

تك مد ساري ليزر CO<sub>2</sub> تپي به روش  
تزيق پرتو يك ليزر CO<sub>2</sub> پيوسته

كاوه سيلاخوري (\*) : مركز تحقيقات ليزر، سازمان انرژي اتمي ايران، صندوق  
پستي : ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶  
تلفن : ۰۲۱- ۶۱۳۸۲۵۵۷  
ksilakhori@aeoi.org.ir

فريدون سلطانمرادي : مركز تحقيقات ليزر، سازمان انرژي اتمي ايران،  
صندوق پستي : ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶  
تلفن : ۰۲۱-۸۰۰۹۱۵۷  
fsoltanmoradi@aeoi.org.ir

عباس بهجت : دانشكده فيزيك، دانشگاه يزد، صندوق پستي : ۸۹۱۷۸/۷۴۱  
تلفن : ۷۲۵۰۱۱۴  
abehjat@yazduni.ac.ir

محسن منتظرالقائم : مركز تحقيقات ليزر، سازمان انرژي اتمي ايران،  
صندوق پستي : ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶  
تلفن : ۰۲۱-۶۱۳۸۲۵۷۹  
saman929@yahoo.com

سيد محمد رضا صدر قائني : مركز تحقيقات ليزر، سازمان انرژي اتمي  
ايران، صندوق پستي : ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶  
تلفن : ۰۲۱- ۶۱۳۸۲۵۷۹  
mrs1342@yahoo.com

محل انجام پروژه : آزمایشگاه ليزرهای گاز کربنيك، مركز تحقيقات ليزر،  
سازمان انرژي اتمي ايران.

نوع مقاله : اصیل پژوهشی (Original Article)

## تك مد سازي ليزر CO<sub>2</sub> تپي به روش تزریق پرتو يك ليزر CO<sub>2</sub> پيوسته

كاوه سيلاخوري، فریدون سلطانمرادي، عباس بهجت، محسن منتظرالقائم و  
سیدمحمدرضا صدقائني

### چکیده

در این پژوهش، برای نخستین بار در کشور تک مد سازي طولی ليزر CO<sub>2</sub> تپي، که از کاربردهاي گسترده و بنيادي در پژوهشهاي بيناب نمايي ليزري و فرآيندهاي دمش نوري برخوردار است، به انجام رسیده است. برای این کار، پرتو يك ليزر CO<sub>2</sub> پيوسته در راستاي محور اپتيكي يك ليزر CO<sub>2</sub> تپي به درون كاواك بازآواگر آن فرستاده شد. بدین سان، با از میان رفتن پديده ي زنش مدي در تپهاي آشكار شده و يکنواخت گردیدن آنها، فرآيند تك مد شدن تپها به روشني پديدار گردید. این کار بدون بهره گيري از مبدل هاي PZT و يا هر كوشش ديگري برای پايدارسازي مكانيكی كاواكهاي بازآواگر به انجام رسيد و افزون بر آن، انرژی تپهاي تك مد شده در برابر تپهاي چند مد نيز، هيچ افتي را از خود نشان نداده است.

**كلمات كليدي :** ليزر CO<sub>2</sub>، تك مد سازي، تك مد طولی

### Abstract

In this research work, single mode operation based on injection of a CW laser beam into a TEA CO<sub>2</sub> laser cavity has been demonstrated. The technique has vast applications in research programs of laser spectroscopy and optical pumping. The observed smooth pulse shapes indicated that the system is operating in a single mode of operation. In addition, the output energy has not been reduced with the laser was operating in a single mode operation on comparison with the case when it is operating in a multi mode regime. Also, no PZT mounted elements or other length stabilization methods were used in order to frequency matching of master and slave resonators.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser, Single Mode laser, Injection-Locking,

