

شکل دهی تپ‌های لیزرهای گاز کربنیک با بهره‌گیری از خودفروشکست اپتیکی در هوا

صالحه بهشتی پور^{۱*}، ابراهیم صفری^۱، عباس مجدآبادی^۲، فاطمه رازقی^۲، مریم ایلچی^۲،
زهرا پورحسن‌نژاد^۲، داود احدپور^۲

چکیده:

در این پژوهش، برای حذف دنباله و کوتاه‌سازی تپ‌های لیزرهای CO₂، از یک برشگر پلاسمایی با ساختار تلسکوپی کپلری بهره گرفته شده است. این برشگر پلاسمایی دربرگیرنده دو عدسی همسان ZnSe با فاصله کانونی‌های ۱۰ cm است. لیزر بکار رفته در این سامانه، لیزر گاز کربنیک تپی فشار اتمسفری کوک‌پذیر است که روی خط (۳۰)R₉ با طول موج ۹,۲۱۹ μm تنظیم شده است. خروجی این لیزر شامل یک میخه تیز با FWHM پیرامون ۹۰ ns به همراه دنباله‌ای به طول ۱ μm می‌باشد. با کانونی‌سازی این تپ‌ها در مرکز تلسکوپ، به دلیل خودفروشکست اپتیکی در هوا، پلاسمایی ایجاد می‌شود. زمانی که پلاسما به چگالی الکترونی بحرانی می‌رسد، بخشی از میخه تپ به همراه دنباله آن در پلاسما جذب می‌شوند. با این روش، نه تنها دنباله‌ی وابسته به نیتروژن در تپ‌های لیزری کاملاً حذف شد، که دیرش زمانی میخه آن‌ها نیز از ۹۰ ns تا نزدیک به ۳۰ ns کاهش یافت. نشان داده شد که ویژگی‌های تپ‌های برش یافته تقریباً مستقل از انرژی تپ‌های فرودی است.

کلمات کلیدی: لیزرهای گاز کربنیک فشار اتمسفری، برشگر پلاسمایی، خودفروشکست اپتیکی.

۱. مقدمه

معمولی، تپ‌های گسیلی این لیزرها دربرگیرنده یک میخه یا لبه تیز و پیشرو با دیرش زمانی ۸۰-۱۲۰ ns و نیز یک دنباله به درازای ۲-۵ μs است. این لبه تیز پیشرو، نتیجه نوسان لیزری در زمان بیشینه بودن وارونی انبوهی و بهره در محیط فعال است و با افت بهره به دنبال گسیل القایی، پایان می‌یابد. دنباله دراز چند μs در شکل تپ این لیزرها، ریشه در دمش دوباره مولکول‌های CO₂ در تراز پایه در پی برخورد با

امروزه لیزرهای تپی گاز کربنیک فشار اتمسفری از کاربردهای گسترده‌ای در پژوهش‌های گوناگونی همچون لیزر-پلاسما، بیناب‌نمایی، جداسازی ایزوتوپی، لیدار و مانند آن‌ها برخوردارند [۱-۲]. در شرایط کاری

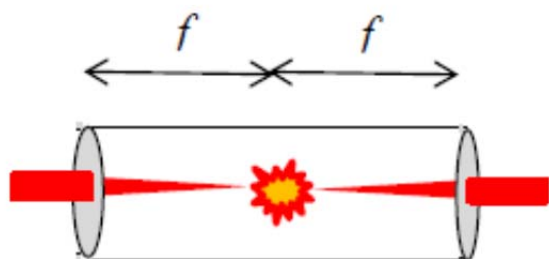
(۱) دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز،

beheshtipour@tabrizu.ac.ir

(۲) پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

درون کاواک نوسان لیزر و گاه در بیرون از آن و بر سر راه تپ‌های گسیلی لیزر کار گذاشته می‌شود، به گونه‌ای که پرتوهای لیزری پس کانونی شدن و باز شدن دوباره در این تلسکوپ، با همان اندازه لکه و در همان راستای قبلی انتشار یابند.

