

SO₂ and SF₆ collisional relaxation time measurement by laser photoacoustic spectroscopy method

M.R. Mohebbifar^[1], J. Khalilzadeh^[1], B. Dibaee^[2]

^[1] Physics research center, Imam-Hosein University, Tehran, Iran.

^[2] Laser & Photonics Research Center, Malek-Ashtar technical University, Tehran, Iran.

Receive: 2011.08.16

Accept: 2012.01.10

Abstract

In this experimental study the collisional relaxation time of SO₂ and SF₆ was determined using laser photoacoustic spectroscopy method. A homemade LPAS cell was fabricated in order to investigate the variation of signal and resonant frequency in terms of buffer gas pressure for several species such as: He, N₂, and Ar. By this method collisional relaxation (which is the origin of photoacoustic effect) time was measured. It was shown that the buffer gas pressure notably affects the collisional relaxation times of gases such as SO₂ and SF₆. The measured relaxation times of SO₂ and SF₆ were at order of milliseconds and 100 microseconds respectively.

Keywords

Laser photoacoustic spectroscopy;
Relaxation time;
Collisional relaxation;
Chemical gases detection;
Acoustic resonator.

اندازه‌گیری زمان واهلش بر خوردی گازهای SO_2 و SF_6 با استفاده از طیف‌نگاری فوتوآکوستیک لیزری

محمدرضا محبی فر^[۱]، جواد خلیل‌زاده^[۲]، باقر دیبائی^[۳]

^[۱] مرکز تحقیقات فیزیک دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^[۲] مرکز تحقیقات فیزیک دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^[۳] پژوهشکده سامانه‌های فوتونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر پردیس تهران؛

mmohebfar@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۲۵

تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰

چکیده

در این تحقیق تجربی زمان واهلش بر خوردی گازهای SO_2 و SF_6 به روش طیف‌نگاری فوتوآکوستیک لیزری اندازه‌گیری شده است. یک سلول آشکارسازی فوتوآکوستیک لیزری به منظور بررسی تجربی تغییرات سیگنال و فرکانس تشدید در انواع گازهای بافر هلیوم، نیتروژن، آرگون و همچنین با تغییر فشار آن‌ها ساخته شد. با استفاده از این روش زمان واهلش بر خوردی که منشاء پدیده فوتوآکوستیک است، اندازه‌گیری شد. نشان داده شد که فشار گاز بافر تأثیر چشمگیری در زمان فروافت بر خوردی گازها، از جمله SO_2 و SF_6 ، دارد و در هر سه بافر زمان فروافت بر خوردی گازهای SO_2 و SF_6 به ترتیب از مرتبه میلی ثانیه و ۱۰۰ میکروثانیه است.

واژه‌های کلیدی: طیف‌نگاری فوتوآکوستیک لیزری، زمان واهلش،

واهلش بر خوردی، تشدید گر صوتی، آشکارسازی گازهای شیمیایی

۱. مقدمه

به دلیل این که ناحیه فرسرخ میانی ($2/5-25 \mu m$) یکی از پنجره‌های اتمسفر برای امواج الکترومغناطیس است و بیشتر گازهای شیمیایی در ناحیه فرسرخ میانی و بخصوص ناحیه $9-11 \mu m$ دارای خطوط جذبی قوی می‌باشند، این ناحیه از طیف الکترومغناطیس برای آشکارسازی مواد شیمیایی و گازها از طریق طیف‌سنجی فرسرخ استفاده می‌شود. گرچه روش‌های فراوانی برای آشکارسازی نشت جزئی گازها وجود دارد، اما روش‌های لیزری به دلیل باریک بودن طیف گسیلی لیزرها برتری بالایی

نسبت به روش‌های فیزیکی و الکتروشیمیایی دارند. از بین روش‌های طیف‌نگاری فرسرخ، روش طیف‌نگاری فوتوآکوستیک لیزری روشی با قابلیت‌های زمان آشکارسازی بسیار پایین، حساسیت بسیار بالا (از مرتبه ppb) و گزینش پذیری مناسب (در صورت استفاده از منبع دمش کوک‌پذیر)، می‌باشد. این پدیده را اولین بار الکساندر گراهام بل^۱ در سال ۱۸۸۰ مشاهده کرد. وی با مدوله کردن نور خورشید توسط برشگر^۲ و هدایت آن به درون یک حباب شیشه‌ای حاوی گاز، امواج صوتی ایجاد شده توسط جذب نور را شنید. به دلیل نبود آشکارساز مناسب در آن زمان، بل از گوش خود به عنوان آشکارساز استفاده نمود. بر اساس این پدیده وینگروف^۳ دستگاه آشکارسازی فوتوآکوستیک را ساخت. به دلیل مزایای قابل توجه، این روش همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است.