### (۱) مقدمه

با ساخت نخستین ليزر CO<sub>2</sub> پيوسته، بزودي روشن گردید که این گونه ليزرها داراي يك مرز توان گسيلى پيرامون ۶۰ - ۵۰ W/m يا ۸۵ W/l - ۷۰ هستند. يکی از راهكارهاي گونه گوني که در راستاي افزايش توان این ليزرها پيگيري گردیده به ساخت ليزرهاي CO<sub>2</sub> تپي انجاميد، که از ويژگيهاي چشمگيري همچون انرژی گسيلى پيرامون J/l ۱۰ - ۱۵ و يك گسيل تپي با FWHM از يك تا چند صد ns برخوردارند [۱]. بدترین ويژگي ناخواسته ي این ليزرها پهنای بسامدي نمودار بهره و از آن روي، پهن شدگی خط هاي گسيلى آنهاست که ريشه در پهنای فشاري گذارهاي کوانتومي مولكولهاي CO<sub>2</sub> در فشارهاي نزديک به اتمسفر دارد. این پهنای، که تا چند ده برابر پهنای خط هاي گسيلى ليزرهاي CO<sub>2</sub> پيوسته است [۲]، پديده ي زنش مدي (Mode Beating) در تپهاي گسيلى را به دنبال دارد [۳]. چنین پديدههاي، پيامدهاي ناخواسته ي زيانباري را بر بسياري از کاربردهاي ليزر CO<sub>2</sub> تپي در زمينه ي برهمکنش پرتو ليزر با ماده و بويژه در كارهاي بيناب نمايي ليزري به همراه دارند و از همين روي، تلاشهاي فراواني تاکنون در راستاي از میان برداشتن آنها انجام پذيرفته اند. شالوده ي همه ي این روشها، باريکتر نمودن پهنای بسامدي بازه ي نوسان كاواك ليزر است که به دنبال آن، مدهاي طولی كاواك بازآواگر (Resonator) ليزر کنار زده مي شوند و سرانجام پديده ي زنش مدي در تپها نيز ناپديد مي گردد [۴].

### (۲) پايه هاي فيزيكي

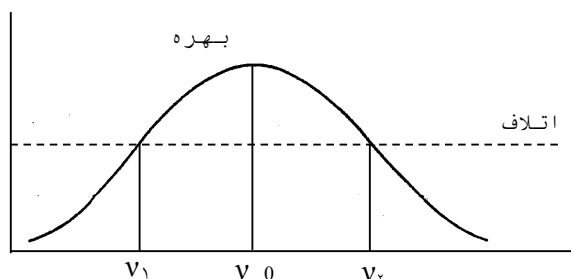
می دانیم که در یک باز آواگر تخت-موازی به درازای  $L$ ، تنها موج هایی می توانند به گونه ای ایستاده در آن رفت و برگشت نمایند، که طول موج آنها از برابری زیر پیروی نماید [۵]:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad v = \frac{nc}{2L} \quad (1) \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

بر این پایه، برای  $n$  های پی در پی شمار بی پایانی از بسامد های  $v_n$  را، که یک مد طولی نامیده می شوند، می توان یافت که در این کاواک یک موج ایستاده بسازند. جدایی بسامدی میان دو مد طولی پی در پی، یا بازه ی آزاد بینایی (FSR) کاواک، برابر است با:

$$\Delta v = v_n - v_{n-1} = \frac{c}{2L} \quad (2)$$

که در آن  $c$  تنیدی نور است. از سوی دیگر، نمودار بهره ی یک لیزر را می توان همانند آنچه در نگاره ی (۱) آمده است نشان داد که در آن، اتلاف برای همه ی بسامدها یکسان انگاشته شده است:



نگاره ی (۱) : نمایشی از نمودار بهره و اتلاف در یک لیزر [۶].

