

تک مدسازی طولی لیزر CO₂ تپی با فشار ۳ atm به روش ترکیبی

سجاد کاظمی سنگ سرکی، سعید جلوانی، محمود ملاباشی، مریم ایلچی، زهرا پورحسن‌نژاد، داود احدپور، کاوه سیلاخوری*
 پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران-ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۸/۲۲

چکیده: در این پژوهش، از پیکربندی ترکیبی برای تک‌مدسازی طولی یک لیزر CO₂ تپی با فشار ۳ atm با طول محیط فعال ۱۴ cm بهره گرفته شده است. برای این کار، از یک لیزر پیوسته و کم‌فشار CO₂ درون‌کاواکی با طول محیط فعال ۱۲۰ cm سود جسته شده است. دیده شد که تپ‌های گسیلیده‌ی سیستم در حالت بالای آستانه و هم‌چنین حالت زیرآستانه تا فشار ۷ mbar رفتار کاملاً تک‌مدی از خود نشان می‌دهند. برای مشخصه‌یابی این سیستم، ویژگی‌های گوناگون تپ‌های تک‌مد شده در فشارها و توان‌های مختلف لیزر پیوسته بررسی و ارزیابی شدند. در همین راستا، فشار آستانه‌ی تک‌مدشدگی در این شرایط برای لیزر پیوسته برابر ۹٫۵ mbar به‌دست آمد. نشان داده شد که در هر دو حالت بالا و زیر آستانه‌ی لیزر پیوسته، تپ‌های تک‌مد گسیلیده دارای دیرش زمانی و زمان خیز بیش‌تر و زمان برساخت کم‌تری نسبت به حالت چند مد هستند.

کلیدواژه‌ها: تک‌مدسازی طولی، روش ترکیبی، لیزر CO₂ تپی

Single longitudinal mode operation of a 3 atm pulsed CO₂ laser with hybrid method

S. Kkazemi Sangsaraki, S. Jelvani, M. Mollabashi, M. Ichi, Z. Pourhasannezhad, D. Ahadpour, K. silakhori*
 Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399511-13, Tehran-Iran

Abstract: In this work, the hybrid configuration was used to produce the single longitudinal mode operation of pulsed CO₂ laser with 14 cm long active volume at the pressure 3 atm. For this resean, a low pressure continuous wave CO₂ laser with 120 cm long active volume is used. It was found that the emitted pulses of the system exhibit single mode behavior in above threshold condition and also at the pressures up to 7 mbar below threshold condition. To characterize the system performance, various parameters of the single mode pulses at different pressures and powers of the continuous wave laser were analyzed. Furthermore, the threshold pressure of the continuous wave laser for the single mode operation was obtained at about 9.5 mbar. It is shown that in both above and below threshold conditions, the single mode pulses have higher durations and rise times and also lower build- up times.

Keywords: Single longitudinal operation, Hybrid method, Pulsed CO₂ laser

*Email: ksilakhori@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

برای نمونه، برای طول کاواک ۱ m شمار مدهای طولی در لیزرهای CO₂ پیوسته و تپی با فشار اتمسفر با بیشینه پهنای بینایی بهره‌ی برابر با ۷۵ MHz و ۴ GHz به ترتیب به ۱ و ۲۷ می‌رسد. این مدهای طولی، که هم‌زمان در کاواک نوسان می‌کنند، دارای دامنه‌ها و فازهای کاتوره‌ای و مستقل از یکدیگر هستند. از همین‌رو، با برهم‌نهی تداخلی و زنبشی آن‌ها درون تشدیدگر، میدان بیرونی یا همان تپ‌های گسیلیده‌ی لیزر نیز تغییرات زمانی بسیار آشفته‌ای را از خود نشان خواهد داد. این رفتار، به کمک آشکارسازهای سریع هم‌چون دندانه‌های تیز و پراکنده در رد زمانی باریکه‌های گسیلی دیده می‌شوند.

برای یک بررسی موشکافانه‌تر، نخست دو مد با بسامدهای زاویه‌ای ω_1 و ω_2 با دامنه‌های بیشینه‌ی میدان الکتریکی E_1 و E_2 را درون تشدیدگر می‌انگاریم، که دارای قطبش خطی هم‌راستا باشند. نمایش نرده‌ای میدان الکتریکی وابسته به این مدها این‌گونه خواهد بود:

$$\begin{cases} e_1 = E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi_1(t)] \\ e_2 = E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi_2(t)] \end{cases} \quad (4)$$

