Archive of SID

J. of Nuclear Sci. and Tech
No. 32, pp. 9-14, 2005

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۳۲، صفحات ۱۴-۹، ۱۳۸۳

تک مُدسازی لیزر تپی CO_2 به روش تزریق پرتو حاصل از یک لیزر CO_2 پیوسته

کاوه سیلاخوری*[1]، فریدون سلطانمرادی[1]، عباس بهجت[2]، محسن منتظرالقائم[1]، سیدمحمدرضا صدرقائنی[1]
۱- مرکز تحقیقات و کاربرد لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲- دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۷۸، یزد - ایران

چکیده: در این کار پژوهشی، تک‌مُدسازی طولی لیزر تپی CO_2، که از کاربردهای گسترده و بنیادی در پژوهشهای بیناب نمایی لیزری و فرایندهای دمش نوری برخوردار است، نخستین بار در کشور به انجام رسیده است. برای این کار، پرتو یک لیزر CO_2 پیوسته، در راستای محور اپتیکی یک لیزر تپی CO_2 به درون کاواک بازآواگر (تشدیدگر) آن فرستاده شد. بدین سان، با از میان رفتن پدیدهٔ زنش مُدی در تپهای آشکار شده و یکنواخت شدن آنها، فرایند تک‌مُد شدن تپها به روشنی پدیدار گردید. این کار بدون بهره‌گیری از مبدّل‌های PZT و یا کوششهای دیگر برای پایدارسازی مکانیکی کاواکهای بازآواگر به انجام رسید. علاوه بر آن، انرژی تپهای تک مُد شده در برابر تپهای چند مُد نیز، هیچ افتی پیدا نکرده است.

واژه‌های کلیدی: *تک‌مُد طولی، لیزر گاز کربنیک SLM روش قفل تزریقی، قفل مُدی، لیزر گاز کربنیک تپی*

Single Mode Operation of a TEA CO_2 Laser by a CW CO_2 Laser Radiation Injection

K. Silakhori*[1], F. Soltanmoradi[1], A. Behjat[2], M. Montazerghaem[1], R. Sadr[1]
1- Laser Research Center, AEOI, P.O. Box: 11365-8486, Tehran-Iran
2- Faculty of Physics, Yazd University, P.O. Box: 89178 -741, Yazd - Iran

Abstract: In this research work, single mode operation based on injection of a CW laser beam into a TEA CO_2 laser cavity has been demonstrated. The technique has vast applications in research programs for laser spectroscopy and optical pumping. The observed smooth pulse shapes indicated that the system is operating in a single mode of operation, where no additional PZT mounted elements or other cavity stabilizing devices have been used. In addition, it has been observed that the output energy has not been reduced when the laser was operating in a single mode of operation, compared with the case when the laser is operating in the multi-mode regime.

Keywords: ***single longitudinal mode, SLM CO_2 laser, Injection-Locking method, mode-locking, TEA CO_2 laser***

*email: ksilakhori@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۳/۱/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۳/۶/۲۲

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

پس از ساخت نخستین لیزر CO_2 پیوسته، بزودی روشن شد که این‌گونه لیزرها دارای مرز توان گسیلی حدود ۶۰ W/m – ۵۰ یا ۸۵ W/l – ۷۰ هستند. یکی از راهکارهای گوناگونی که برای افزایش توان این لیزرها پیگیری شده به ساخت لیزرهای CO_2 تپی انجامیده است، که از ویژگیهای چشمگیری همچون انرژی گسیلی حدود ۱۵ J/l – ۱۰ و گسیل تپی با FWHM[1] از یک تا چند صد نانوثانیه برخوردارند [۱]. عیب بزرگ ناخواستهٔ این لیزرها پهنای بسامدی نمودار بهره و در نتیجه، پهن‌شدگی خطهای گسیلی آنهاست که ریشه در پهنای مربوط به فشار گذارهای کوانتومی مولکولهای CO_2 در فشارهای نزدیک به اتمسفر دارد. این پهنا، که چند ده برابر پهنای خط‌های گسیلی لیزرهای CO_2 پیوسته است [۲]، پدیدهٔ زنش مدی[2] در تپهای گسیلی را به دنبال دارد [۳]. این پدیده، پیامدهای ناخواستهٔ زیانباری را در بسیاری از کاربردهای لیزر CO_2 تپی در زمینهٔ برهمکنش پرتو لیزر با مادّه، بویژه در بیناب نمایی لیزری به همراه دارد؛ از همین روی، تلاشهای بسیاری برای از بین بردن آنها انجام گرفته است. شالوده تمام این روشها، باریکتر کردن پهنای بسامدی بازهٔ نوسان کاواک لیزر است که به دنبال آن، مُدهای طولی کاواک بازآواگر[3] لیزر کنار زده می‌شوند و سرانجام پدیدهٔ زنش مُدی در تپها ناپدید می‌گردد [٤].