اکنون، چنانچه بازه ی بسامدی  $\delta v = v_2 - v_1$ ، که بازه ی نوسان نامیده می شود و در آن بهره بیشتر از اتلاف است، بزرگتر از  $\Delta v$  باشد، مد های دیگری بجز مد با بسامد مرکزی  $v_0$  نیز، خواهند توانست در آن نوسان نمایند. نوسان چند مدی لیزرهای  $\text{CO}_2$  تپی، که دارای پهنای بهره ی بسیار بالایی هستند (پیرامون ۳-۴ GHz) [۷] نیز، ریشه در همین پدیده دارد. شمار بسامدهایی که از توانایی نوسان در این چگونگی برخوردارند،  $N$ ، بگونه ی زیر بدست می آید:

$$\frac{\delta v}{\Delta v} = \frac{2L}{c} \delta v \quad (3)$$

از آنجا که هر یک از این  $N$  بسامد دارای انرژی ها و فازهای کم و بیش جداگانه ای هستند، برونداد چنین لیزری برآیند یک تپ نیرومند در بسامد مرکزی  $v_0$  به همراه شمار فراوانی از تپهای کوچکتر با فازهای زمانی کاتوره ای است. بر هم نهدی همه ی این تپهای کوچک و بزرگ بر روی تپ مرکزی، همچون یک تپ دندانیه ای پدیدار می گردد، که به نام زنش مدی خوانده می شود. برای به دست دادن یک چشم انداز سرانگشتی، نخست بازه ی آزاد بینایی کاواکی به درازای  $L = 1 \text{ m}$  را به دست می آوریم:

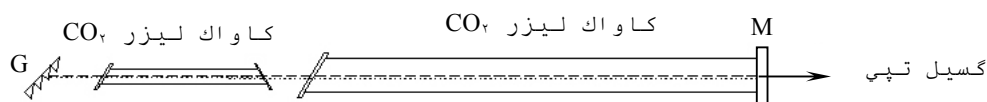
$$\delta v = 3 \text{ GHz} \quad \frac{\Delta v}{\delta v} = \frac{2L}{c} = 1/5 \times 10^8$$

اکنون اگر بازه ی نوسان یک لیزر  $\text{CO}_2$  تپی را  $3 \text{ GHz}$  بگیریم. خواهیم داشت:  $N=20$ . از سوی دیگر، پهنای خط یک لیزر  $\text{CO}_2$  پیوسته چیزی پیرامون  $66 \text{ MHz}$  است و بدین سان، دیده می شود که برای آن  $N < 1$  خواهد بود و بر این پایه، تنها یک مد طولی می تواند

در کاواک چنین لیزری نوسان نماید. از این روی، یک لیزر  $\text{CO}_2$  پیوسته با طول یک متر بگونه ای خودبخود تک مد طولی خواهد بود [۵].

اگر چه روشهای گونه گونی برای تک مد سازی این لیزرها در دست هستند که هر کدام از سرشت فیزیکی جداگانه ای برخوردارند، ناهمسانی گفته شده در چگونگی مدهای طولی کاواک بازآواگر لیزرهای  $\text{CO}_2$  تپی و پیوسته، زمینه و انگیزه ی بیشترین تلاشهای انجام یافته برای تک مد سازی لیزرهای  $\text{CO}_2$  تپی بوده است. می دانیم که با برپا نمودن یک تابش زمینه ی آغازگر در کاواک بازآواگر یک لیزر، با پهنای دلخواه و بسامد مرکزی در بازه ی نوسان کاواک، می توان بنیادی برای آغاز فرآیند گسیل القایی در آن برپا نمود، که نوسان لیزری پیامد آن نیز به درستی بر روی همان بسامد مرکزی و همان پهنای بسامدی انجام یابد. اکنون، چنانچه شدت تابش زمینه بیشتر از شدت تابش سرزده از گسیل خودبخودی مولکول ها باشد، آنگاه این تابش آغازگر با تھی سازی زودرس و تندتر انرژی برانگیختگی در بسامد مرکزی خود و پهنای وابسته، زمینه را برای نوسان بسامدهای کناری دیگر دشوار و گاه ناشدنی می سازد. بدین سان، چنانچه پهنای بسامدی پرتو آغازگر کمتر از بازه ی آزاد بینابی کاواک بازآواگر باشد، می توان یک کاواک چند مدی را وادار به نوسان بر روی تنها یک مد نیز نمود. همان گونه که دیده شد، پرتو یک لیزر  $\text{CO}_2$  پیوسته از ویژگی بایسته برای انجام چنین فرآیندی در یک لیزر  $\text{CO}_2$  تپی و تک مد ساختن طولی آن برخوردار است و به راستی همین ویژگی را باید شالوده ی بیشتر روشها و راهکارهایی به شمار آورد که تاکنون در راستای تک مد سازی طولی لیزرهای  $\text{CO}_2$  تپی به کار گرفته شده اند.