درون این اتاقک از گازهای شغافی که دارای بیناب جذبی در بازه گسیلی لیزرهای گاز کربنیک ($9-11 \mu\text{m}$) نباشند، مانند N_2 ، He یا هوا پر می‌شود. هنگامی که تپ‌های لیزری از درون این اتاقک می‌گذرند، به دلیل نبود فرآیندهای جذب خطی در گاز، پس از کانونی شدن و باز شدن، دوباره به همان شکل قبلی و بی‌هیچ تغییری از آن بیرون خواهند آمد.



شکل ۱: طرح کلی از ساختار و سازوکار تلسکوپ به کار رفته در برشگرهای پلاسمایی.

حال اگر، به هر دلیلی، پلاسمایی در نقطه کانونی این تلسکوپ پدید آید، رشد این پلاسمای به شدت جاذب و پراکننده، می‌تواند از دامنه‌ی تپ به گونه‌ای چشمگیر بکاهد و سرانجام آن را کاملاً قطع نماید. برای شلیک اتاقک پلاسمایی و تولید پلاسمای در کانون آن، سه روش جداگانه گسترش داده شده‌اند:

۱) شلیک سراسر: شدت باریکه لیزری کانونی شده در اتاقک، به اندازه‌ای بالا برده می‌شود، که خود می‌تواند بر پایه فرآیندهای جذب غیرخطی در شدت‌های بالا، پدیده فروشکست القایی را در کانون به راه بیندازد [۹]. شکل ۲ سازوکار این فرآیند را نشان می‌دهد. این روش، اگر چه از دیدگاه چیدمان‌های لازم و روند

مولکول‌های N_2 است که در ترازهای برانگیخته ارتعاشی خود به سر می‌برند. تشدید فرمی در میان ترازهای ارتعاشی این دو مولکول، دمش موثری را برای مولکول‌های CO_2 فراهم می‌نماید که می‌تواند به برپایی دوباره وارونی انبوهی و گسیل لیزری دراز مدتی مانند آنچه در دنباله این تپ‌ها دیده می‌شود، بیانجامد. [۳]. این دنباله، اگر چه دارای دامنه بسیار کوچکتري از میخه تپ است، به دلیل برخورداری از طول زیاد خود، چیزی پیرامون $60\% - 40\%$ انرژی تپ‌های گسیلی را در خود جای می‌دهد. روشن است که وجود این دنباله در بسیاری از کاربردها با دردهایی همراه است [۲، ۴-۵] چرا که، نه تنها تعریف درستی از دیرش زمانی تپ را با دشواری همراه می‌سازد، که شرایط برهمکنش تپ با ماده را در زمان میخه و یا دنباله تغییر می‌دهد. از همین رو، شیوه‌های گوناگونی برای از میان برداشتن آن پیشنهاد شده‌اند. یکی از ساده‌ترین این روش‌ها، کاستن از نسبت گاز N_2 در آمیزه‌ی گازی لیزر است، که ناخواسته، کاهش چشمگیر انرژی گسیلی لیزر و همچنین برهم خوردن نمایه باریکه آن را به دنبال خواهد داشت [۵]. از این رو، بهتر است به دنبال روش‌هایی برای بریدن این دنباله پس از گسیل آن بود. از برترین راهکارهای شناخته شده در این زمینه، بهره‌گیری از سامانه برشگرهای پلاسمایی است [۸-۶] که امروزه افزون بر حذف دنباله تپ‌ها، کاربردهای گوناگونی همچون تولید تپ‌های کوتاه و فرا کوتاه نیز یافته‌اند [۹].

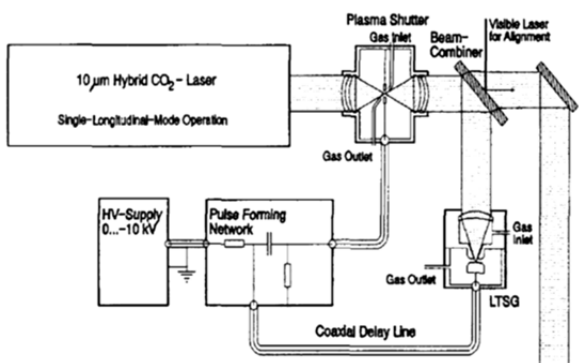
۲. مبانی نظری

ساختار برشگرهای پلاسمایی، همان گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، دربرگیرنده یک اتاقک گازی است که با یک تلسکوپ کپلری با بزرگنمایی برابر یک پوشش داده شده، به گونه‌ای که نقطه انطباق کانون‌های دو عدسی درست در مرکز اتاقک باشد. این اتاقک، گاه