۲- پایه‌های فیزیکی

می‌دانیم که در یک بازآواگر تخت-موازی به درازای L، تنها موج های ایستاده‌ای ایجاد می‌شوند که طول موج و بسامد آنها از رابطه‌های زیر بدست می‌آیند [۵]:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \quad \text{یا:} \quad \nu = \frac{nc}{2L} \quad , \quad n=1، ۲، ۳، .... \quad (۱)$$

بر این اساس، برای nهای پی در پی شمار بسیاری از بسامدهای ν_n را، به نام مُد طولی، می‌توان یافت که در این کاواک موج ایستاده ایجاد می‌کنند. فاصلهٔ بسامدی میان دو مُد طولی پی‌درپی، یا بازهٔ آزاد بینابی (FSR)[4] کاواک، برابر است با:

$$\Delta\nu = \nu_n - \nu_{n-1} = \frac{c}{2L} \quad (۲)$$

که در آن c سرعت نور، حدود ۳×۱۰^۸ متر بر ثانیه، است. شکل ۱، نمودار بهرهٔ یک لیزر را نشان می‌دهد که در آن، اندازهٔ اتلاف برای همهٔ بسامدها یکسان انگاشته شده است [٦].

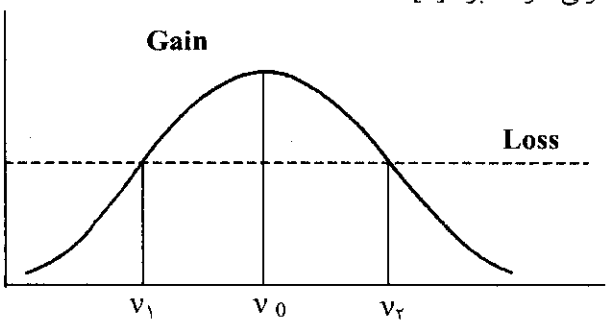
چنانچه بازهٔ بسامدی $\delta\nu=\nu_۲-\nu_۱$، که بازهٔ نوسان نامیده می‌شود و در آن بهره بیشتر از اتلاف است، بزرگتر از $\Delta\nu$ باشد، مُدهای دیگری هم بجز مُد با بسامد مرکزی ν_0 ممکن است در آن به نوسان درآیند. نوسان چند مُدی لیزرهای CO_2 تپی، که دارای پهنای بهرهٔ بسیار بالایی (حدود GHz ٤ـ۳) هستند [۲]، نیز ریشه در همین پدیده دارد. شمار بسامدهایی که از توان چنین نوسانهایی برخوردارند، از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$N=\frac{\delta\nu}{\Delta\nu}=\frac{2L}{c}\delta\nu \quad (۳)$$

چون هر یک از این بسامدها دارای انرژی و فاز کم و بیش جداگانه‌ای است، برونداد چنین لیزری برآیند یک تپ پُرتوان در بسامد مرکزی ν_0 به همراه تعداد زیادی از تپهای کوچکتر با فازهای زمانی کاتوره‌ای است. برهم‌نهی همهٔ این تپهای کوچک و بزرگ با تپ مرکزی، به صورت یک تپ دندانه‌ای به نام زنش مُدی پدیدار می‌شود. برای نمونه، ابتدا بازهٔ آزاد بینابی یک کاواک به درازای L=۱ m را به دست می‌آوریم:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} = ۱/۵\times۱۰^۸ \quad \text{Hz}$$

چنانچه بازهٔ نوسان یک لیزر تپی CO_2 را برابر $\delta\nu$=۳ GHz بگیریم، خواهیم داشت: N=۲۰. از سوی دیگر، پهنای خط یک لیزر CO_2 پیوسته، حدود $\delta\nu$=٦٦ MHz است، بنابراین، مشاهده می‌شود که برای آن N<۱ خواهد بود و بر این پایه، تنها یک مُد طولی را می‌توان در کاواک چنین لیزری به نوسان درآورد. در نتیجه، یک لیزر CO_2 پیوسته به طول یک متر، خودبخود تک مُد طولی خواهد بود [۵].



