

## بررسی تجربی اثر فشار گاز کمکی و جریان تخلیه الکتریکی بر توان خروجی و خطوط بینابی لیزر موجبر $CO_2$

سمیه مرتضوی، کاوه سیلاخوری، بتول سجاد، سعید جلوانی، هدیه پاکیان، محسن منتظرالقائم

**چکیده:** در این مقاله، وابستگی توان خروجی و بیناب گسیلی یک لیزر موجبر  $CO_2$  به آمیزه‌ی گازها، فشار کل و انرژی الکتریکی ورودی بررسی شده است. برای این منظور، یک لیزر موجبر  $CO_2$  دست‌ساز به قطر  $2\text{ mm}$  و طول تخلیه‌ی  $35\text{ cm}$  با تخلیه الکتریکی  $DC$  به کار گرفته شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، در خروجی لیزر تنها پایداری همیشگی خط  $10P(20)$  مشاهده شده است. با این وجود، زمان گذرای پس از تغییر در جریان تخلیه الکتریکی وجود دارد که در خروجی لیزر خطوط دیگری غیر از  $10P(20)$  مشاهده می‌شوند، که پس از این زمان کوتاه نیز دوباره خروجی لیزر بر روی این خط پایدار شده است.

**واژه‌های کلیدی:** لیزر موجبر  $CO_2$ ، خطوط فرکانسی، پهن شدگی فشاری.

### ۱- مقدمه

لیزر  $CO_2$  با گسیل در بازه‌ی  $9-11\ \mu\text{m}$ ، یکی از پرکاربردترین چشمه‌های لیزری است که به ویژه در پژوهش‌های بیناب‌نگاری با توان جداسازی بالا به کار گرفته شده است. در این میان، گونه‌ی موجبر این لیزرها، با توجه به برخورداری از گستردگی بسامدی، یکی از کارآمدترین آنها به شمار می‌آید. از آنجا که این لیزرها از توانایی کار در فشارهای بسیار بالاتری ( $Torr$  ۳۰۰-۵۰) در برابر دیگر لیزرهای پیوسته برخوردارند، پهنای بینابی بسیار بزرگتری دارند، که ریشه در پهن‌شدگی فشاری گذارهای لیزری آنها دارد. از سوی دیگر طول کوتاه این لیزرها آنها را برای گسیل تک مد توانا می‌سازد. بنابراین با بهره‌گیری از چنین لیزرهایی می‌توان مدهای طولی گسیلی گوناگونی را در یک بازه‌ی بسامدی گسترده و با دقت بالا، به دست آورد. در

این زمینه نیز گزارش‌هایی به منظور بررسی توانایی کوک و تفکیک خروجی لیزر با استفاده از بیناب‌سنجی اشباع تفکیک بالای مولکول‌هایی مثل  $SF_6$  و  $OsO_4$  نیز ارائه شده است [۱-۵]. در این مقاله یک لیزر موجبر دست‌ساز گازکربنیک با قطر  $2\text{ mm}$  و طول تخلیه  $35\text{ cm}$  با تخلیه  $DC$  به کار گرفته شده تا بستگی‌های توان خروجی و بیناب گسیلی آن به انرژی الکتریکی، آمیزه گازها و فشار کل مورد مطالعه قرار گیرد.

### ۲- پهنای فشاری خط

اندازه پهن‌شدگی برخوردی در لیزرهای گازی برابر است با  $\Delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau}$  که در آن،  $\tau$  زمان پویای آزاد میانگین برخوردی است. از سوی دیگر، آهنگ برخورد مولکول‌های گونه‌ی  $X$  با مولکول‌های گونه‌ی  $Y$  را می‌توان بدین‌گونه نوشت:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_Y N(Y)\sigma(X,Y)\bar{v}_{rel}(X,Y) \quad (1)$$

در آن،  $\sigma$  سطح مقطع برخورد بین گونه‌هاست و در ساده‌ترین تقریب، "کره سخت"، به شکل زیر نوشته می‌شود:

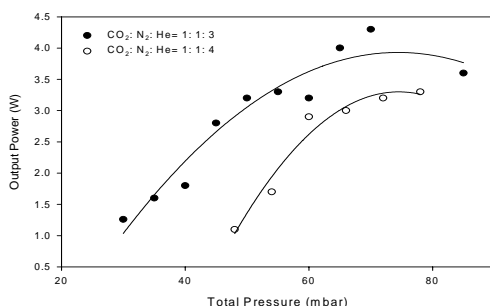
سمیه مرتضوی، بتول سجاد (استادیار)، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه الزهراء<sup>(س)</sup>

کاوه سیلاخوری، سعید جلوانی، هدیه پاکیان، محسن منتظرالقائم، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک

تخت  $ZnSe$  با بازتابندگی  $60\%$  است، که  $43\text{ cm}$  از هم فاصله دارند. برای بررسی و شناسایی خط‌های گسیلی لیزر، یک تیغه‌ی  $ZnSe$  به عنوان باریکه‌شکن به کار برده شده که پرتو لیزر را به دو باریکه جداگانه می‌شکافتد که یکی در بیناب‌سنج لیزری ( $Opt\ A-16$ )  $Eng. Inc.$  و دیگری برای اندازه‌گیری توان به کمک توان‌سنج به کار گرفته می‌شود. در دهانه بیناب‌سنج نیز یک عدسی دست‌ساز  $NaCl$  با فاصله کانونی  $25\text{ cm}$  برای کانونی‌سازی باریکه به کار گرفته شده است.

#### ۴- یافته‌ها

در مرحله نخستین آزمایش‌ها، ابتدا اثر گاز کمی هلیوم بر توان خروجی و فشار کار بهینه‌ی لیزر مطالعه شده است. برای این منظور تغییرات توان خروجی لیزر بر حسب فشار کل آمیزه‌ی گازها در دو نسبت  $4:1:1$  و  $3:1:1$   $CO_2:N_2:He$  در جریان ثابت  $12\text{ mA}$  بررسی شده است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که نمودارها نشان می‌دهند در آمیزه گازی با مقدار هلیوم کمتر، توان بالاتری در مقایسه با آمیزه گازی با میزان هلیوم بیشتر، در فشارهای بهینه تقریباً برابر به دست آمده است، که دلیل این امر خنک‌کنندگی موثر آمیزه گازهای لیزر به خاطر قطر کوچک لوله‌ی لیزر می‌باشد. گفتنی است مقدار فشار بهینه برای هر دو نسبت حدود  $75\text{ mbar}$  برآورد شده که در آنها بیشینه‌ی توان خروجی به ترتیب برابر با  $3/3\text{ W}$  و  $3/9\text{ W}$  اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲- تغییرات توان خروجی بر حسب فشار کل در دو نسبت گازی مختلف در جریان ثابت  $12\text{ mA}$ .

$$\sigma(X, Y) = \frac{\pi}{4} (d_x + d_y)^2 \quad (2)$$

و  $\bar{v}_{rel}$  سرعت نسبی مولکول‌ها یا اتم‌های برخوردکننده:

$$\bar{v}_{rel} = \left( \frac{8KT}{\pi} \left( \frac{1}{M_x} + \frac{1}{M_y} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

و  $d_i$  قطر و  $M_i$  جرم مولکولی یا اتمی هستند.  $N(Y)$  تعداد بر سانتی‌متر مکعب گاز ایده‌ال از رابطه زیر به دست می‌آید [۶].