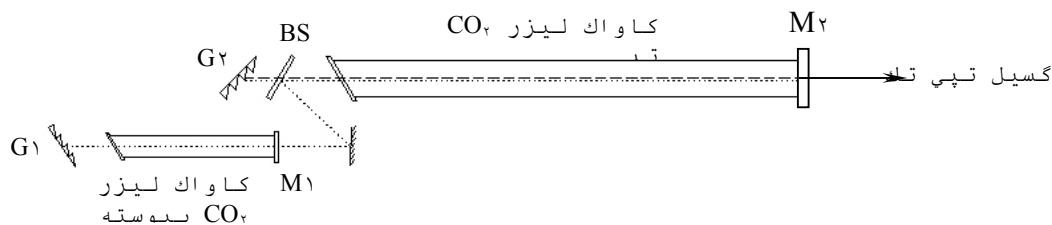
آرایه های کاربستی تک مدسازی لیزرهای  $\text{CO}_2$  تپی بر شالوده ی فرآیند گفته شده، که بر پایه ی تقویت گزینشی یک مد طولی برگزیده شده استوار هستند را می توان در دو دسته ی ترکیبی (Hybrid) و تزریقی (Injection) جای داد [۶]. الگویی ساده از یک آرایه ی ترکیبی در نگاره ی (۲) دیده می شود:



نگاره ی (۲): یک آرایه ی نمونه ای از روش ترکیبی برای تک مد سازی طولی [۷].

همان گونه که دیده می شود، کاواک بازآواگر G-M از آن هر دو لیزر تپی و پیوسته است و پرتو لیزر پیوسته، با رفت و برگشت در میان کاواک لیزر تپی، همواره محیط فعال لیزر تپی را جاروب می نماید. اکنون، با آغاز فرآیند دمش و گسیل خودخودی پیامد آن در دو کاواک، پرتو زمینه پیوسته همچون یک تابش آغازگر، تپ سرزده از گسیل القایی را وادار به نوسان بر روی بسامد خود خواهد نمود، بگونه ای که پهنای آنها با هم برابر باشند.

در آرایه های تزریقی، که نمایی ساده ای از آنها در نگاره ی (۳) دیده می شود، لیزرهای تپی و پیوسته هر یک دارای بازآواگر جداگانه ی  $G_1 - M_1$  و  $G_2 - M_2$  هستند و پرتو لیزر پیوسته به شیوه ای فراخور مانند بهره گیری از باریکه شکاف، BS، به درون کاواک لیزر تپی فرستاده می شود.



نگاره ي (۳) : يك آرایه ي نمونه اي از روش تزریقي براي تك مد سازه طولی [۸].