شکل ۱- نمودار بهره و اتلاف در یک لیزر

www.SID.ir

Archive of SID

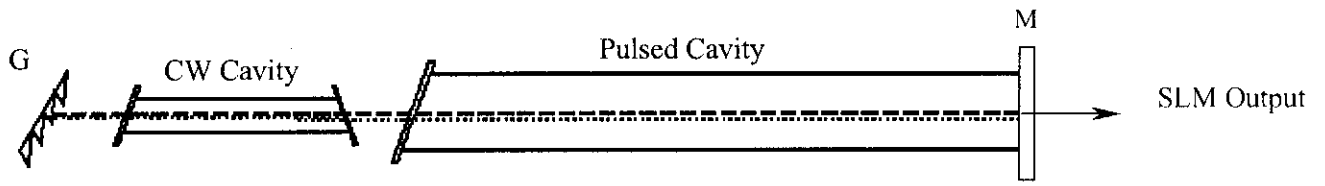
هرچند روشهای گوناگونی برای تک مُدسازی این لیزرها، که هریک سرشت فیزیکی جداگانه‌ای دارند، در دست است امّا، ناهمسانی بیان شده در چگونگی مدهای طولی کاواک بازآواگر لیزرهای CO_2 تپی و پیوسته، انگیزه و پایهٔ بیشترین تلاشهای انجام یافته برای تک‌مُدسازی لیزرهای CO_2 تپی بوده است. می‌دانیم که با برپا ساختن یک تابش زمینه‌ای آغازگر در کاواک بازآواگر یک لیزر، به پهنای دلخواه و با بسامد مرکزی در بازهٔ نوسان کاواک، می‌توان پایه‌ای برای آغاز فرایند گسیل القایی در آن بنا نهاد، بگونه‌ای که نوسان لیزری پیامد آن به درستی بر روی همان بسامد مرکزی و پهنای بسامدی انجام گیرد. چنانچه شدّت تابش زمینه بیشتر از شدّت گسیل خودبخودی مولکول‌های نوسانگر محیط فعّال باشد، این تابش که آغازگر تهی‌سازی زودرس و تندتر انرژی برانگیختگی در بسامد مرکزی خود و پهنای وابسته است، زمینه را برای نوسان بسامدهای کناری دشوار و گاه ناشدنی می سازد. بنابراین، چنانچه پهنای بسامدی پرتو آغازگر کمتر از بازهٔ آزاد بینابی کاواک بازآواگر باشد، می‌توان کاواک چند مُدی را بر روی تنها یک مُد به نوسان درآورد. در این صورت، پرتو یک لیزر CO_2 پیوسته از ویژگی خاصّی برای عرضهٔ چنین فرایندی در یک لیزر CO_2 تپی و تک‌مُد ساختن طولی آن برخوردار است. در واقع همین ویژگی را می‌توان شالودهٔ بیشتر روشها و راهکارهایی به شمار آورد که تاکنون برای تک‌مُدسازی طولی لیزرهای تپی CO_2 به کار گرفته شده اند.

آرایه‌های کاربردی تک‌مُدسازی لیزرهای تپی CO_2 بر اساس فرایند پیش گفته را، که بر پایهٔ تقویت گزینشی یک مُد طولی استوارند، می‌توان در دو دستهٔ: ترکیبی(Hybrid) و تزریقی (Injection) جای داد [۶]. الگوی ساده‌ای از یک آرایهٔ ترکیبی در شکل۲ نشان داده شده است [۷].