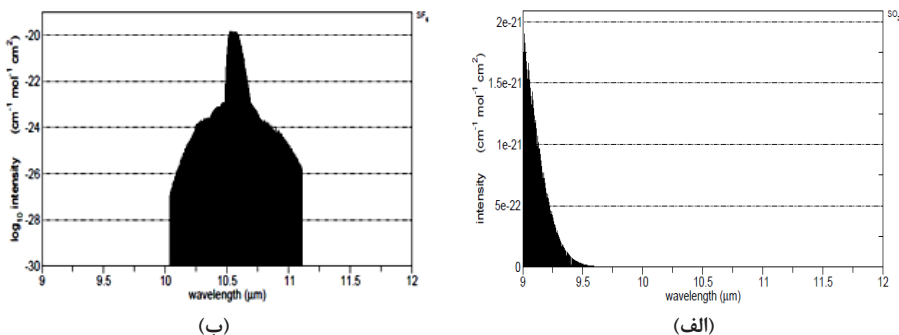
ساز و کار سامانه طیف‌نگاری فوتوآکوستیک لیزری مبتنی بر تابش باریکه لیزری با طول موج مشخص است که باید در ناحیه طیف جذبی گاز مورد نظر قرار داشته باشد. با مدوله کردن نور لیزر توسط یک برشگر و جذب باریکه لیزر مدوله شده توسط ملکول‌ها، دمای گاز به صورت تناوبی افزایش و کاهش یافته و سبب تولید امواج فشاری خواهد شد. این امواج صوتی با فرکانس مدوله شدگی تولید خواهند نمود که در نهایت توسط آشکارساز (میکروفون) اندازه‌گیری می‌شود. دامنه موج آکوستیکی تولید شده متناسب با غلظت ماده است. با آشکارسازی این موج آکوستیکی به وسیله میکروفون می‌توان غلظت گاز، و توسط طول موج لیزر دمش، نوع گاز مجهول را با دقت بسیار بالایی تشخیص داد. این روش دارای کاربردهای گوناگونی از جمله تشخیص آلاینده‌های اتمفسری و پزشکی است. گازهای مورد آزمایش در این پژوهش SO₂ و SF₆ هستند. گاز SO₂ از آلاینده‌های اصلی در محیط است که استنشاق آن باعث آسیب به دستگاه تنفسی می‌شود. تشکیل باران‌های اسیدی هم ناشی از وجود این گاز در اتمسفر است. پس باید تا حد امکان از ورود این گاز به محیط جلوگیری شود. گاز SF₆ نیز در پست‌های برق فشار قوی نشت می‌کند. از این رو آشکارسازی این دو گاز اهمیت فراوانی دارد. همانطور که ذکر شد در طیف‌نگاری فوتوآکوستیک لیزری طول موج لیزر دمش باید در ناحیه جذب گاز مورد آزمایش باشد. طیف‌های جذبی گازهای SO₂ و SF₆ که در شکل ۱ ارائه شده‌اند، که در آن‌ها تطابق قابل قبولی با طیف گسیل لیزر CO₂ (9-11 mμ) مشاهده می‌شود.

در این پژوهش زمان واهلش برخوردی (طول عمر تراز برانگیخته) گاز SF₆ در ترکیب‌های گازی He+SF₆، Ar+SF₆ و N₂+SF₆ و همچنین گاز SO₂ در ترکیب‌های گازی He+SO₂، Ar+SO₂ و N₂+SO₂ به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. وابستگی سیگنال فوتوآکوستیک و زمان واهلش برخوردی، به فشار گازهای بافر مذکور نیز بررسی گردید.