این روش، که پیچیده‌تر از روش شلیک سراسر است، دارای امتیاز کنترل زمان‌بندی از راه ایجاد اختلاف راه نوری میان دو پرتو کانونی شونده است. با این همه، در این روش بخشی از انرژی تپ‌های گسیلی لیزر برای فراهم‌سازی باریکه کمکی از دست می‌رود.

شلیک با تخلیه الکتریکی: در این روش، از یک تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا، تیز و زمان‌بندی شده در میان الکترودهای کار گذاشته شده در کانون تلسکوپ و عمود بر راستای انتشار پرتو لیزری، برای ایجاد پلاسمای جاذب بهره گرفته می‌شود [۱۰]. برای بهتر کردن اعمال کنترل بر روی زمان‌بندی میان تخلیه الکتریکی و زمان گذر تپ لیزری، از مدارهای الکترونیکی پیچیده فرمان‌پذیر و یا شلیک لیزری برای فرآیند آتش شدن کلید تخلیه الکتریکی سود جسته می‌شود. شکل ۴ یک چیدمان نمونه‌ای از این دست را نشان می‌دهد.

اکنون، یک تپ لیزری، درون یک گاز تراگسیلنده در نظر گرفته می‌شود که فروشکست گازی به‌شيوه‌ای بر سر راه آن آغاز شده است. می‌دانیم که بسامد پلاسمای تولید شده، ω_p ، برابر است با:

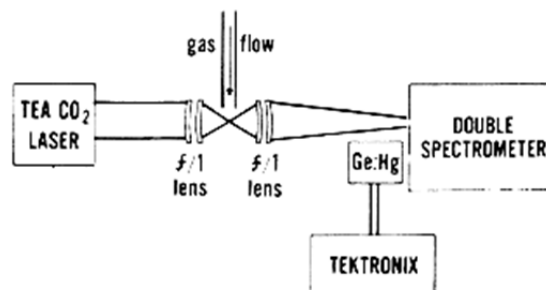


شکل ۴: نمونه‌ای از چیدمان به‌کار رفته برای شلیک با تخلیه الکتریکی در برشگرهای پلاسمایی [۱۰].

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi N_e e^2}{m_e} \quad (1)$$

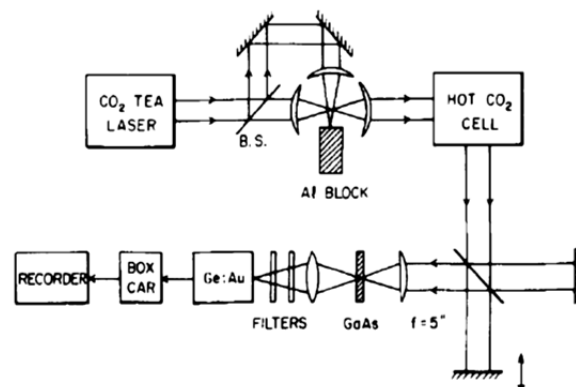
که در آن، N_e و m_e به ترتیب چگالی الکترونی و جرم الکترون هستند.

فنی انجام بسیار ساده‌تر از دیگر روش‌ها است، دارای کنترل چندانی بر روی زمان برش نیست و از همین رو، از تکرارپذیری کمتری برخوردار است.

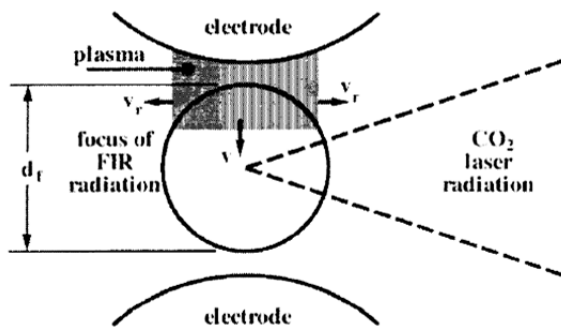


شکل ۲: یک چیدمان نمونه‌ای و ساده برای شلیک سراسر در برشگرهای پلاسمایی [۹].