در این‌جا، $\varphi_1(t)$ و $\varphi_2(t)$ فازهای وابسته به هر یک از این مدها هستند. تغییرات شدت برابند برابر است با مربع مجموع دامنه‌ی میدان‌ها [۷]:

$$\begin{aligned} I(t) &= (e_1 + e_2)^2 = E_1^2 \cos^2[\omega_1 t + \varphi_1(t)] \\ &+ E_2^2 \cos^2[\omega_2 t + \varphi_2(t)] \\ &+ 2E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi_1(t)] \cdot E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi_2(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

از آن‌جا که هیچ آشکارسازی دارای سرعت لازم برای ردیابی نوسان‌های میدان الکتریکی امواج نوری نیست، پاسخ زمانی آن‌ها دربرگیرنده‌ی تپی است که هم‌خوان با اندازه‌ی میانگین زمانی شدت $I(t)$ در بازه‌ی زمان پاسخ آشکارساز، τ_D است و با $\langle I \rangle$ نمایش داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \langle I \rangle &= \langle (e_1 + e_2)^2 \rangle = \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} \\ &+ \frac{2E_1 E_2}{\tau_D} \int_0^{\tau_D} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1(t) - \phi_2(t)] dt \end{aligned} \quad (6)$$

لیزرهای CO₂ تپی، یکی از پرکاربردترین لیزرها در زمینه‌های گوناگون پژوهشی و صنعتی هستند. پهنای بینایی بهره‌ی این لیزرها از پیرامون ۴ GHz در فشار اتمسفر آغاز می‌شود و با افزایش فشار به‌گونه‌ای خطی افزایش می‌یابد. از آن‌جا که بازه‌ی آزاد بینایی^۱ در تشدیدگرهای معمولی از چند صد MHz فراتر نمی‌رود، این لیزرها می‌توانند هم‌زمان روی چندین مد طولی نوسان نمایند. تداخل این مدهای ناهم‌فاز به یک شکل تپ آشفته و دندانه‌ای می‌انجامد، که زنبش مدی^۲ نامیده می‌شود و پی‌آمدهای ناخواسته‌ی زبانباری بر بسیاری از کاربردهای لیزر CO₂ تپی دارد [۱-۲]. از همین‌رو، تاکنون تلاش‌های فراوانی برای تک‌مدسازی این لیزرها انجام پذیرفته است [۳-۶]. در این مقاله، یک لیزر تپی CO₂ با فشار ۳ atm با بهره‌گیری از یک لوله‌ی تخلیه‌ی لیزر CO₂ پیوسته‌ی کم‌فشار، به‌روش ترکیبی^۳ تک‌مدسازی، راه‌اندازی و مشخصه‌یابی شده است.

۲. مبانی نظری

در یک کاواک تخت- موازی به طول L ، تنها موج‌هایی می‌توانند به‌گونه‌ای پایدار در آن نوسان نمایند، که طول موج λ آن‌ها شرط امواج ایستاده‌ی زیر را برآورده سازند:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow v_n = \frac{nc}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

که در آن، n یک عدد درست است. هر یک از این طول موج‌ها، یک مد طولی نامیده می‌شوند. جدایی بسامدی میان دو مد طولی متوالی یا همان بازه‌ی آزاد بینایی تشدیدگر برابر است با:

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

اگر پهنای بهره‌ی لیزر را برابر Δv بگیریم، شمار مدهای طولی که خواهند توانست در این تشدیدگر نوسان نمایند، برابر است با:

$$N = \frac{\Delta v}{\delta v} = \frac{2L}{c} \Delta v + 1 \quad (3)$$

1. Free spectral range
2. Mode Beating
3. Hybrid

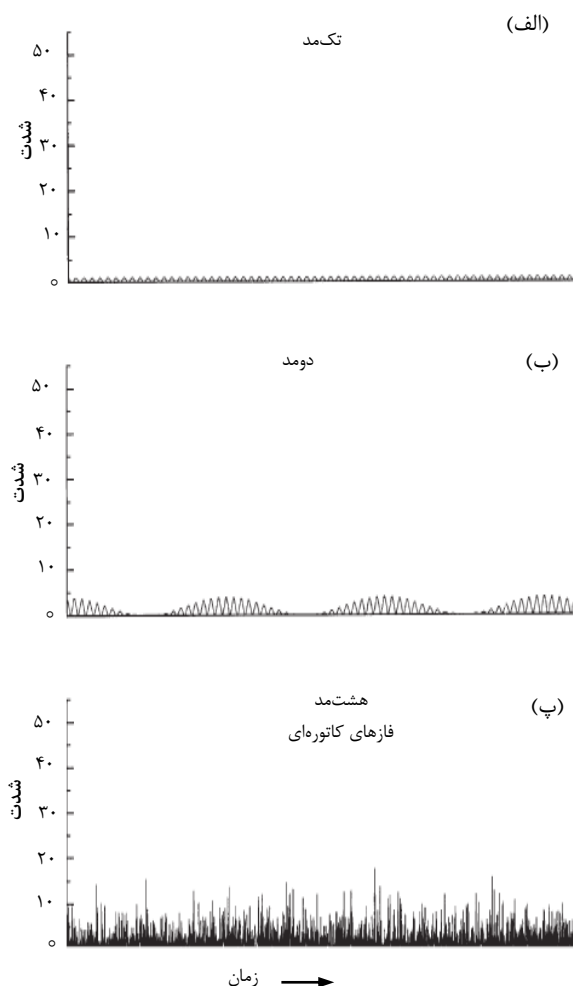
تک مدسازی لیزرهای CO₂ روش‌های گوناگونی را دربر می‌گیرد، که هر کدام از برتری‌ها و کاستی‌های خود برخوردارند. همه‌ی این روش‌ها بر تقویت‌گزینه‌ی یک مد و یا ایجاد اتلاف برای همه‌ی مدها به‌جز یکی، استوارند. بدین‌سان، تنها همان مد برگزیده با پیشی گرفتن از دیگران خواهد توانست به آستانه‌ی نوسان برسد و یک گسیل تک‌مد طولی را برای لیزر به ارمغان آورد. لیزرهای تک‌مد ترکیبی، دربرگیرنده‌ی یک محیط فعال کم‌فشار و معمولاً پیوسته‌ی تک‌مد (مرجع^۱) و یک لیزر تپی پرفشار چندمد (وابسته^۲) است، که درون یک تشدیدگر نوری مشترک جای داده می‌شوند. سازوکار تک‌مدشدگی در چنین سیستمی را در دو حالت جداگانه می‌توان بررسی نمود: حالت بالای آستانه و حالت زیر آستانه.

الف) حالت بالای آستانه. در این حالت، شرایط تشدیدگر به‌گونه‌ای است که لیزر پیوسته‌ی مرجع، که به‌خودی‌خود تک‌مد است، به بالای آستانه‌ی نوسان می‌رسد و دارای یک خروجی پیوسته است. در این وضعیت، شار فوتونی تک‌مد پیوسته از شار اولیه‌ی فوتون‌های وابسته‌ی هر مد دیگری بیش‌تر است و هنگام گذر از درون محیط فعال لیزر تپی وابسته به‌سرعت تقویت خواهد شد. به این ترتیب، این مد در رقابت با مدهای دیگر پیش خواهد افتاد و لیزر تپی وابسته را نیز وادار به نوسان بر روی تنها همین مد طولی خواهد نمود.

ب) حالت زیر آستانه. در این حالت، شرایط تشدیدگر به‌گونه‌ای است که لیزر مرجع نمی‌تواند به آستانه‌ی نوسان برسد اما هم‌چنان دارای بهره است. در این وضعیت، نوسان لیزری با فوتون‌های اولیه‌ی چندمد حاصل از گسیل خودبه‌خودی محیط فعال لیزر وابسته آغاز خواهد شد. اما به هنگام عبور این فوتون‌ها از محیط فعال لیزر مرجع، تنها یکی از مدها که از بیش‌ترین نزدیکی به بسامد مرکزی بهره‌ی محیط فعال مرجع برخوردار است، بیش‌تر از دیگران تقویت خواهد شد و همین اختلاف در تقویت، به پیشی گرفتن آن از دیگران و گسیل تک‌مد در کل سیستم خواهد انجامید.

در رابطه‌ی (۶)، دو جمله‌ی نخست نماینده‌ی شدت وابسته به هر یک از دو مد و جمله‌ی سوم هم نماینده‌ی شدت متغیر زنشی آن‌ها با بسامد $(\omega_1 - \omega_2)$ است. این رفتار زنشی در شدت برآیند در شکل (۱ ب) دیده می‌شود.

هنگامی که بر شمار مدهای درون کاواک افزوده می‌شود، اگر فازهای آن‌ها کاملاً کاتوره‌ای و بدون هیچ‌گونه ارتباطی با هم باشند، این شدت برآیند، رفتار زنشی بسیار پیچیده و کاملاً آشفته و دندان‌های به‌خود می‌گیرد. این چگونگی، برای ۸ مد با فازهای دلخواه در شکل ۱ پ نشان داده شده است. این آشفتگی، در رد زمانی تپ‌های گسیلی لیزر نیز نمودار می‌شوند و فرآیند برهم‌کنش تپ‌ها با ماده را دچار همین آشفتگی‌ها می‌سازند.