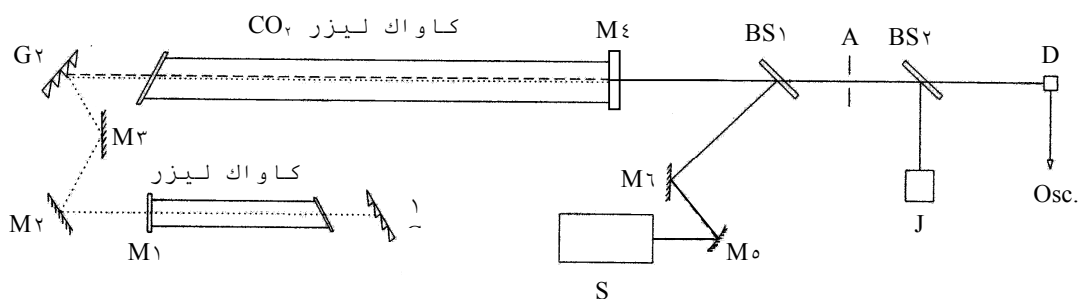
هر يك از این دو آرایه از برتریها و كاستیهاي ویژه ي خود برخوردارند. در باره ي آرایه ي ترکیبی باید گفت که اگر چه چیدمان اپتیکی تا اندازه اي ساده تر دارد و همخوانی محورهاي اپتیکی دو کاواک بر هم بسیار ساده تر انجام می پذیرد، نباید از یاد برد که بزرگی بیش از اندازه ي کاواکهاي بازآواگر از محیط هاي فعال لیزرها، دریافت گسیل لیزری از آنها را تا اندازه اي دشوارتر می سازد. همچنین، گنجایش محیط فعال در چنین آرایشی به ناچار دارای مرزی است که با دیواره ي کاواک لیزر پیوسته بسته می شود و از این روی، بخش بزرگی از انرژی اندوخته شده در محیط فعال لیزر تپی از دست خواهد رفت.

از سوي دیگر در آرایه ي تزریقي، هر يك از لیزرهاي تپی و پیوسته از کاواک جداگانه اي برخوردارند و از همان روی، با همان ساختار اپتیکی همیشگی می توان آنها را راه اندازی نمود. با این همه، اگر چه همخوان سازه ي محورهاي اپتیکی دو کاواک بر هم بسیار دشوارتر می نماید، همه ي انرژی اندوخته شده در محیط فعال لیزر تپی در دسترس خواهد بود.

### ۳) چیدمان آزمایش

آرایه اي که در این رشته آزمایشها چیده شده در نگاره ي (۴) نشان داده شده است.

نگاره ي (۴) : چیدمان آزمایشی بکارگرفته شده.



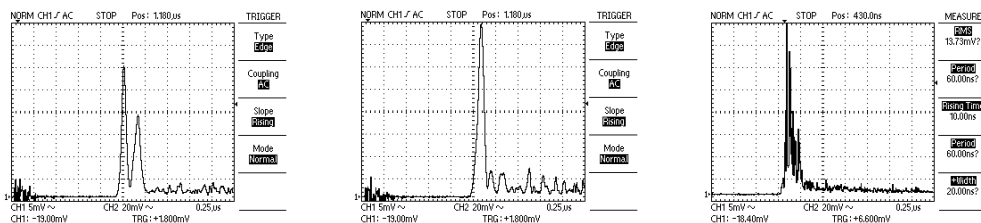
لیزر تپی بکار رفته يك لیزر (Lumonics, 103-2) بوده که برای آمیزه ي گازی  $CO_2:N_2:He \equiv 1:1:3$  در بیشتر خط هاي گسیلی با بهره ي بالا دارای انرژی پیرامون  $4 J$  و باریکه اي با اندازه ي  $3 \times 3 cm$  است. آینه ي Ge تخت و نیمه اندود  $M_4$  به همراه توری  $G_2$  با  $100 S/mm$  کاواک تشدید لیزر تپی را می سازند که در آن،  $G_2$  در آرایش لیترو و همخوان با زاویه ي افروخته ي (Blaze Angle) برای خط (۱۲)  $9R$  نگه داشته شده است.