شلیک با باریکه کمکی: یک هدف جامد مانند قطعه‌ای از فلز یا گرافیت، درست در زیر نقطه‌ی کانونی اتاقک، کار گذاشته می‌شود. هم‌زمان بخش کوچکی از باریکه لیزری به کمک یک باریکه‌شکاف از آن، جدا می‌شود و پس از یک درنگ زمانی مناسب به کمک یک عدسی بر روی آن قطعه، کانونی می‌شود. اگر این فرآیند کانونی‌سازی به آن اندازه موثر باشد که بتواند یک توده یا ابر پلاسمایی هرچند کوچک در ناحیه کانونی پدید آورد، آن‌گاه، این توده پلاسمایی خواهد توانست با رشد بیشتر خود فرآیند برش گفته شده را پیش ببرد [۱۰]. چگونگی این فرآیند در شکل ۳ دیده می‌شود.



شکل ۳: یک چیدمان نمونه‌ای از شلیک با باریکه کمکی در برشگرهای پلاسمایی [۱۱].



شکل ۵: سازوکار گسترش توده پلاسمایی در برشگرهای پلاسمایی با شلیک تخلیه الکتریکی [۱۲].

بدین سان، گسترش بسیار تند پلاسما، هم‌ارز با برش تیز پرتو لیزری تراگسلی خواهد بود. اگر زمان بندی این فرآیند، به گونه‌ای باشد که پیدایش توده پلاسمایی پس از گذر میخه تپ و درست پیش از رسیدن دنباله تپ لیزری باشد، این دنباله در پی جذب شدید در توده پلاسمایی از ساختار تپ حذف خواهد شد. با این همه، در روش شلیک سراسر، که امکان زمان بندی چندانی وجود ندارد، فرآیند ایجاد و رشد توده پلاسمایی در زمان میخه لیزر روی می‌دهد و همراه با حذف دنباله، بخشی از میخه تپ را نیز برش خواهد خورد. بدین سان، اگر چه یک تپ تیز لیزری به دست می‌آید که دارای دیرشی کمتر از میخه اولیه تپ فرودی است و دارای دنباله‌ای نیز نیست، انرژی میخه تپ نیز تا اندازه بسیاری افت خواهد نمود.

۳. آزمایش

چیدمان آزمایشگاهی سامانه برشگر پلاسمایی به کار رفته در شکل ۶ نشان داده شده است.

این سامانه، دربرگیرنده یک لیزر گاز کربنیک تپی فشار اتمسفری کوک‌پذیر Lumonics, model 103-2 است که روی خط $9R(30)$ با طول موج $9,219 \mu\text{m}$ تنظیم شده است.

گنجایش یونیزه شده، به دنبال جذب هر چه بیشتر انرژی تپ لیزری و یونیزاسیون‌های ثانویه، به تندی گرم می‌شود و همچون یک پلاسمای کروی می‌ترکد. این پلاسما، یک موج جذب پدید می‌آورد که در راستای عمود بر پیشروی تپ لیزری، پیش می‌تازد.

تندی پیشروی این موج جذب بستگی به شدت لیزر و سازوکار گسترش پلاسما در آن گاز دارد و گاه می‌تواند به $2 \times 10^6 \text{ m/s}$ برسد. بدین سان، تپ لیزری راهی را خواهد پیمود که چگالی الکترونی $N_e(x,t)$ و ضریب شکست $n(x,t)$ آن به گونه‌ای وابسته به زمان و مکان دگرگون می‌شوند:

$$n(x,t) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{N_e(x,t)}{N_c}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