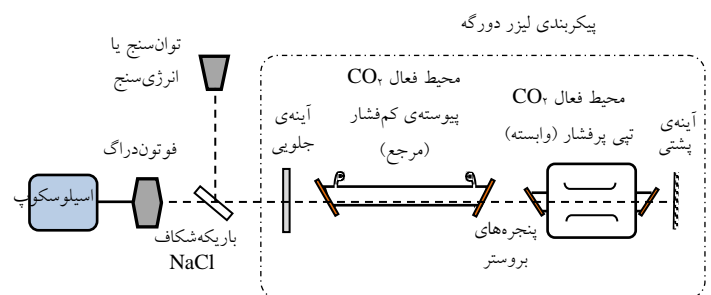
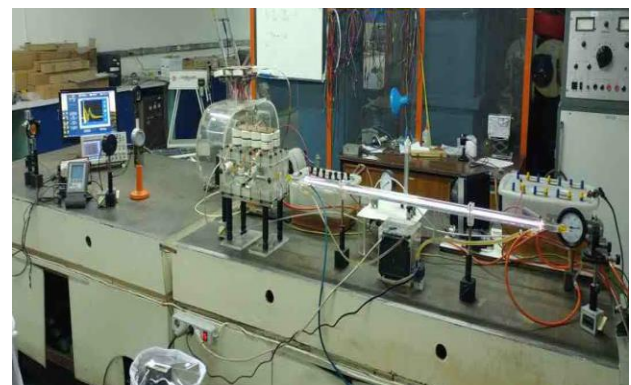


شکل ۱. تغییرات زمانی شدت در یک کاواک با یک مد (الف)، دو مد (ب) و هشت مد (پ) با فازهای کاتوره‌ای [۷].

1. Master
2. Slave

۳. روش آزمایش

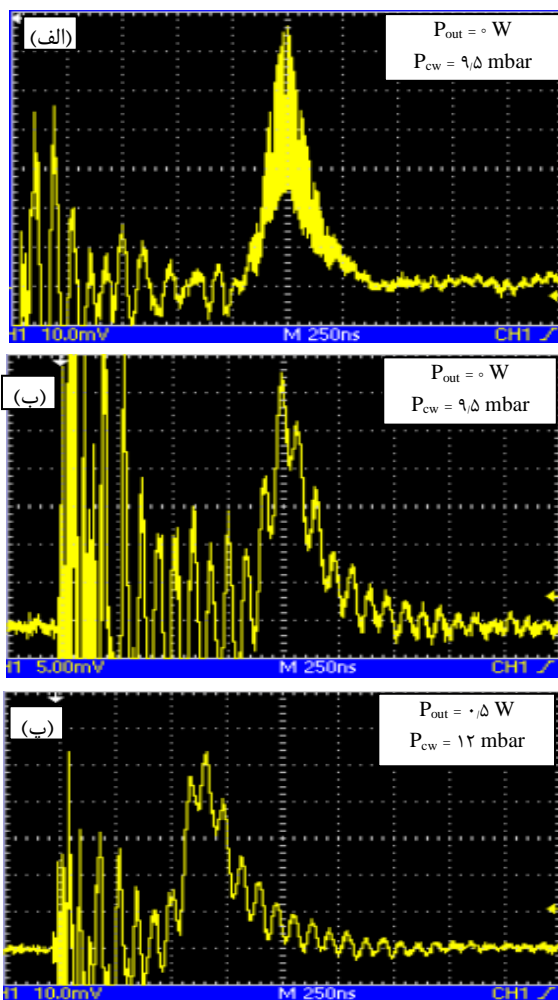
طرحواره‌ای از چیدمان به کار رفته به همراه تصویری از آن در شکل ۲ آورده شده است. برای محیط فعال پیوسته‌ی کم‌فشار، یک لوله‌ی تخلیه‌ی پیوسته به طول ۱ m و دو پنجره‌ی بروستر ZnSe به کار رفته، که به‌تنهایی توانی تا ۳۰ W با فشار پیرامون ۳۰ mbar از آمیزه‌ی گازی $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} \equiv 1:1:3$ را فراهم می‌سازد. برای محیط فعال پرفشار، از یک لیزر تپی دست‌ساز با فشار ۳ atm بهره گرفته شده، که با حجم تخلیه‌ی $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 140 \text{ cm}$ ، به‌تنهایی تپ‌هایی با انرژی بیشینه‌ی ۱۳۰ mJ را با آمیزه‌ی گازی $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} \equiv 1:1:8$ گسیل می‌نماید. تشدیدگر مشترک این سیستم ترکیبی، شامل یک آینه‌ی تمام بازتاب پشتی Cu تخت و یک آینه‌ی جلویی Ge تخت و بدون لایه‌نشانی با ۵۰٪ بازتاب است. در پیکربندی ترکیبی، بیشینه‌ی توان و انرژی گسیل شده‌ی لیزرهای پیوسته و تپی به‌صورت تنها، برابر ۱۲ W و ۵۰ mJ است. با تنظیم ولتاژ تخلیه و فشار گاز لیزر پیوسته می‌توان آن را از این بیشینه تا خاموشی کامل تغییر داد. توان پیوسته و انرژی تپ‌های گسیل‌شده از کل سیستم نیز به‌کمک باریکه‌شکاف، توان‌سنج، آشکارساز فوتون دراگ و یک اسیلوسکوپ دیجیتال ۲۰۰ MHz پایش می‌شوند.