$$N(Y) = 9.65 * 10^{18} * \frac{P(Y)}{T} \quad (4)$$

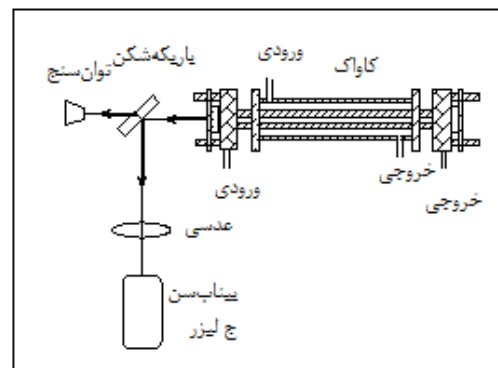
بدین‌سان، پهن‌شدگی برخوردی لیزرهای  $CO_2$  را می‌توان بدین‌گونه برآورد نمود:

$$\Delta \nu_c = 7.58 \left( \Psi_{CO_2} + 0.73 \Psi_{N_2} + 0.64 \Psi_{He} \right) P \left( \frac{300}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن،  $\Psi_i$  کسر نسبت گازها،  $P$  فشار کل بر حسب  $Torr$  و  $T$  دما بر حسب  $K$  است [۷].

#### ۳- چیدمان آزمایش

چیدمان برپا شده در این رشته آزمایش‌ها، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره‌ی از چیدمان آزمایشگاهی

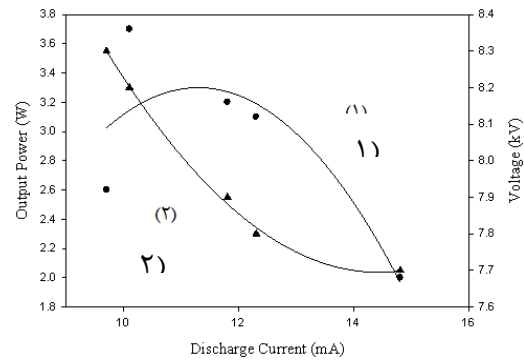
این آرایه دربرگیرنده‌ی یک لیزر موجبر  $CO_2$  با لوله‌ی پیرکس به قطر درونی  $2\text{ mm}$ ، طول تخلیه‌ی  $35\text{ cm}$  است. تخلیه الکتریکی  $DC$  طولی با استفاده از منبع تغذیه  $20\text{ kV}$  و از طریق الکترودهای استوانه‌ای برنجی به همراه یک مقاومت بالاست  $260\text{ k}\Omega$  انجام شده است. بازآواگر اپتیکی لیزر دربرگیرنده‌ی یک آینه‌ی طلا با بازتابندگی  $95\%$  و شعاع انحنای  $5\text{ m}$  و یک آینه‌ی

خط  $10P(20)$  ناشی از گذار از تراز چرخشی- ارتعاشی  $(j=19, v=1)$  به تراز چرخشی- ارتعاشی  $(j=20, v=0)$  است. غلبه این خط به عنوان خروجی این لیزر را می‌توان با موشکافی در سرشت فیزیکی و سازوکارهای کوانتومی گذارهای لیزری در مولکول  $CO_2$  بهتر دریافت. این رفتار، ریشه در پدیده‌های چندی دارد که از آن میان می‌توان کاراترین‌ها را برشمرد: (۱) در دمای پیرامون  $400\text{ K}$  گاز تخلیه، زیر تراز چرخشی  $j=19$  از انبوهی بیشینه در میان دیگر ترازهای چرخشی برخوردار است. (۲) انرژی تراز پایینی  $(0, 0)$  وابسته به نوار گسیلی  $\lambda=10/6\ \mu\text{m}$  اندکی بیشتر از تراز پایینی  $(0, 2)$  وابسته به نوار گسیلی  $\lambda=9/6\ \mu\text{m}$  است، و از همین رو، انبوهی آن کمتر و سرانجام وارونی انبوهی وابسته به آن نیز بیشتر است. (۳) سطح مقطع گسیل القایی با توان دوم طول موج متناسب است.