¹ Bell

² Chopper

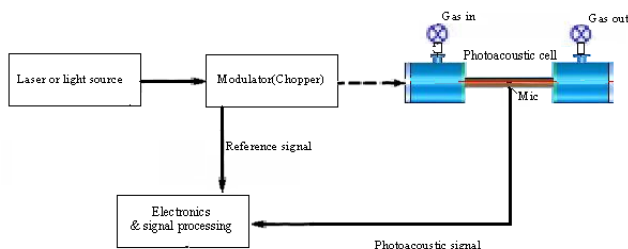
³ Viengerov



شکل ۱. طیف جذب (الف) گاز SO₂ (ب) گاز SF₆ در ناحیه گسیل لیزر CO₂

۲. چیدمان آزمایشگاهی

اثر فوتوآکوستیک حاصل بر همکنش یک نمونه گاز با تابش نور مدوله شده است. طرحواره‌ای از سامانه طیف نگار فوتوآکوستیک لیزری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. طرحواره‌ای از طیف نگار فوتوآکوستیک لیزری [۱]

جذب لیزر توسط گاز و فروافت بر خوردی آن، انرژی گرمایی با نرخ H تولید می کند که از رابطه ۱ بدست می آید [۲،۳].

$$H = \frac{\alpha I_0 e^{i\omega t}}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1)$$

در آن I_0 شدت نور فرودی، α ضریب جذب گاز، و ω نرخ تکرار تپ لیزری است. τ زمان واهلش به حالت پایه است که در واقع مجموع واهلش تابشی τ_r و غیر تابشی یا بر خوردی τ_n به صورت رابطه ۲ بیان می شود.

$$\tau^{-1} = \tau_n^{-1} + \tau_r^{-1} \quad (2)$$

در شرایط اتمسفری و در ناحیه طیفی معادل برانگیختگی ترازهای ارتعاشی مولکول‌ها، واهلش بر خوردی بر واهلش تابشی غلبه دارد. بنابراین τ بیان کننده τ_n خواهد بود. در این صورت کل انرژی جذب شده تبدیل به گرما می شود. در اثر برخورد های مولکولی، دمای گاز بالا رفته و امواج فشاری یا

صوتی تولید می‌کند [۴،۵]. در واقع منشاء پدیده فوتو آکوستیک برخورد مولکولی و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی است. از بین سایر واهلش‌ها، واهلشی که سهم بیشتری در افزایش انرژی جنبشی دارد واهلش V-T است که ناشی از برخورد مستقیم با مولکول‌های مجاور و فروافت به حالت پایه است. برای یک تشدیدگر استوانه‌ای که از دو طرف باز است با اعمال شرایط مرزی فشار در نقاط انتهایی، بسامدهای تشدید به صورت رابطه ۳ است [۳،۲،۱].

$$\omega_j = 2\pi f_j = \pi c_s \sqrt{\left(\frac{k}{L}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{mn}}{R_c}\right)^2} \quad (3)$$

در این رابطه L طول تشدیدگر، R_c شعاع تشدیدگر و α_{mn} ریشه m تابع بسل مرتبه m است که n, m, k نیز به ترتیب نشانگر مدهای طولی، سمتی و شعاعی هستند. c_s نیز سرعت صوت است که از رابطه ۴ به دست می‌آید [۶].

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (4)$$

در رابطه ۴، $\gamma = C_p/C_v$ نسبت گرماهای ویژه، M جرم مولی گاز، R ثابت گازها، T دما بر حسب مقیاس کلونین می‌باشد. در سامانه طیف‌نگاری تشدید، لیزر توسط برشگر در بسامد تشدید صوتی تشدیدگر مدوله می‌شود و یک تقویت‌کننده حساس به فاز (lock-in-amp) در بسامد برشگر قفل شده و تغییر فشار اندازه‌گیری شده توسط یک میکروفرن را ثبت می‌کند که مقدار آن در بسامد تشدید $\omega = \omega_j$ از رابطه ۵ بدست می‌آید.

$$S = \frac{\alpha C_j(\omega_j) P_0 F e^{i\omega t}}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (5)$$

در این رابطه F پاسخ‌دهی میکروفرن بر حسب mV/Pa و C_j ثابت سلول بر حسب $Pa.cm/W$ در بسامد تشدید سلول است. از رابطه ۵ می‌توان زمان واهلش برخوردی را به صورت تجربی بدست آورد. ثابت سلول به مشخصات سلول از قبیل ابعاد، بسامد تشدید و ضریب کیفیت بستگی دارد و از رابطه ۶ به دست می‌آید [۶].

