



اثر گازهای پیرامونی بر تابش پلاسما و گسترش آن در برهم کنش لیزر با مس

مسعود پیشدست*^۱، عبدالله اسلامی مجدد^۱، مسعود کاوش تهرانی^۲

۱. گروه الکترونیک، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، صندوق پستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵، تهران - ایران
۲. پژوهشکده علوم و فن آوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، صندوق پستی: ۱۵/۸۳۱۴۵، اصفهان - ایران

چکیده: در این پژوهش اثر گازهای پیرامونی هوا، آرگون، هلیوم و نئون در فشارهای مختلف بر تابش و گسترش پلاسما حاصل از برهم کنش باریکه‌ی لیزر با هدف فلزی، با تأکید بر بهینه‌سازی نسبت سیگنال به تابش پیوستار به روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری و جذب و پراکندگی پرتو کاوش بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که تابش‌ها و گسترش پلاسما به نحو قابل توجهی به نوع و فشار گاز پیرامون وابسته است. بیش‌ترین شدت خطوط نشری اتم مس به ترتیب برای گازهای آرگون، نئون، هوا و هلیوم به دست آمده است. برای تمام گازها با افزایش فشار گاز پیرامون از ۵ تا ۱۰۰ mbar، شدت تابش طیفی پلاسما افزایش می‌یابد و سپس با بیش‌تر شدن فشار تا یک اتمسفر اشباع می‌شود. تابش پیوستار پلاسما نیز با افزایش فشار، روندی افزایشی دارد و به ترتیب برای گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیوم بیش‌ترین مقدار را دارد. نسبت تابش طیفی به پیوستار زمینه به ترتیب برای گازهای هلیوم، نئون، هوا و آرگون بیشینه است و برای تمام گازها با افزایش فشار کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از گسترش پلاسما به روش جذب و پراکندگی پرتو کاوش با نظریه سدف-تیلور مقایسه شد. سرعت گسترش پلاسما در نزدیکی سطح هدف در حضور گاز هلیوم در فشار ۷۵۰ mbar برابر با ۲۵۲۰۰ m/s و در حضور گازهای نئون، هوا و آرگون به ترتیب ۱۵۶۲۵، ۱۳۹۰۰ و ۱۱۸۶۰ m/s به دست آمد که با دور شدن از سطح به شدت آفت کرده و در فاصله ۶ mm از سطح برای گازهای هلیوم، نئون، هوا و آرگون به ترتیب به ۲۵۵۰، ۱۰۰۰، ۷۰۰ و ۶۹۰ m/s می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: پلاسما لیزری، گاز پیرامونی، جذب و پراکندگی پرتو کاوش، بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری

Impact of Ambient Gases on the Plasma Radiation and its Expansion in Laser-Copper Interaction

M. Pishdast*¹, A. Eslami Majd¹, M. Kavosh Tehrani²

1. Electrical Engineering & Electronic Department, Malek Ashtar University of Technology, P.O.Box: 15875-1774, Tehran – Iran
2. Institute of Optics and Laser, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Sharhr, P.O.Box: 15/83145, Isfahan – Iran

Abstract: In this paper, the impacts of air, argon, helium and neon ambient gases under different gas pressures on radiations, emphasizing in the signal to radiation background and the expansion of laser induced plasma from laser metal interaction have been experimentally studied using spectroscopy, probe beam absorption, and scattering methods. The results show that the plasma radiations and its expansion behavior depend strongly on the ambient gas pressure. The highest intensity of the copper spectral lines occurred in argon, neon, air, and helium, respectively. For all gases, by increasing the gas pressure from 5 to 100 mbar the plasma spectral radiation increases and then it saturates at the higher gas pressure. The continuum radiation also increases with the pressure and has the highest value for Ar, air, Ne and He gases, respectively. Plasma in He, Ne, air and Ar has the best signal to background (S/B) ratio, respectively, and decreases with the pressure. The probe beam absorption and scattering results have also been compared with the Sedov-Taylor strong shock wave model. The maximum speed of the plasma plume expansion, occurred near the target surface under 750 mbar gas pressure, and was determined for helium to be about 25200 m/s, and through neon, air and argon gases, amounted to about 15625, 13900 and 11860 m/s, respectively, as they reduced significantly when they were far from the target surface and reached 2550, 1000, 700 and 690 m/s at 6 mm from the target for helium, neon, air and argon, respectively.