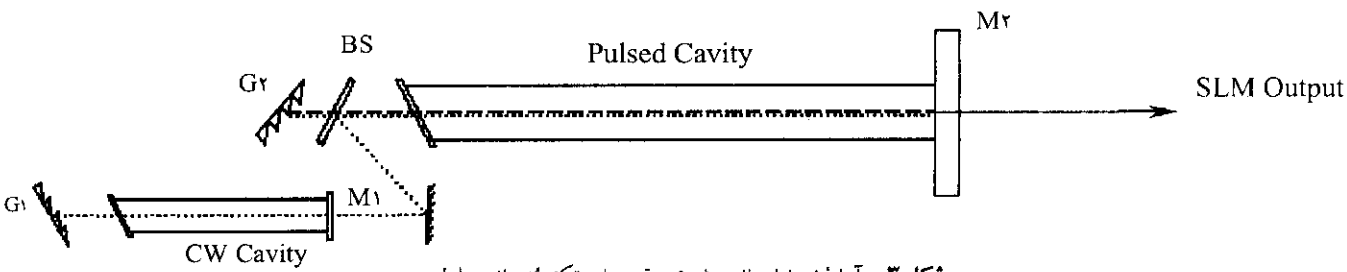
کاواک بازآواگر G-M شامل هر دو لیزر تپی و پیوسته است و پرتو لیزر پیوسته، با رفت و برگشت در میان کاواک لیزر تپی، محیط فعّال این لیزر را جاروب می‌کند. با آغاز فرایند دمش و گسیل خودبخود پیآمد آن در دو کاواک، پرتو زمینهٔ پیوسته همچون تابشی آغازگر، تپ حاصل از گسیل القایی را وادار به نوسان با بسامد خود می‌کند، بگونه ای که پهنای آنها با هم برابر باشند.

در آرایه‌های تزریقی، که نمای ساده‌ای از آنها در شکل ۳ نشان داده شده است [۸]، لیزرهای تپی و پیوسته هر یک دارای بازآواگر جداگانهٔ G۱–M۱ و G۲–M۲ هستند و پرتو لیزر پیوسته به شیوه‌ای فراخور، مانند بهره‌گیری از باریکه شکاف BS، به درون کاواک لیزر تپی فرستاده می‌شود.

هر یک از این دو آرایه، برتریها و کاستیهای ویژه‌ای دارند: آرایهٔ ترکیبی، گرچه چیدمان اپتیکی تا اندازه‌ای ساده دارد و همخوانی محورهای اپتیکی دو کاواک با هم به آسانی انجام‌پذیر است، امّا بزرگی بیش از حدّ کاواکهای بازآواگر از محیطهای فعّال لیزرها، دریافت گسیل لیزری از آنها را تا اندازه‌ای دشوار می‌سازد. همچنین، حجم محیط فعّال در این آرایش دارای مرزی است که با دیوارهٔ کاواک لیزر پیوسته بسته می‌شود؛ بنابراین، بخش بزرگی از انرژی ایجاد شده در محیط فعّال لیزر تپی از دست می‌رود.



شکل ۲- نمونهٔ یک آرایه از روش ترکیبی برای تک مد سازی طولی



شکل۳ - آرایهٔ نمونه‌ای از روش تزریقی برای تک مُدسازی طولی

www.SID.ir

Archive of SID

در آرایهٔ تزریقی، هر یک از لیزرهای تپی و پیوسته از کاواک جداگانه‌ای برخوردارند؛ به همین جهت، با ساختار اپتیکی همیشگی می‌توان آنها را به راه انداخت. با وجود این، گرچه همخوان سازی محورهای اپتیکی دو کاواک در این آرایه بسیار دشوار به نظر می‌رسد، امّا همهٔ انرژی اندوخته شده در محیط فعّال لیزر تپی در دسترس خواهد بود.