شکل (۴) نمودار توان وابسته به خط‌های گسیلی دیده شده‌ی لیزر را در فشارها و توان‌های مختلف ورودی نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، در فشار  $54\text{ mbar}$  (شکل ۴- الف) با اندک دست‌کاری در جریان تخلیه، در بیناب گسیلی لیزر خط  $10P(14)$  نیز آشکار شده است، بی آن که توان اندازه‌گیری شده چندان دگرگون شود. با این همه، با گذشت زمان و پایدار شدن شرایط کاری لیزر، خط گسیلی آن نیز بر روی  $10P(20)$  پایدار می‌گردد و دیگر از خط  $10P(14)$  نشانی دیده نمی‌شود.

همان‌گونه که در (شکل ۴- ب) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار گاز به  $72\text{ mbar}$ ، این ناپایداری‌ها در خط گسیلی لیزر یکسره از میان رفتند و گسیل لیزر به‌خوبی بر روی خط  $10P(20)$  پایدار شد، که در این حالت بیشینه توان گسیلی لیزر نیز اندازه‌گیری شده است.

همچنین نمونه‌ای از رفتار توان خروجی لیزر و ولتاژ بر حسب جریان تخلیه الکتریکی با آمیزه‌ی گازی به صورت  $CO_2: N_2: He = 1: 1: 4$  در فشار کل  $72\text{ mbar}$  در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- توان خروجی لیزر بر حسب جریان تخلیه الکتریکی (۱) و مشخصه ولتاژ بر حسب جریان (۲) در آمیزه گازی

$CO_2: N_2: He = 1: 1: 4$  در فشار کل  $72\text{ mbar}$ .

مقدار پهن شدگی فشاری این لیزر در نسبت آمیزه گازی  $CO_2: N_2: He = 1: 1: 4$  و فشار  $55\text{ torr} \sim 72\text{ mbar}$  از برابری (۵) حدود  $298\text{ MHz}$  به دست آمده است. همچنین لیزر برای طول کلی کاواک (فاصله جدایی بین آینه‌ها) برابر  $43\text{ cm}$  بر طبق رابطه  $c/2L = \Delta v$  بازه آزاد بینایی  $348\text{ MHz}$  را دارا می‌باشد، که با توجه به بزرگتر بودن این مقدار از مقدار پهن شدگی خطوط فرکانسی لیزر، گسیل لیزر به صورت تک مد طولی خواهد بود. سپس، رفتار توان گسیلی این لیزر برای خط‌های مختلف بر حسب جریان ورودی و فشار کل گاز در نسبت ثابت  $CO_2: N_2: He = 1: 1: 4$  بررسی شده است.

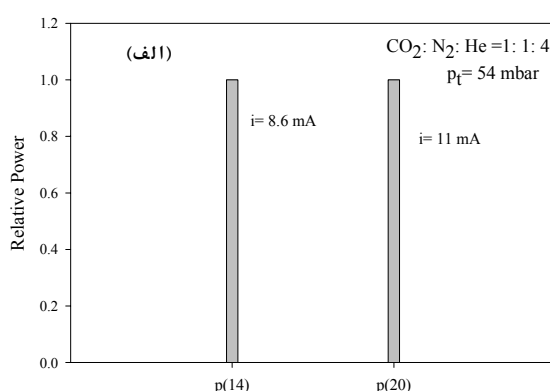
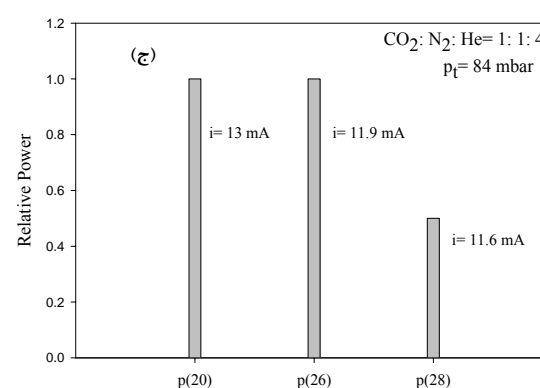
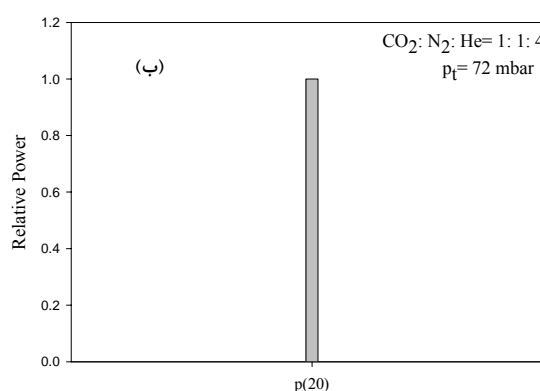
آزمایش‌ها، نشان می‌دهد که در شرایط کاری پایدار، در بیناب گسیلی لیزر همواره خط  $10P(20)$  با طول موجی برابر  $\lambda=10/6\ \mu\text{m}$  به عنوان خروجی غالب آشکارسازی می‌شود. اگر چه در بازه‌های زمانی کوتاه پس از دست‌کاری شرایط کاری لیزر مانند فشار یا جریان تخلیه، گه گاه برخی دیگر از خط‌های بینایی به‌گونه‌ای گذرا و ناپایدار پدیدار می‌گردند.