Keywords: Laser produced plasma, Ambient gas, Probe beam absorption and scattering, LIBS

*email: pishdast@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۴/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۲/۱۳



۱. مقدمه

۱۹۹۹ میلادی توسط آگویلا گزارش شده است [۲۷]. در سال ۲۰۰۶ نیز هاریلال اثرات گاز پیرامونی را بر دینامیک پلاسما قلع حاصل از برهم‌کنش با لیزر گزارش نمود [۲۸]. در سال ۲۰۱۰ اثر شرایط پیرامونی بر گسترش و تابش پلاسما آلومینیم بررسی شد [۲۹]. شازیا و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی اثر فشار در محدوده‌ی ۵۰ تا ۷۶۰ Torr و نوع گاز پیرامونی (آرگون، هوا و هلیوم) را بر بیناب‌نمایی و ریخت‌شناسی سطح کادمیم در برهم‌کنش با لیزر بررسی نمودند [۳۰]. نظر و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی، اثر این گازها در فشار ۵۰ تا ۷۶۰ Torr را بر تابش پلاسما لیزری مس بررسی نموده و نشان دادند که بیش‌ترین تابش طیفی پلاسما به ترتیب برای گازهای آرگون، هوا و هلیوم در فشارهای ۲۰، ۵۰ و ۱۰ Torr به دست می‌آید و دما و چگالی الکترونی پلاسما نیز به همین ترتیب در اثر حضور این گازها دارای بیش‌ترین مقدار هستند [۳۱]. در سال ۲۰۱۳ میلادی، انگس و همکاران در تحقیقی مشابه نشان دادند که در برهم‌کنش لیزر فمتوثانیه با هدف آلومینیم در حضور گازهای مختلف، بیش‌ترین تابش طیفی، دما و چگالی الکترونی پلاسما به ترتیب برای گازهای آرگون، هوا و هلیوم رخ می‌دهد [۳۲]. چان و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی، اثر گاز پیرامونی آرگون و هوا را بر تابش و ریخت‌شناسی فیلم نازک CIGS^(۳) بررسی نمودند [۳۳]. سیدرا و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی، اثر گازهای آرگون، هلیوم، اکسیژن، ازت، دی‌اکسید کربن و ترکیب برخی از آن‌ها را بر پلاسما تانتالوم حاصل از برهم‌کنش با لیزر بررسی نمودند و نشان دادند که دما، چگالی الکترونی و تابش پلاسما و همچنین ساختارهای ایجاد شده در سطح نمونه به شدت به گاز پیرامون وابسته هستند [۳۴]. رضایی و توسلی در سال ۲۰۱۳ میلادی، تابش و گسترش پلاسما آلومینیم را در دو گاز هلیوم و آرگون و در فشارهای مختلف شبیه‌سازی نمودند [۳۵]. در سال‌های گذشته با پیشرفت فن‌آوری لیزرهای پالسی پرتوان، پژوهش‌های گسترده‌ای نیز در زمینه‌ی گسترش پلاسما در خلأ و در حضور گاز پیرامونی انجام شده است [۳۶-۴۰]. تولید پلاسما و گسترش موج ضربه‌ی حاصل از آن برای گازها [۴۱، ۴۲، ۴۳]، مایعات [۴۴، ۴۵، ۴۶] و جامدات [۴۱، ۴۷] به طور تجربی و نظری بررسی شده است. مطالعه‌ی رفتار مشخصه‌های دینامیکی موج ضربه‌ی تولید شده، به درک بهتر فرایندهای پیچیده‌ی