۳- روش کار

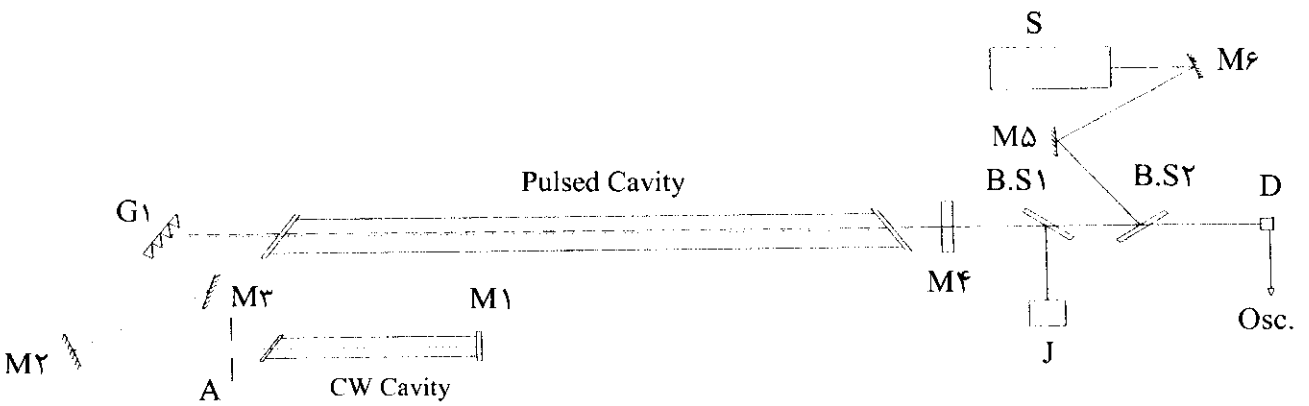
آرایه‌ای که در این رشته آزمایشها بکار رفته در شکل ٤ نشان داده شده است.

لیزر تپی بکار رفته یک لیزر «Lumonics, 103-2» است که باریکه‌ای به ابعاد ۳×۳ cm با آمیزهٔ گازی $CO_2:N_2:He \equiv 1:1:3$ و در بیشتر خطهای گسیلی با بهرهٔ بالا، انرژی حدود ٤J گسیل می‌نماید. آینه Ge تخت و نیمه اندود M٤ با توری G۲ دارای ۱۰۰ S/mm، کاواک تشدید لیزر تپی را می‌سازند که در آن، G۲ در آرایش لیترو و همخوان با زاویهٔ فروزش (Blaze Angle) برای ایجاد طول موج (۱۲) ۹R نگه داشته شده است. لیزر پیوسته نیز از یک لولهٔ پیرکس با قطر داخلی ۸ mm ساخته شده که یک سر آن با آینه‌ای با پوشش طلا به شعاع R=۳ m و سر دیگر آن با یک بلور NaCl در زاویهٔ بروستر بسته شده است. کاواک بازآواگر این لیزر، آینهٔ M۱ و توری G۱، همسان با G۲، را دربر می‌گیرد که در آن G۱ نیز در آرایش لیترو همخوان با زاویهٔ فروزش برای خط (۱۲) ۹R نگه داشته شده است و توان گسیلی آن نیز برای آمیزهٔ گازی $CO_2:N_2:He \equiv 1:1:4$ در طول موج‌هایی با بهرهٔ بالا حدود ۸ وات و باریکه‌ای با قطر تقریبی ۵ mm بوده است. طول کاواکهای M۱-G۱ و M٤-G۲ به ترتیب برابر ۸۰cm و ۲۵۰cm بوده است. پرتو لیزر پیوسته با بهره‌گیری از آینه‌های تخت M۲ و M۳ بگونه‌ای بر روی G۲ فرود می‌آید، که در آرایش لیترو ولی در راستای وارون زاویهٔ فروزش آن باشد. بدین سان، بخش کوچکی از توان فرودی، حدود ۵ تا ۱۰ درصد، در پایهٔ پراش ردهٔ صفر در راستای محور اپتیکی M٤ –G۲، پراشیده می‌شود و ماندهٔ توان فرودی هم، در پایهٔ پراش ردهٔ یکم بر روی خود آن پراشیده می‌گردد.

اکنون، با روشن شدن لیزرهای CO_2 تپی و پیوسته، تپهای تک مُد، بر اساس فرایند پیش گفته، از M٤ گسیل خواهند شد. این تپها از باریکه شکاف BS۱ گذرانده می‌شوند و بخش بازتابی آنها به وسیلهٔ آینه‌های تخت M۵ وM٦ به S، به بیناب‌سنج لیزر CO_2 (Opt.Eng.Inc. Modle 16-A)، فرستاده می‌شود. سپس، بخش تراگسیلی آنها پس از گذر از دریچهٔ A، از باریکه شکاف BS۲ می‌گذرد و بخش بازتابی آنها به ژول‌سنج J (Coherent LM-P10) داده می‌شود. بخش تراگسیلی آنها نیز در یک فوتون دراگ D (ORIEL, 7415) دریافت و بر روی یک اسیلوسکوپ دیجیتال (EZ Digital Co.Ltd.) ۲۵۰ MHz نمایش داده می‌شود.