کمتر شدن جریان تخلیه پرش‌های بینایی نیز بیشتر شده و به خط‌های با طول موج بلندتر گرایش می‌یابد.

برای بررسی چگونگی تاثیر تغییر نسبت گازها بر این رفتار، این آزمایش‌ها با آمیزه  $CO_2: N_2: He = 1: 1: 3$  تکرار شدند و دیده شد که گسیل در خط  $P(20)$  همچنان گسیل غالب است ولی پرش‌ها تنها در فشارهای پایین‌تری مانند  $35\text{ mbar}$  به خط‌های  $10P(14)$  و  $10R(26)$  روی می‌دهند و در فشارهای بالاتر خط گسیلی لیزر بر روی  $10P(20)$  پایدار می‌شود.

از آنجا که انبوهی ترازهای لیزری به دمای گاز وابسته هستند، تغییر در دمای گاز می‌تواند به جابه‌جایی شماره‌ی تراز چرخشی وابسته به انبوهی بیشینه از  $19j$  به  $z$ های دیگر بیانجامد که این خود تغییر خط گسیلی لیزر را بدنبال خواهد داشت [۸]. بر این پایه، تغییرات دیده شده در این رشته آزمایش‌ها نیز می‌تواند ریشه در جهش‌های ناگهانی دمای گاز تخلیه در پی تغییر جریان تخلیه داشته باشند. در این زمینه باید دانست که با کم و زیاد شدن جریان تخلیه، توان ریخته شده در گاز تغییرات تندی را پشت سر خواهد گذاشت که به انگیزه کندی فرآیند خنک‌سازی لوله تخلیه، با تغییرات ناگهانی دمای گاز دنبال خواهد شد. سپس رفته رفته گاز تخلیه با سامانه خنک‌کننده به ترازمندی می‌رسد و بار دیگر دمای آن به اندازه‌ی نخستین و یا بسیار نزدیک به آن باز خواهد گشت. بدین‌سان، چنین می‌توان گفت که با هر بار دست‌کاری جریان تخلیه و روی دادن جهش گرمایی وابسته به آن در گاز، خط‌های گسیلی دیگری که از تراز بالایی وابسته به آنها به‌گونه‌ای گذرا از انبوهی بیشتری نسبت به  $19j$  برخوردار شده‌اند آغاز به نوسان می‌نمایند و به‌دنبال آن، با کاهش دوباره دمای گاز در روند خنک‌سازی، این شرایط گذرا کنار رفته و گسیل لیزری بار دیگر بر روی خط  $10P(20)$  پایدار می‌گردد.

طول موج‌های مربوط به خط‌های مشاهده شده نیز در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۴- خط‌های گسیلی لیزر در فشارها و جریان‌های تخلیه گوناگون در فشارهای الف-  $54\text{ mbar}$ ، ب-  $72\text{ mbar}$  و ج-  $84\text{ mbar}$ .