شکل ۲. طرحواره‌ای چیدمان به کار رفته برای آزمایش و تصویری از آن.

۴. نتیجه‌ها و بحث

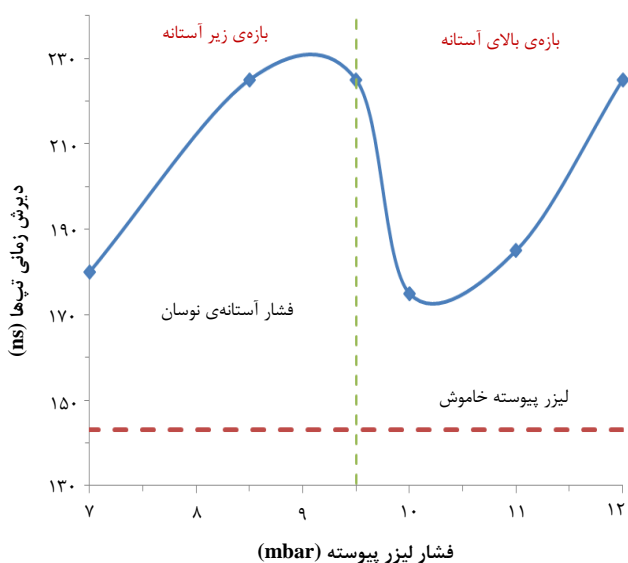
شکل ۳ تپ‌های گسیل‌شده را در حالت‌های گوناگون لیزر پیوسته خاموش، بالای آستانه و زیر آستانه نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، شکل تپ‌های لیزر به‌خودی خود (در حالت لیزر پیوسته خاموش) دارای نموداری بسیار دندان‌های و آشفته است، که نشان از نوسان کاملاً چندمدی آن دارد. با این همه، با روشن شدن لیزر پیوسته، چه در حالت بالای آستانه و چه در حالت زیر آستانه، این دندان‌ها به‌گونه‌ای چشمگیر از میان می‌روند. میخه‌های منظم و معدود تیزی که هنوز بر روی شکل تپ‌ها دیده می‌شوند، افت‌وخیزهای وابسته به نوفه‌های ناشی از تخلیه‌ی الکتریکی هستند، که با کوتاه شدن زمان برساخت^۱ تپ‌ها (بازه‌ی زمانی میان آغاز تخلیه‌ی الکتریکی و آغاز گسیل لیزری) بر روی تپ‌ها سوار شده‌اند.



شکل ۳. شکل تپ‌های لیزر ترکیبی در حالت: الف) لیزر پیوسته خاموش؛ ب) زیر آستانه؛ پ) بالای آستانه.