٤- یافته‌ها و ارزیابی

نمودارهای (۵- الف) و (۵- ب) نمونه‌هایی از تپهای دریافتی را بدون پرتو پیوسته (گسیل چند مُد) و با تزریق آن (گسیل تک مُد) نشان می دهند.



شکل ٤- آرایهٔ آزمایشی بکار رفته

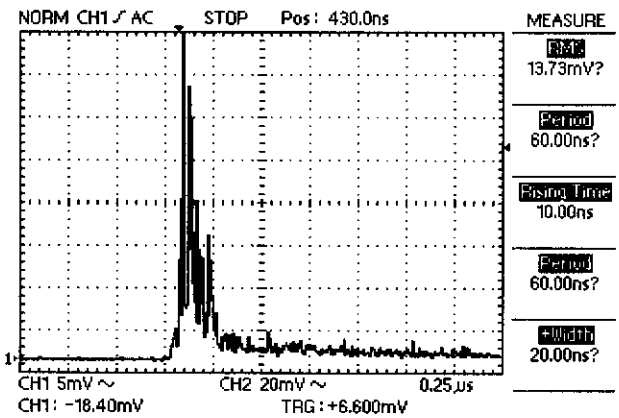
www.SID.ir

Archive of SID

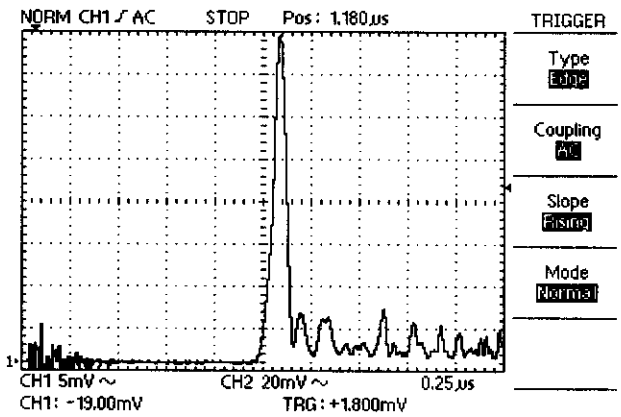
نزدیک بودن بازهٔ آزاد بینابی کاواک لیزر تپی (۶۰ MHz) به پهنای بسامدی پرتو پیوسته (۶۶ MHz) داشته باشد؛ زیرا بی آن که همپوشانی همزمان دو مد طولی با پهنای پرتو پیوسته از احتمال قابل توجّهی برخوردار باشد، این همپوشانی همواره برای یکی از مُدهای طولی انجام‌پذیر خواهد بود.

اندازه‌گیریهایی که بر روی انرژی تپها در دو وضعیت چند مُد و تک‌مُد انجام گرفته‌اند، هیچ گونه افتی را در انرژی تپهای تک مد در برابر تپهای چند مد نشان نداده‌اند. علاوه بر این، پهنای زمانی تپهای دریافتی بر روی اسیلوسکوپ نیز دچار دگرگونی نشده است و همچنان به همان اندازهٔ ۱۰۰ ns نخستین باقی مانده‌اند. همچنین، دیده می‌شود پیک اصلی تپهای تک مُد با تعدادی از پیکهای کوچکتر همراه است. گرچه با کاستن مقدار گاز N_2 در آمیزهٔ مصرفی لیزر تپی، شدّت تپهای گسیلی کاهش می‌یافت، رویهمرفته چنین می‌نمود که از شمار تپهای زنجیره‌ای و همچنین ارتفاع آنها کاسته می‌شود. بر این پایه و گزارشهای دیگر در دست، گمان می‌رود که این پدیده ریشه در دمش مولکولهای CO_2 از راه ترابرد کند انرژی ارتعاشی مولکول‌های N_2 دارد که در یک فرایند بسیار تند گسیل القایی به وسیلهٔ پرتو پیوسته تزریقی بگونه‌ای پله‌ای بیرون کشیده می‌شود. این روال تا بدانجا پیش می رود که انرژی انباشته شده در مولکولهای N_2 به زیر آستانهٔ دمش مولکولهای CO_2 افت نماید [۸].