$$C_{100} = -(\gamma - 1) Q_{100} \frac{4L_{eff}^2}{V_c c_s \Pi^2} \quad (6)$$

ضریب کیفیت Q در این رابطه معیاری از پهن شدگی بسامد تشدید است که به تلفات تشدیدگر از قبیل اتلاف ویسکوزیته و گرمایی بستگی دارد. شعاع تشدیدگر سلول فوتو آکوستیک طراحی شده 3 mm و طول آن 160 mm در نظر گرفته شد. ابعاد محفظه بافر جهت کاهش نوفه‌های صوتی 80 mm و شعاع بافر 25 mm پیش‌بینی شده بود که برای 1000 mbar گاز بافر نیتروژن، بسامد تشدید 1057 Hz ، ضریب کیفیت ۳۱، ثابت سلول 8655 Pa.cm/W به دست آمد. در این کار میکروفرن مدل EK3024 ساخت شرکت Knowles استفاده شد.

چیدمان آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ (با سلول فوتو آکوستیک طراحی شده)، آماده گردید که میکروفن در وسط و ماس بر سطح داخلی تشدیدگر، محل بیشترین دامنه سیگنال، قرار گرفته است. جنس سلول از استیل و پنجره‌های ZnSe در انتهای دو حجم بافر تعبیه شده‌اند. برای تقویت سیگنال میکروفون، تقویت کننده‌ای با بهره متغیر به کار گرفته شده و سیگنال توسط نوسان‌نمای 300 MHz مدل TDS3034B شرکت Tektronix با قابلیت اندازه‌گیری در حوزه زمانی و بسامدی ثبت می‌گردید. لیزر CO₂ پیوسته با برشگر مدل SR540 شرکت Stanford مدوله شده و توان آن در محل خروج باریکه از سلول توسط توان سنسج مدل EPM300 شرکت Coherent اندازه‌گیری می‌شد. سلول توسط پمپ روتاری دارای سرعت تخلیه 4 m³/h شرکت AEG تا فشار 2×10⁻² mbar تخلیه شد. آزمایش نشان می‌داد که نوفه‌های محیطی و پنجره‌ها به خوبی تضعیف می‌شوند.

۳. نتایج و بحث

تغییرات سیگنال و فرکانس تشدید با افزایش فشار گاز بافر بررسی گردید. برای این منظور ابتدا سلول فوتو آکوستیک تخلیه، سپس گاز SF₆ تزریق شده و به تدریج گازهای بافر آرگون، نیتروژن و هلیوم در سه آزمایش جداگانه در فشارهای مختلف به سلول اضافه می‌گردید. در آزمایشی دیگر نیز همین کار برای گاز SO₂ انجام شد. در فشارهای مختلف تغییرات بسامد تشدید و سیگنال فوتو آکوستیک به طور همزمان توسط نوسان‌نما در حوزه زمانی و بسامدی و توسط تقویت کننده حساس به فاز ثبت می‌شد [۹]. مشاهده شد که با افزایش فشار در بازه 350 mbar تا 1000 mbar، بسامد تشدید برای گازهای نیتروژن و آرگون ثابت می‌ماند، در حالی که برای گاز بافر هلیوم رشد بیشتری می‌یابد. این نتیجه به دست آمده در مورد گاز بافر هلیوم، مستقل از نمونه مورد آزمایش (SF₆ یا SO₂) بود. طبق رابطه ۳ بسامد تشدید سلول فوتو آکوستیک به طور مستقیم وابسته به سرعت صوت است. از سوی دیگر طبق رابطه ۴ سرعت صوت با نسبت گرماهای ویژه رابطه مستقیم، و با جرم مولی گاز رابطه عکس دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فرکانس تشدید با افزایش فشار برای گازهای با مولکول سبک، بیشتر از مولکول‌های سنگین است. با محاسبه سرعت صوت برای گازهای بافر مذکور، نتایج محاسبات عبارت است از:

$$c_s(\text{Ar}) = 319.061 \text{ m/s}, c_s(\text{He}) = 993.612 \text{ m/s}, c_s(\text{N}_2) = 348.986 \text{ m/s}$$

$$c_s(\text{He}) > c_s(\text{N}_2) > c_s(\text{Ar})$$

یعنی سرعت در هلیوم خیلی بیشتر از دو گاز دیگر است. همان‌طور که گفته شد، طبق رابطه ۳ بسامد تشدید به طور مستقیم وابسته به سرعت صوت بوده و بسامد تشدید برای هلیوم از دیگر گازها بیشتر است.