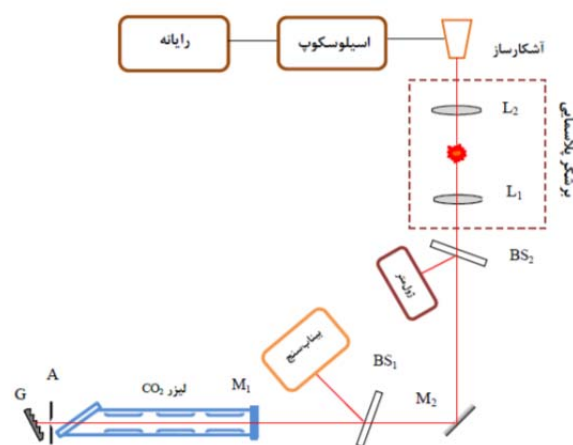
در این رابطه، N_c چگالی بحرانی پلاسمای پدید آمده و برابر است با:

$$N_c = \frac{m_e \omega_0^2}{4\pi e^2} \quad (3)$$

هنگامی که بسامد پلاسما به بسامد لیزری نزدیک می‌شود (یا چگالی الکترونی پلاسما به چگالی بحرانی می‌گراید) ضریب شکست پلاسما به صفر نزدیک می‌شود و سرانجام با پیشی گرفتن بسامد پلاسما از بسامد لیزری (بزرگ تر شدن چگالی پلاسما از چگالی بحرانی) ضریب شکست عددی مختلط می‌شود که بخش موهومی آن نماینده‌ی جذب بسیار بالای پرتو لیزری است [۹]. شکل ۵ سازوکار رشد پلاسما را در شرایط شلیک با تخلیه الکتریکی نشان می‌دهد.

فوتون دراگ، ORIE,7415 می‌رسند و رد زمانی آن‌ها در یک اسیلوسکوپ دیجیتالی با پهنای باند ۲۵۰ MHz نمایش داده می‌شود. با دریافت این شکل‌ها در رایانه، پردازش داده‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر امکان‌پذیر گردیده است. با تغییر قطر دریچه A، انرژی لیزر در بازه ۲۰۰-۵۰۰ mJ تغییر داده شد و در حالتی که خودفروشکست در کانون برشگر رخ می‌داد، شکل تپ‌ها ثبت شده‌اند.

تلسکوپ برشگر پلاسمایی نیز، دربرگیرنده دو عدسی همسان ZnSe با قطر دهانه ۵ cm و فاصله کانونی‌های ۱۰ cm با لایه‌نشانی پادبازتاب است.



شکل ۶: چیدمان آزمایشگاهی برشگر پلاسمایی به کاررفته.

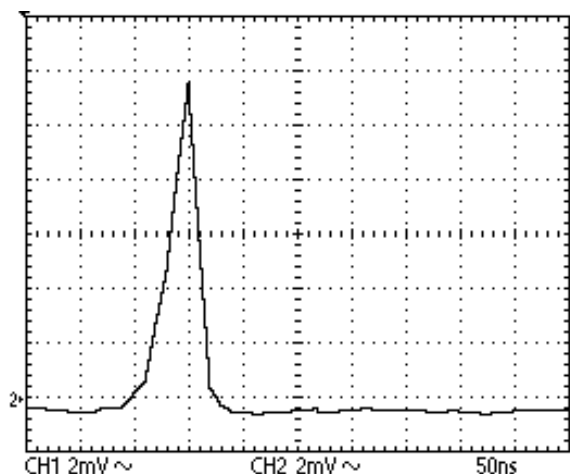
کاواک این لیزر، دربرگیرنده یک توری پراش تخت شیاری 100 mm^{-1} با زاویه افروخته 32° و آینه‌ی جلوی ژرمانیومی تخت M_1 با تراگسیل ۵۰٪ است. برای بهبود کیفیت باریکه خروجی لیزر در فرآیند کانونی‌سازی و حذف مدهای عرضی مرتبه بالاتر و همچنین تغییر قطر باریکه و به دنبال آن، تغییر انرژی لیزر، از روزنه A، جاگذاری شده بین توری G و پنجره بروستر لیزر استفاده شده است. تپ‌های گسیلی این لیزر در مد TEM_{00} ، دارای انرژی ۵۰۰ mJ و دربرگیرنده یک لبه پیشرو با دیرش زمانی پیرامون ns ۹۰ و یک دنباله به درازای ۱-۲ μs است. نسبت مولفه‌های گازی در آمیزه‌ی گازی این لیزر $1:0.4:4 \text{ CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ است، که به کمک شارسنج‌های مناسب تنظیم می‌گردد. برای بررسی خط گسیلی لیزر، بخشی از تپ‌های گسیلی لیزر به کمک باریکه‌شکاف BS_1 از جنس NaCl با بازتابندگی ۸٪ به یک بیناب‌سنج لیزری 16-A- Opt. Eng. Inc. فرستاده می‌شوند. این بیناب‌سنج، می‌تواند هر یک از خط‌های گسیلی لیزر را بر روی یک مقیاس مدرج نمایش دهد. انرژی خروجی لیزر نیز به کمک باریکه‌شکاف BS_2 از جنس NaCl با بازتابندگی ۸٪ و ژول‌سنج Coherent, LM-P10 اندازه‌گیری می‌شود. تپ‌های تراگسیلیده از برشگر پلاسمایی به یک آشکارساز