لیزر پیوسته نیز از يك لوله ي پيركس با قطر داخلي mm ۸ ساخته شده كه يك سر آن با آينه ي (m ۳ R= Au و سر ديگر آن نیز با يك بلور NaCl در زاويه ي بروسر بسته شده است. كاواك بازآواگر اين ليزر، آينه ي M۱ و توري G۱ همسان با G۲ را دربرمي گيرد و توان گسيلى آن نیز براي آميزه ي گازي ۴:۱:۱ CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He ≡ در خط هاي با بهره ي بالا پيرامون ۸ و باريكه اي با قطر تقريبي mm ۵ بوده است. كاواك بازآواگر ليزر پيوسته نیز از آينه ي M۱ و توري G۱ همسان با G۲ ساخته شده كه در آن نیز G۱ در آرايش ليترو همخوان با زاويه ي افروخته براي خط (۱۲) R ۹ نگه داشته شده است. طول كاواكهاي G۱-M۱ و G۲-M۴ به ترتيب برابر ۲۵۰ cm و ۸۰ cm بوده است. پرتو ليزر پيوسته با بهره گيري از آينه هاي تخت M۲ و M۳ بگونه اي بر روي G۲ فرود مي آيد، كه در آرايش ليترو ولي در راستاي وارون زاويه ي افروخته ي آن باشد. بدین سان، بخش كوچكي، پيرامون ۱۰-۵ درصد، از توان فرودي در پايه ي پراش رده ي صفر در راستاي محور اپتيكي G۲ - M۴، پراشیده مي شود و مانده ي توان فرودي نیز، در پايه ي پراش رده ي يك بر روي خود آن پراشیده مي گردد.

اکنون، با روشن شدن ليزرهاي CO<sub>2</sub> تپي و پيوسته، تپهاي تك مد بر پايه ي فرآيند گفته شده از M۴ گسيل خواهند شد. اين تپها از باريكه شكاف BS۱ گذرانده مي شوند و بخش بازتابي آنها از راه آينه هاي تخت M۵ و M۶ به بيناب نماي ليزر CO<sub>2</sub> (Opt.Eng.Inc. Modle 16-A)، S فرستاده مي شود. سپس، بخش تراگسيلى آنها پس از گذر از دريچه ي A، بار ديگر از باريكه شكاف BS۲ مي گذرد و بخش بازتابي آنها به ژول سنج J (Coherent LM-P10) داده مي شود. بخش تراگسيلى آنها نیز در يك فوتون دراگ D (ORIEL, 7415) دريافت و بر روي يك اسيلوسكوپ ديجيتال ۲۵۰ نمايش داده مي شود.

#### ۴) یافته ها و ارزیابی

نگارههاي (الف) و (ب-۵) نمونه هايي از تپهاي دريافتي را بدون پرتو پيوسته (گسيل چند مد) و با تزريق آن (گسيل تك مد) نشان مي دهند.



(الف)

(ج)

(ب)

نگاره ي (۵) : نمونه اي از تپهاي گسيلى (الف) چند مد، (ب) تك مد و (ج) چندگانه ي دريافت شده در آشكارساز.

همان گونه كه ديده مي شود، تپهاي تك مد شده تا اندازه ي بسياري هموار و بدون دندان شده اند، كه اين خود نشان دهنده ي از ميان رفتن پديده ي زنش مدي و تك مد شدن آنها است. شايانترين ويژگي اين يافته ها را بي گمان بايد بي نيازي آرايه ي بكار رفته از نگهدارنده هاي PZT و هر گونه روشهاي ديگر پايدارسازي طولی بازآواگرها به شمار آورد. اگرچه بازنمون اين ويژگي تا اندازه اي دشوار مي نمايد، گمان مي رود كه اين پديده ريشه در نزديكي بازه ي بينابي آزاد كاواك ليزر تپي (MHz ۶۰) به پهناي بسامدي پرتو

پیوسته (66 MHz) داشته باشد؛ چرا که بدین سان بی آن که همپوشانی همزمان دو مد طولی با پهنای پرتو پیوسته از احتمال چندانی برخوردار باشد، این همپوشانی همواره برای یکی از مدهای طولی انجام پذیر می نماید.