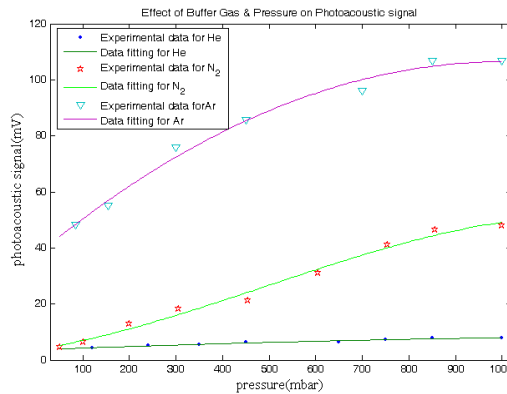
$$f(\text{He}) > f(\text{N}_2) > f(\text{Ar})$$

این نتیجه با کمیت‌های جدول ۱ که بیانگر بسامد تشدید گازهای بافر مختلف در این آزمایش است، تطابق دارد.

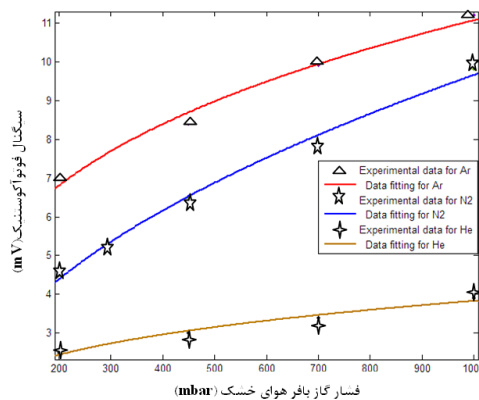
جدول ۱. نويز زمينه و بسامد تشديد گازهای بافر

گاز بافر	بسامد تشديد (Hz)	نويز زمينه (μV)
Ar	۹۶۰	۲۲/۱
He	۲۰۱۰	۲۷
N ₂	۱۰۴۵	۲۶

تغييرات سيگنال فوتوآکوستيك گازهای SO₂ و SF₆ با افزايش فشار گازهای بافر آرگون، نيترژن و هليوم مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۳ رشد سيگنال فوتوآکوستيك گاز SF₆ با افزايش فشار برای گاز بافر آرگون بيشتري بوده و در گاز نيترژن کمتر از آرگون مشاهده شد در حالی که رشد سيگنال برای هليوم قابل توجه نيست. همين نتيجه در مورد رشد سيگنال فوتوآکوستيك طبق شکل ۴ برای گاز SO₂ به دست آمد.

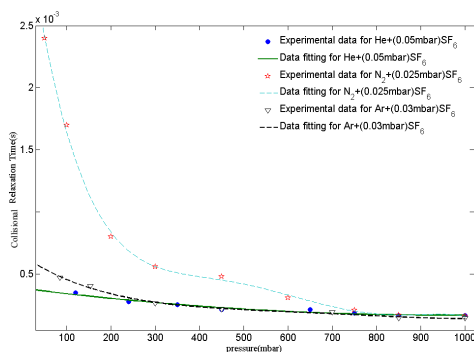


شکل ۳. وابستگي سيگنال فوتوآکوستيك به فشار برای گاز 0/03 mbar SF₆ در حضور بافرهای مختلف



شکل ۴. وابستگي سيگنال فوتوآکوستيك به فشار برای گاز 0/92 mbar SO₂ در حضور بافرهای مختلف