۴. نتایج آزمایش

نمونه‌ای از شکل تپ‌های لیزر در شکل ۷ نشان داده شده که در آن، میخه تیز پیشرو و دنباله درازتر آن به‌خوبی دیده می‌شوند. همان‌گونه که دیده می‌شود، این تپ لیزری دربرگیرنده یک میخه تیز پیشرو با دیرش زمانی پیرامون ns ۹۰ و یک دنباله درازتر پیرامون $1 \mu\text{s}$ است.

اگر چه این اندازه‌ها در بیشتر لیزرهایی از این دست بسیار بیشتر هستند، به‌دلیل ناپایداری تخلیه در این لیزر، ناگزیر نسبت گاز N_2 تا ۰٫۴ در آن کاهش داده شده و از همین رو، نه تنها از دیرش زمانی میخه تپ کاسته شده، که درازای دنباله تپ نیز به پیرامون $1 \mu\text{s}$ رسیده است. دندانه‌های تیز دیده شده در شکل تپ‌ها نیز، مربوط به پدیده زنش مدی وابسته به مدهای طولی هستند.

است و دیرش تپ برجا مانده به ۳۰ ns رسیده است.



شکل ۹: رفتار زمانی دقیق تپ‌های برش یافته.

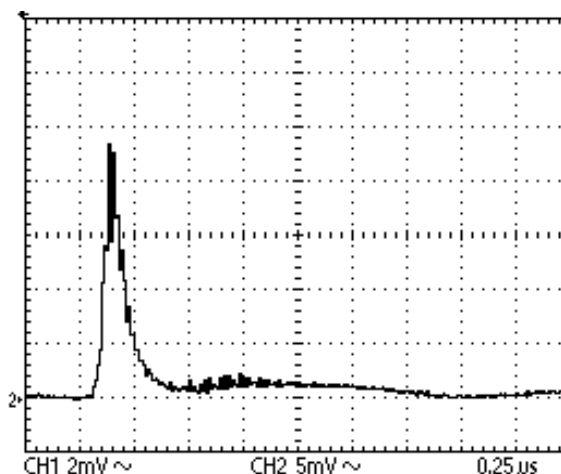
یافته‌های به دست آمده برای انرژی‌های فرودی گوناگون در جدول ۱ گردآورده شده‌اند.

جدول ۱: تغییرات انرژی فرودی لیزر با پهنای تپ برش خورده.

انرژی تپ فرودی (mJ)	زمان خیز تپ برش یافته (ns)	زمان افت تپ برش یافته (ns)	دیرش زمانی تپ برش یافته (ns)
۲۰۰	۳۳	۱۵	۲۷
۳۰۰	۳۶	۱۴	۳۰
۴۰۰	۲۴	۱۴	۳۸
۵۰۰	۳۳	۱۵	۳۰