اندازه گیریهایی که بر روی انرژی تپها در دو چگونگی چند مد و تک مد انجام گرفته اند، هیچ گونه افتی را در انرژی تپهای تک مد در برابر تپهای چند مد نشان نداده اند. وانگهی، پهنای زمانی تپهای دریافتی بر روی اسیلوسکوپ نیز، دچار دگرگونی نشده اند و همچنان بر روی همان اندازه ی 100 ns نخستین مانده اند. همچنین، دیده می شود ستیخ اصلی تپهای تک مد با شماری از ستیغهای کوچکتر همراهی می گردد. اگر چه با کاستن از اندازه ی گاز  $N_2$  در آمیزه ی مصرفی لیزر تپی، شدت تپهای گسیلی به تندی رو به کاستی می گذاشتند، روی هم رفته چنین می نمود که از شمار تپهای زنجیره ای و همچنین بلندی آنها کاسته می گردید. بر این پایه و همچنین دیگر گزارشهای در دست، گمان می رود که این پدیده ریشه در دمش مولکول های  $CO_2$  از راه ترابرد کند انرژی ارتعاشی مولکول های  $N_2$  دارد که در یک فرآیند بسیار تند گسیل القایی توسط پرتو پیوسته تزریقی بگونه ای پله ای بیرون کشیده می شود. این روال تا بدانجا پیش می رود که انرژی انباشته شده در مولکول های  $N_2$  به زیر آستانه ی دمش مولکول های  $CO_2$  افت نماید [8].

از سوی دیگر، گهگاه برخی تپهای چندگانه با ستیغهای به هم چسبیده ای پدیدار می گردیدند، که نمونه ای از آنها در نگاره ی (5-ج) نشان داده شده است. بررسیها نشان داده اند که با تنظیم هر چه بهتر آینه ی  $M_4$ ، احتمال روی دادن این پدیده کمتر و کمتر می شود. آن گونه که گفته شده، این پدیده یا به زنش میان بسامد پرتوهای پیوسته و تپی بازمی گردد، که به دنبال کمتر شدن دقت تنظیم کاواک لیزر تپی تشدید می شود [9]، و یا نشان از القای برخی مدهای عرضی توسط پرتو تزریقی به دنبال کجی محور نوسان لیزر تپی دارد [10].

## مراجع

- [1] O.Svelto, "Principles of Lasers", second ed., Plenum Press, 1982.
- [2] M.Gundersen, N.R.Heckenberg and E.Holzhauser, "Tunable Single-Mode Operation of a TE Laser by means of Selective Absorbers", IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-15, No. 3, PP 103-108, 1979.
- [3] S.C.Mehendale, D.J.Biswas and R.G.Harrison, "Single Mode Multi Line Emission from a Hybrid  $CO_2$  Laser", Opt Commun., Vol. 55, No. 6, PP 427-429, 1985.
- [4] G.Koren, M.Dahan and U.P.Oppenheim, "Multiple-Photon Absorption of a  $CO_2$ -Pumped  $CF_4$  Laser Radiation in  $UF_6$ ", Opt. Commun., Vol. 38, No. 4, PP 265-270, 1981.
- [5] W.Demtroder, "Laser Spectroscopy", 2<sup>nd</sup> 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 and J.Chatterjee, "Multiline  $CO_2$  Lasers and their Uses", Prog.Quant.Electr., Vol. 14, PP 1-61, 1990
- [8] C.R.Hammond, D.P.Juyal. G.C.Thomas and A.Zembrod, "Single Longitudinal Mode Operation of a Transversely Excited  $CO_2$  Laser", journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol.7, PP 45-48, 1974..

- [9] J.R.Izatt, C.J.Budhiraja, and P.Mathieu, “*Single-Mode TEA-CO<sub>2</sub> Injection Laser*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-13, PP 396-398, June 1977.
- [10] J.L.Lachambre, P.Lavigne G,Otis and M.Noel, “ *Injection Locking and Mode Selection in TEA-CO<sub>2</sub> Laser Oscillators*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-12, No. 12, PP 756-764, 1976.