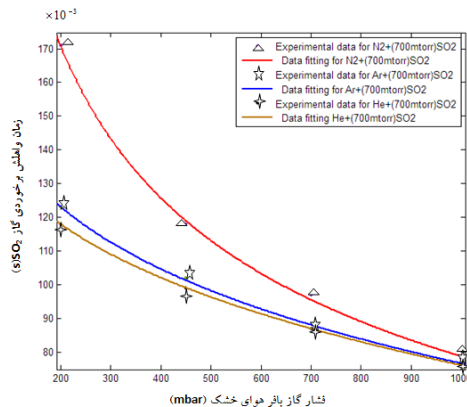
نتایج به دست آمده در این پژوهش در خصوص اثر فشار گاز بافر روی آشکارسازی گازهای SO_2 و SF_6 مشابه با نتایج گاز O_3 است [۷،۸]. سازوکار تولید سیگنال فوتو آکوستیک کاملاً وابسته به نوع گاز بافر و همچنین فشار آن است. علت این تغییرات را بایستی در ماهیت این گازها جستجو نمود. دلیل اصلی افزایش سیگنال با افزایش فشار بافر مربوط به نوع سازوکار فروافت به حالت پایه است و با افزایش فشار فرایندهای برخوردی بهبود می یابد. کم بودن رشد سیگنال فوتو آکوستیک و همچنین بالا بودن نویز زمینه (طبق جدول ۱) در هلیوم به این دلیل است که فرایندهای پخش گرمایی در هلیوم سریع تر اتفاق می افتد که این به دلیل بالاتر بودن سرعت صوت در هلیوم است. در ضمن انتقال گرمای تولید شده توسط جذب لیزر به دیواره ها، سریعتر از تبدیل آن به موج صوتی صورت می گیرد. از طرف دیگر طول پخش گرمایی و ویسکوزیته که موارد اصلی تلفات در تشدیدگر هستند، برای گاز بافر هلیوم بیشتر است. بعضی ثابت های فیزیکی برای گازهای بافر به شدت متفاوت هستند. این ثابت ها در پارامترهایی از قبیل ضریب کیفیت و رابطه ثابت سلول ظاهر می شوند که مقادیر متفاوت آنها برای گازهای مختلف باعث تغییر سیگنال فوتو آکوستیک خواهد شد. با استفاده از رابطه ۵ زمان واهلش به حالت پایه اندازه گیری شد [۱۰]. همان طور که اشاره شد، در فشارهای بالا و در محدوده ترازهای ارتعاشی مولکول ها، در محاسبات می توان از واهلش تابشی چشم پوشی کرد. وابستگی زمان واهلش برخوردی SF_6 گاز 0/03 mbar در حضور بافرهای هلیوم، نیتروژن و آرگون در شکل ۵ نشان داده شده است. توان لیزر دمش در این آزمایشات در حدود 0/2 W بود.



شکل ۵. وابستگی زمان واهلش برخوردی گاز SF_6 به فشار در حضور بافرهای مختلف

مشابه همین آزمایش نیز برای گاز SO_2 انجام شد که در آن گاز 0/92 mbar SO_2 وارد سلول شده و به تدریج گازهای بافر آرگون، نیتروژن و هلیوم در سه آزمایش جداگانه در فشارهای مختلف به سلول اضافه می گردید. توان لیزر دمش تقریباً ثابت و برابر 0/4 W بود. وابستگی زمان واهلش برخوردی گاز SO_2 به فشار گازهای بافر مذکور شکل ۶ ارائه شده است.

مشخص است که با افزایش فشار گاز بافر فرایندهای برخوردی بهبود می یابند. با افزایش فشار چگالی مولکول های موجود در سلول فوتو آکوستیک بالا رفته و در نتیجه احتمال برخورد مولکولی افزایش