1. Build up time

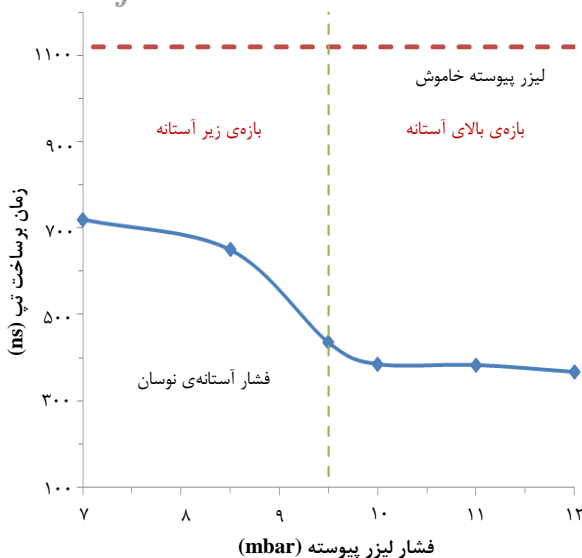
در حالت زیر آستانه، شرایط رسیدن به آستانه‌ی نوسان برای تپ‌ها در کل سیستم را آسان‌تر می‌سازد. از همین‌رو، فرایند گسیل لیزری زودتر و با وارونی انبوهی کم‌تری در محیط فعال تپی آغاز خواهد شد. روشن است که این پدیده، با سازوکاری که وارون فرایند Q- سوئیچ است، دیرش تپ‌های نوسانی را بیش‌تر خواهد نمود. هم‌چنین، با افزایش فشار، این بهره‌ی اضافی هم بیش‌تر و به‌دنبال آن، دیرش تپ‌های تک‌مد شده بیش‌تر می‌شود. با رسیدن به فشار آستانه‌ی نوسان پیوسته، ناگهان بهره‌ی محیط فعال پیوسته توسط گسیل لیزری آن تخلیه می‌شود و بهره‌ی اضافی چندانی برای استفاده‌ی مدهای نوسانی برجا نمی‌ماند. به‌جای آن، فرایند تک‌مد شدگی بیش‌تر به‌دلیل وجود شار فوتونی تک‌مد اولیه در محیط فعال تپی روی می‌دهد. از همین‌رو، اگر چه آغاز فرایند گسیل لیزری تا اندازه‌ای تحت تأثیر این پرتو پیوسته است، ولی ادامه‌ی آن بیش‌تر مانند حالت لیزر پیوسته‌ی خاموش است و دیرش زمانی تپ‌ها هم تا اندازه‌ای کم‌تر می‌شود. در فشارهای بالاتر، شار فوتونی اولیه بیش‌تر و در نتیجه، آغاز نوسان لیزری برای تپ‌ها زودتر روی می‌دهد. از این‌رو، باز هم هم‌چون یک فرایند وارون Q- سوئیچ، دیرش زمانی تپ‌ها بیش‌تر می‌شود.



شکل ۴. نمودار تغییرات دیرش زمانی تپ‌های تک‌مد شده در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته.

برای بررسی ویژگی‌های زمانی تپ‌های تک‌مد شده و وابستگی آن‌ها به وضعیت محیط فعال پیوسته، فشار محیط فعال پیوسته با ولتاژ تخلیه‌ی پایای ۱۲ kV در بازه‌ی ۷ mbar تا ۱۲ mbar تغییر داده شد. هم‌گام با این تغییرات، توان لیزر پیوسته از ۵۰۰ mW در فشار ۱۲ mbar به صفر در فشار ۹٫۵ mbar رسید. پس از آن، اگر چه لیزر دارای توان گسیلی نبود، بهره‌ی تقویت آن هم‌چنان تا فشار ۷ mbar برای تک‌مدسازی تپ‌ها کافی بوده است. این فشار، که فشار آستانه‌ی تک‌مد شدگی نامیده خواهد شد، کمینه فشاری از محیط فعال پیوسته است که برای آن، بهره‌ی محیط فعال پیوسته کم‌تر از اتلاف کل تشدیدگر ترکیبی است و برای همین، سیستم در زیر آستانه‌ی نوسان به‌سر می‌برد و دارای هیچ گسیل لیزری نیست. با این حال، چون عملکرد با مدهای کم‌تر طولی در شکل تپ‌های گسیلیده‌ی سیستم دیده می‌شود، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که بهره‌ی تقویت آن (که البته کم‌تر از اتلاف کل تشدیدگر است) هنوز هم برای پیش‌انداختن یک مد و حرکت به سمت کاهش مدهای طولی در تپ نوسانی کل سیستم، کافی است.

تغییرات دیرش زمانی تپ‌های تک‌مد شده در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته در شکل ۴ نشان داده شده است. پیش از هر چیز، دیده می‌شود که اندازه‌ی دیرش زمانی تپ‌ها، چه در حالت بالای آستانه و چه در حالت زیر آستانه، همواره بیش‌تر از اندازه‌ی طبیعی ۱۴۳ ns آن (لیزر پیوسته خاموش) است. از سوی دیگر، اندازه‌ی دیرش زمانی تپ‌ها پس از یک جهش به ۱۸۰ ns در فشار آستانه‌ی تک‌مد شدگی ۷ mbar، با فشار افزایش می‌یابد و در فشار پیرامون ۹٫۵ mbar (آستانه‌ی نوسان لیزر پیوسته) بر روی حدود ۲۲۵ ns پایدار می‌ماند. در فشارهای بالاتر، اندازه‌ی دیرش زمانی تا ۱۷۵ ns و نزدیک به اندازه‌ی مربوط به فشار آستانه‌ی تک‌مد شدگی افت می‌نماید و پس از آن، بار دیگر با افزایش فشار بیش‌تر می‌شود. می‌دانیم که وجود محیط بهره‌ی پیوسته و تقویت اضافی مربوط به آن

