ٦٥, no. ٨, pp. ٦١٦–٦٢٦, ٢٠١٠.

[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. ٦٥, no. ٥, p. ٥٣٤١٦, ٢٠٠٢.

[۴] F. S. Tahsildaran F *et al.*, “A superconducting Fabry-Perot cavity for trapping cold molecules,” *J. Phys. B At. Mol. Phys.*, vol. ٥٤, no. ١, p. ١٥١٠١, ٢٠٢١.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]