سپس با افزایش بیشتر فشار به  $84\text{ mbar}$  (شکل ۴-ج)، بار دیگر با اندک دست‌کاری جریان تخلیه، خط  $10P(26)$  با توانی برابر با توان خط  $10P(20)$ ، و همچنین خط  $10P(28)$  همراه با افت نیمی از توان گسیلی مشاهده شده است. روی هم رفته، با هر چه

همانند جریان تخلیه بیشتر تنها با گسیل بر روی خط  $10P(20)$  همراه است. به علاوه در شرایط پایدار تخلیه الکتریکی در آمیزه‌ی گازی با مقدار کمتر گاز هلیوم توان خروجی بالاتری از لیزر نیز مشاهده شده است.

جدول ۱- طول موج خط‌های گسیلی لیزر در نوار

۱۰/۴ μm		
گذار	فرکانس (cm <sup>-1</sup> )	طول موج (μm)
۱۰P(۱۴)	۹۴۹/۴۳	۱۰/۵۳۲۶
۱۰P(۲۰)	۹۴۴/۱۸	۱۰/۵۹۱۲
۱۰P(۲۶)	۹۳۸/۶۷	۱۰/۶۵۳۴
۱۰P(۲۸)	۹۳۶/۷۸	۱۰/۶۷۴۸
۱۰R(۲۶)	۹۷۹/۶۷	۱۰/۳۰۷۵

### مراجع

- [1] Lieto A. D., Minguzzi P. and Tonelli M., "A CO<sub>2</sub> waveguide laser for saturation optoacoustic spectroscopy", *J. Phys. E: Sci. Instrum*, Vol.14, 1981.
- [2] Kunikane T., et.al, "A simple technique for obtaining a stable frequency sweep in a waveguide CO<sub>2</sub> laser", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.23, No.5, 1984, pp.600-605.
- [3] Abrams R.L., "Gigahertz tunable waveguide CO<sub>2</sub> laser", *Applied Physics Letters*, Vol. 25, No. 5, 1974.
- [4] Schafer G., Hofmann H., and wolf-d. Petersen, "Tunable CO<sub>2</sub> waveguide laser with high transverse mode and line discrimination", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.QE-18, No. 1, 1982. Bazarov E.N., et.al., "Spectroscopy of OsO<sub>4</sub> and SF<sub>6</sub> molecules by a tunable high pressure CO<sub>2</sub> waveguide Laser", *Sov. J. Quantum Electron*, Vol. 9, 1979, pp.345.
- [5] Milonni P. W. and Eberly J. H., "lasers", 1988.
- [6] Lerberghe A V., et.al, "High stability cw waveguide CO<sub>2</sub> laser for high resolution saturation spectroscopy", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-14, No.7, 1978.
- [7] Biswas D. J. et. al., "Multiline CO<sub>2</sub> Lasers and Their Uses", *Prog. Quant. Elect*, Vol.14, 1990, pp.1-61.

### ۵- نتیجه‌گیری

یک بررسی فراگیر بر روی چگونگی وابستگی توان خروجی و خط‌های بینایی لیزر موجبر CO<sub>2</sub> به فشار، نسبت گازها و جریان تخلیه به‌انجام رسیده است. برپایه این یافته‌ها، دست‌کاری جریان تخلیه پرش‌های گذرای از خط  $10P(20)$  به دیگر خط‌ها را به‌دنبال داد. این پرش‌ها در پی تغییرات گذرای که در انبوهی ترازهای چرخشی بالایی لیزر نسبت به تراز  $j=19$  وابسته به خط  $10P(20)$  و به دلیل تغییر در دمای گاز به وجود می‌آید، مشاهده شده‌اند، که با افزایش فشار کل به خط‌های با طول موج بلندتر گرایش می‌یابد. همچنین، کاهش گاز He در فشارهای پایین پرش‌هایی به شاخه‌ی  $10R$  را به همراه دارد و در فشارهای کل بالاتر،