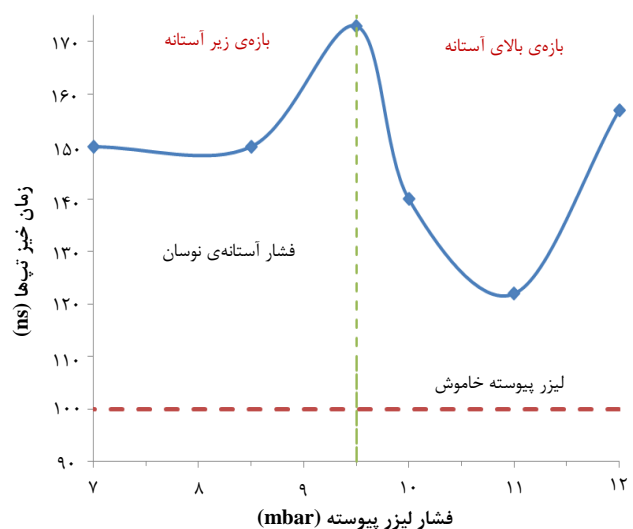


شکل ۶. نمودار تغییرات زمان برساخت تپ‌های تک‌مد شده در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته.

برای این لیزر در حالت عادی، نوسان پس از گذشت $1/12 \mu\text{s}$ از تخلیه‌ی الکتریکی شروع می‌شود. با روشن شدن لیزر پیوسته، حتی در فشار ۷ mbar و زیر آستانه‌ی نوسان، تابش‌های زمینه‌ی ناشی از گسیل خودبه‌خودی محیط فعال با گذر از محیط تخلیه‌ی لیزر پیوسته اندکی تقویت می‌شوند و همین تقویت اضافی می‌تواند آغاز نوسان لیزری در لیزر تپی را جلو اندازد و زمان برساخت آن را تا 720 ns کاهش دهد. روشن است که از این پس، هر چه فشار لیزر پیوسته بیشتر شود، بهره‌ی محیط فعال لیزر پیوسته نیز بیشتر می‌شود و از همین رو، زمان برساخت تپ‌ها در بازه‌ی فشاری زیر آستانه هم-چنان با افزایش فشار کاهش می‌یابد. در حالت بالای آستانه، پیش افتادن زمان آغاز نوسان لیزری به دلیل وجود شار فوتونی اولیه‌ی تک‌مد پیوسته است. از آن جا که آغاز نوسان لیزری نیازمند رسیدن وارونی انبوهی محیط فعال پرفشار به یک اندازه‌ی کمینه است، افزایش فشار و بیشتر شدن این شار فوتونی زمینه، تأثیر چندانی بر زمان برساخت تپ‌ها نخواهد داشت و از همین رو، آهنگ افت زمان برساخت تپ‌ها در این حالت کندتر می‌شود.

تغییرات زمان خیز تپ‌های تک‌مد شده در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته در شکل ۵ نمایش داده شده است. دیده می‌شود که، رفتار زمان خیز تپ‌ها در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته بسیار شبیه به رفتار دیرش زمانی آن‌ها است. اندازه‌ی زمان خیز تپ‌ها از اندازه‌ی اولیه‌ی 100 ns ناگهان به 150 ns در فشار آستانه‌ی تک‌مد شدگی می‌رسد و پس از آن، با رسیدن به بیشینه‌ی 173 ns در فشار آستانه‌ی نوسان، روندی کاهشی می‌یابد. سپس، با گذر از کمینه‌ی 122 ns در فشار 11 mbar رو به افزایش می‌گذارد.

با توجه به همبستگی دیرش زمانی و زمان خیز تپ‌ها، این بیشینگی در زمان خیز و همخوانی آن با بیشینگی دیرش زمانی قابل درک خواهد بود؛ چرا که همان فرایندهای گفته شده‌ای که دیرش زمانی تپ‌ها را در این فشار بیشینه می‌کنند، می‌توانند زمان خیز آن‌ها را نیز بیشینه نمایند. تغییرات زمان برساخت تپ‌های تک‌مد شده در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته در شکل ۶ نموده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که زمان برساخت تپ‌های تک‌مد شده همواره کم‌تر از اندازه‌ی طبیعی آن (لیزر پیوسته خاموش) است و در هر دو حالت بالا و زیر آستانه با افزایش فشار کاهش می‌یابد، اگر چه آهنگ افت آن در حالت بالای آستانه اندکی کندتر است. هنگامی که لیزر پیوسته خاموش است، فرایند نوسان لیزری تا رسیدن شدت تابش‌های ناشی از گسیل خودبه‌خودی در محیط فعال پرفشار به یک آستانه‌ی مشخص به تعویق می‌افتد.