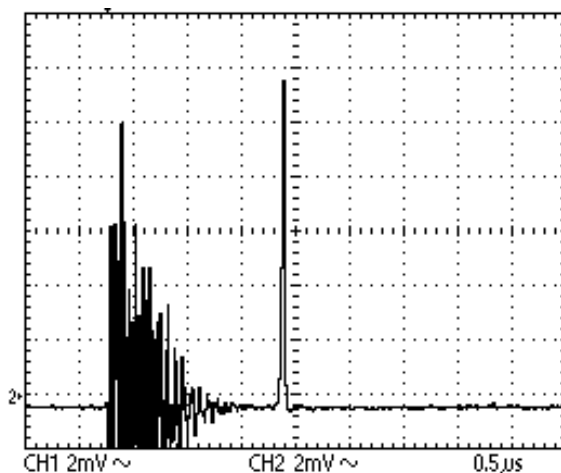
۵. نتیجه گیری

یک سامانه برشگر پلاسمایی برای حذف دنباله نیتروژن در لیزرهای گاز کربنیک تپی فشار اتمسفری طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این روش، دنباله نیتروژن در تپ لیزر گاز کربنیک تپی فشار اتمسفری حذف شد و دیرش زمانی تپ‌های این لیزر از ۹۰ ns به نزدیکی ۳۰ ns کاهش داده شد. نشان داده شد



شکل ۷: رد زمانی تپ‌های گسیلی لیزر گاز کربنیک به کاررفته.

شکل ۸ نیز، نمونه‌ای از تپ‌های برش یافته را نمایش می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود دنباله نیتروژن در این تپ‌های لیزری کاملاً حذف شده است.



شکل ۸: نمونه‌ای از شکل تپ‌های برش یافته.

شکل ۹ نمایش بهتری از این تپ برش یافته را در مقیاس کوچک تر نشان می‌دهد.

همان گونه که به خوبی دیده می‌شود، لبه دوم یا لبه برش یافته تپ، دارای زمان افت بسیار کمتری از لبه نخست یا لبه برش نیافته تپ لیزری است. همچنین، دیرش زمانی تپ نیز نزدیک به یک سوم کاهش یافته

سپاسگزاری

نویسندگان، از کمک‌های فنی آقای قاسم عزیزآبادی فراهانی از پژوهشکده لیزر و اپتیک پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران سپاسگزاری می‌نمایند.

که ویژگی‌های تپ‌های برش یافته تقریباً مستقل از انرژی تپ‌های فرودی است.

مراجع

- [1] R.R. A Ifano and L. Rothberg, photonics: "Nonlinear Optics and Ultrafast Phenomena", Nova Science, New York, 1991.
- [2] Gasmi, T., et al., "Plasma-based nitrogen tail pulse shutter for CO₂-TEA lidar dial systems". Applied Physics B. 71(2), 2000, pp. 169-175..
- [3] Duley, W., "CO₂ lasers effects and applications". Elsevier.2012.
- [4] Huang, et al. "Application of plasma shutter in second harmonic generation of AgGaSe₂ crystal". Chinese Optics Letters.1, No.12, 2003, pp. 714-715,.
- [5] Bellecci, C., et al., "Clipping the tail of a TE-CO₂ laser pulse using a gas breakdown technique for high resolution chemical plume detection". Review of Scientific Instruments. 74.No 2, 2003, pp. 1064-1069.
- [6] Hurst, N. and S. Harilal, "Pulse shaping of transversely excited atmospheric CO₂ laser using a simple plasma shutter". Review of Scientific Instruments. 80(3), 2009, pp. 035101..
- [7] Qu, Y., et al. "Plasma shutter for TEA-CO₂ laser". in Lasers and Electro-Optics, 2003. CLEO/Pacific Rim 2003. The 5th Pacific Rim Conference on. IEEE.2003.
- [8] Qu, Y., et al. " Plasma shutter for pulse shaping of TEA CO₂ laser". in Photonics Asia 2002. International Society for Optics and Photonics.2002.
- [9] Yablonovitch, E., "Self-phase modulation of light in a laser-breakdown plasma". Physical Review Letters. 32(20), pp. 1101.1974.
- [10] Kalin, A., ET AL. "Optical Free Induction Decay (OFID) 10 μm CO₂ Laser Systems".Infrared Phys.33, No2, 1992, pp.73-112.
- [11] H. S. Kwok and E. Yablonovitch "30psec CO₂ laser pulses generated by optical free induction decay" Applied Physics Letters 30, 1977, pp.158.
- [12] Knittel, J., D. Scherrer, and F. Kneubühl, "A Plasma-shutter for far-infrared laser radiation." IEEE. 32(12): 1996, pp. 2058-2063.