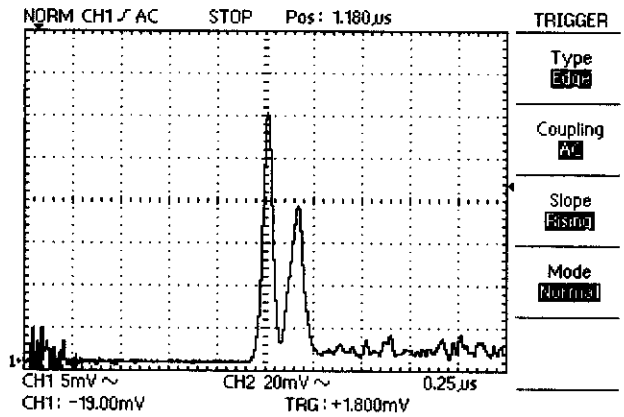
از سوی دیگر، گهگاه برخی تپهای چندگانه با پیکهای به هم چسبیده‌ای پدیدار می‌شدند که نمونه‌ای از آنها در نمودار (۵-ج) نشان داده شده است. بررسیها نشان داده‌اند که با تنظیم هر چه بهتر آینهٔ M٤، احتمال روی دادن این پدیده کاهش می‌یابد. آن‌گونه که گفته شده، این پدیده یا به زنش میان بسامد پرتوهای پیوسته و تپی باز می‌گردد، که در اثر کمتر شدن دقّت تنظیم کاواک لیزر تپی تشدید می‌شود [۹]، و یا نشان از القای برخی از مُدهای عرضی توسّط پرتو تزریقی به دنبال انحراف محور نوسان لیزر تپی دارد [۱۰].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- نمونه‌هایی از تپهای گسیلی (الف) چند مُد، (ب) تک مُد و (ج) چندگانهٔ دریافت شده در آشکارساز

دیده می‌شود که تپهای تک مُد شده به خوبی هموار و بی‌دندانه‌اند، و این خود نشاندهندهٔ از میان رفتن پدیدهٔ زنش مُدی و تک‌مُد شدن تپها است. ویژگی این یافته‌ها نیاز نداشتن آرایهٔ بکاررفته به نگهدارنده‌های PZT و یا هرگونه روشهای دیگر پایدارسازی طولی بازآواگرها است. گرچه بازنمون این ویژگی تا اندازه‌ای دشوار است، امّا به نظر می‌رسد که این پدیده ریشه در

پی‌نوشت‌ها:

۱- Full Weight Holf Maximum

۲- Mode Beating

۳- Resonator

٤- Free Spectral Range

www.SID.ir

References:

1. O. Svelto, "Principles of Lasers," second ed., Plenum Press (1982).

2. M. Gundersen, N.R. Heckenberg, E. Holzhauer, "Tunable single-mode operation of a TE laser by means of selective absorbers," IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-15, **3**, 103-108 (1979).

3. S.C. Mehendale, D.J. Biswas, R.G. Harrison, "Single mode multi line emission from a hybrid CO_2 laser," Opt. Commun., Vol. **55**, **6**, 427-429 (1985).

4. G. Koren, M. Dahan, U.P. Oppenheim, "Multiple-Photon absorption of a CO_2-pumped CF_4 laser radiation in UF_6," Opt. Commun., Vol. **38**, **4**, 265-270 (1981).

5. W. Demtroder, "Laser Spectroscopy," 2nd ed., Spring-Verlag, Berlin Heidelberg (1996).

6. J.T. Verdyan, "Laser Electronics," third ed., Prentice-Hall Inc. (1981).

7. D.J. Biswas, A.K. Nath, U. Nundy, J. Chatterjee, "Multiline CO_2 lasers and their uses," Prog.Quant.Electr., **14**, 1-61 (1990).

8. C.R. Hammond, D.P. Juyal. G.C. Thomas, A. Zembrod, "Single longitudinal mode operation of a transversely excited CO_2 laser," journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol.**7**, 45-48 (1974).

9. J.R. Izatt, C.J. Budhiraja, P. Mathieu, "Single-mode TEA-CO_2 injection laser," IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-13, 396-398, June (1977).

10. J.L. Lachambre, P. Lavigne G. Otis, M. Nocl, "Injection locking and mode selection in TEA-CO_2 laser oscillators," IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-12, **12**, 756-764 (1976).

www.SID.ir