شکل ۵. نمودار تغییرات زمان خیز تپ‌های تک‌مد شده در فشارهای گوناگون لیزر پیوسته.

18. A. Nurmikko, T. A. DeTemple, S. E. Schwarz, *Applied Physics Letters* **18**, 130-132 (1971).
19. T. A. DeTemple, A. Nurmikko, *Optical Communication* **4**, 231-233 (1971).
20. N. Lee, R. L. Aggarwal, *Applied Optics* **16**, 2620-2621 (1977).
21. J. Knitel, D. P. Scherrer, F. K. Kneubuhl, *Optical Engineering* **3**, 2000-2016 (1995).
22. I. N. Knyazev, A. A. Sarkisian, *Optical Communication* **52**, 421-424 (1985).
23. C. A. Emshary, *Acta Physica Hungarica* **63**, 213-218 (1988).
24. D. V. Willetts, M. R. Harris, *Journal of Physics D* **15**, 51-67 (1982).
25. J.L. Lachambre, P. Lavigne, G. Otis, M. Verreault, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **14**, 170-177 (1978).
26. S. Kazemi, *Single Longitudinal Operation of Pulsed CO₂ Laser with Hybrid Method*, M.S Thesis, Iran University of Science and Technology, Physics Department, (2017).
27. C. Rulliere, *Femtosecond Laser pulses, Principles and Experiments*, 2th Ed., Springer-Verlag, (2005).

۵. نتیجه گیری

با بهره گیری از پیکربندی ترکیبی، برای نخستین بار یک لیزر CO₂ تپی با فشار ۳ atm تکمد طولی شد. نشان داده شد که دیرش زمانی و زمان خیز تپهای تکمد گسیلی در هر دو حالت بالا و زیر آستانه با فشار افزایش می یابند و تنها در نزدیکی فشار آستانه‌ی نوسان پیوسته یک کمینه را پشتسر می گذارند. زمان برساخت تپهای تکمد شده نیز، با افزایش فشار لیزر پیوسته، چه در حالت بالای آستانه و چه در حالت زیر آستانه، کاهش می یابد؛ اگر چه پس از فشار آستانه‌ی نوسان لیزر پیوسته، از آهنگ افت آن کاسته می شود. فشار آستانه‌ی لیزر پیوسته برای تکمد شدگی، برابر ۷ mbar به دست آمد.

مراجع

1. O. Svelto, *Principles of Lasers*, 5th Ed., Springer-Verlag, (2010).
2. M. Endo, *Gas Lasers*, Taylor and Francis Group, USA, (2007).
3. J. Badziak, R. Jarocki, *Optics and Laser Technology* **23**, 45-49 (1991).
4. J. Knitel, D. P. Scherrer, F. K. Kneubuhl, *Infrared Physics Technology* **35**, 67-71 (1994).
5. S. Marchetti, R. Simili, *Optics and Laser Technology* **35**, 583-586 (2003).
6. D.J. Biswas, R. G. Harrison, *Journal of Physics E* **18**, 256-257 (1985).
7. F. Bonanni, S. Ciferri, G. Salvetti, *Optical and Quantum Electronics* **14**, 237-243 (1982).
8. N.R. Heckenberg, J. Meyer, *Optical Communication* **16**, 54-56 (1976).
9. S. Tochitsky, F. Fuza, C. Joshi, *AIP Conf. Proc.* **1777**, 020005-1-020005-10, (2014).
10. S.L. Chin, *Optics & Laser Technology* **12**, 85-88 (1980).
11. D.J. Biswas, A. K. Nath, U. Nundy, U. K. Chatterjee, *Progress in Quantum Electronics* **14**, 1-61 (1990).
12. W. Demtroder, *Laser Spectroscopy*, 4th Ed., Vol. 1, Springer-Verlag, (2008).
13. A.K. Kar, D.M. Tratt, R. G. Harrison, *Optical Communication* **43**, 274-276 (1982).
14. J.R. Izatt, C. J. Budhiraja, P. Mathieu, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **13**, 396-398 (1977).
15. J.L. Lachambre, P. Lavigne, G. Otis, M. Noel, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **12**, 756-764 (1976).
16. K. Silakhori, F. Soltanmoradi, A. Behjat, M. Montazerolghaem, S. M. R. Sadr, *Nuclear Science and Technology* **32**, 9-14 (2005).
17. M. Ouhayoun, C.J. Bordé, *Metrologia* **13**, 149-150 (1977).