شکل ۶. وابستگی زمان واهلش برخوردی گاز SO_2 به فشار در حضور بافرهای مختلف

می‌یابد. با تحریک گازهای مذکور واهلش آن‌ها به حالت پایه به دو صورت واهلش تابشی و واهلش برخوردی میسر است. در فشارهای پایین واهلش برخوردی به دلیل چگالی کم گازهای موجود کم بوده و نتیجه آن کاهش سیگنال فوتو آکوستیک خواهد بود. از شکل‌های ۵ و ۶ به نظر می‌رسد که زمان واهلش برای گازهای SF_6 و SO_2 در حضور بافرهای ذکر شده به ترتیب از مرتبه ۱۰۰ میکروثانیه و یک میلی‌ثانیه است و فروافت برخوردی در فشارهای پایین گاز بافر هلیوم سریع‌تر روی می‌دهد. دلیل آن می‌تواند تحرک پذیری بالا و در نتیجه نرخ بالای برخورد باشد. بنابراین انتظار می‌رود که سیگنال فوتو آکوستیک برای هلیوم قوی باشد ولی تلفات در گاز هلیوم بالا است، فرکانس تشدید آن بالا بوده و سیگنال رابطه عکس با فرکانس تشدید دارد. همچنین زمان فروافت واهلش برخوردی ترکیب $\text{He}+\text{SF}_6$ از مرتبه دوره تناوب برشگر بوده و مولکول‌ها قبل از اینکه کاملاً به حالت پایه فروافت کنند دوباره تحت تابش لیزر قرار می‌گیرند. پس مولکول‌های کمتری برانگیخته می‌شوند و سیگنال نسبت به دو گاز بافر دیگر کمتر است. در حالی که موارد ذکر شده برای گازهای بافر نیتروژن و هلیوم مناسب‌تر هستند.

۴. نتیجه‌گیری

مشخص شد که دامنه سیگنال ثبت شده و زمان واهلش برخوردی وابسته به نوع و فشار گاز بافر می‌باشد. دامنه سیگنال ثبت شده برای هر دو گاز SF_6 و SO_2 در حضور گاز بافر آرگون بیشتر از سایر گازهای بافر تست شده بود. مشخص شد که با افزایش فشار گاز بافر، سازو کار فروافت برخوردی بهبود می‌یابد. زمان واهلش برای گازهای SF_6 و SO_2 در حضور بافرهای ذکر شده به ترتیب از مرتبه 10^{-3} و 10^{-4} ثانیه می‌باشد. با اینکه زمان فروافت برخوردی گازهای SF_6 و SO_2 در حضور بافر He سریع است، اما رشد سیگنال برای گاز بافر هلیوم در مقایسه با دو گاز بافر دیگر زیاد محسوس نیست که ناشی از بالا بودن تلفات گرمایی و ویسکوزیته در گاز بافر هلیوم است.

منابع (References)

- [۱] باقر دیبائی، طراحی و ساخت سیستم طیف‌نگاری فوتوآکوستیک جهت شناسایی گاز SF_6 ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد (به راهنمایی دکتر پرویز پروین و دکتر جواد خلیل‌زاده)، دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران ۱۳۸۷
- [2] P.L. Meyer , M. W.Sigrist, Rev. Sci. Instrum. Vol. 61, No. 7, 1990.
- [3] A. Miklos and P. Hess, Rev. Sci. Instrum. Vol. 72, No. 4, 2001.
- [4] Besson J.P., photoacoustic spectroscopy for multi-gas sensing using near infrared lasers PHD thesis, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2006.
- [۵] محمد رضا محبی فر، باقر دیبائی، جواد خلیل زاده، بررسی تجربی اثر فشار گاز بافر N_2 و توان لیزر دمش بر سیگنال فوتوآکوستیک گاز SO_2 ، هفدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، ماهان کرمان، بهمن ۱۳۸۹
- [۶] محمد رضا محبی فر، باقر دیبائی، جواد خلیل‌زاده، اثر افزایش دما بر مشخصه‌های آکوستیکی و ترمودینامیکی یک سلول فوتوآکوستیک، چهارمین همایش ملی فیزیک دانشگاه پیام نور، اصفهان، ۱۳۸۹
- [7] M.A. Gondal, Z.H. Yamani, Applied Optics, Vol. 46, No. 29, 2007.
- [8] M.A. Gondal, Applied Optics, Vol. 36, No. 15, 1997.
- [9] S. Pandhija, N.K. Rai, A.K. Singh, A.K. Rai, R. Gopal, Development of photoacoustic spectroscopic technique for the study of materials Laser and Spectroscopy Laboratory, Department of Physics, University of Allahabad, India, 2002.
- [10] S. Schilt, L. Thévenaz, M. Niklès, L. Emmenegger, C. Hüglin, Ammonia monitoring at trace level using photoacoustic spectroscopy in industrial and environmental applications, Laboratory of Nano photonics and Metrology (NAM), Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Switzerland, 2005.