امروزه به دلیل کاربردهای فراوان برهم‌کنش لیزر و ماده از قبیل لایه‌نشانی [۱]، ساخت نانو ذرات [۲]، ماشین‌کاری دقیق [۳]، جراحی [۴]، آنالیز مواد، بیناب‌نمایی روشکست القایی لیزری^(۱) (LIBS) [۵] و چشمه‌های نوری پرتو ایکس برای لیتوگرافی و میکروسکوپی [۶، ۷]، مطالعه‌ی دقیق فرایندهای پیچیده‌ی حاصل از آن و همچنین عوامل مؤثر بر این فرایندها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طور کلی این عوامل به سه دسته عوامل پیرامونی (نظیر نوع، فشار و دمای گاز)، ویژگی‌های باریکه‌ی فرودی و هم‌چنین نوع و شرایط ماده‌ی هدف، بستگی دارند [۸-۱۹]. در مقایسه با شرایط خلأ، برهم‌کنش لیزر با ماده در حضور گاز پیرامون، به دلیل پدیده‌هایی نظیر کاهش کندگی، ایجاد موج ضربه، کند شدن و محصورسازی پلاسما، نفوذ و برخورد گونه‌های موجود در پلاسما گسترش یابنده و گاز پیرامون بسیار پیچیده‌تر است [۲۰-۲۲]. زمانی که پالس پرنرژی لیزر با شاری بیش از آستانه‌ی کندگی ماده به هدف برخورد کند، پیوندهای شیمیایی شکسته می‌شوند و ابری از الکترون‌ها، ذرات خنثی، یون‌ها و مولکول‌ها پدید می‌آیند [۱، ۲۳]. این ابر داغ ذرات پرنرژی، با سرعت بالا در گاز زمینه گسترش می‌یابد و تابش و موج ضربه^(۲) تولید می‌کند. یاسو و همکاران در سال ۱۹۹۰ میلادی، اثر فشار گازهای آرگون، هوا و هلیوم را بر تبخیر و تابش اتمی پلاسما حاصل از برهم‌کنش لیزر با آلایژ آلومینیم و آهن بررسی نمودند و بیش‌ترین تابش اتمی و دمای پلاسما را برای گازهای آرگون، هوا و هلیوم گزارش کردند [۲۴]. اثر فشار این گازها در محدوده‌ی ۱۰ تا ۷۶۰ Torr بر پلاسما مس حاصل از برهم‌کنش با لیزر اگزایمر در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط لی و همکاران مطالعه و بیشینه شدت تابش نشری در فشار ۱۰ Torr برای آرگون و هوا و ۵۰ Torr برای هلیوم مشاهده شده است [۲۵]. هاریلال و همکاران در سال ۱۹۹۸ اثر گاز پیرامونی بر دما و چگالی پلاسما حاصل از برهم‌کنش لیزر با کربن را در فشارهای ۱۰^{-۵} تا ۱۰ mbar بررسی کردند و نشان دادند که دمای پلاسما در گازهای به ترتیب آرگون، هلیوم و هوا بالاترین مقدار را دارد که با افزایش فشار، دما ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۲۶]. تأثیر گازهای هلیوم، آرگون و هوا در فشار اتمسفر بر چگالی و دمای پلاسما حاصل از برهم‌کنش لیزر و فولاد در



۲. چیدمان تجربی

برای مطالعات تجربی این پژوهش، از لیزر Nd:YAG در طول موج 1064nm ، پهنای پالس 2ns استفاده شد و شدت باریکه‌ی لیزر در سطح هدف در حد 4GW/cm^2 است. گازهای محیطی هوا، آرگون، نئون و هلیم با خلوص بالا در فشارهای مختلف به داخل محفظه‌ی خلأ تزریق شد. هدف مورد استفاده در این آزمایش، مس با خلوص بالا است. برای از بین بردن اثر ناهمواری‌ها، سطح هدف به دقت پرداخت و سپس توسط آستن شستشو داده شد. برای قرار دادن مکان جدیدی از هدف برای هر ضربه لیزر، هدف بر روی نگه‌دارنده‌ی قابل تنظیم XY نصب شد. پرتو لیزر پس از عبور از پنجره‌ی محفظه‌ی خلأ با استفاده از یک عدسی با فاصله کانونی 7.5cm بر روی هدف، کانونی شد. با توجه به واگرایی $\theta \approx 1\text{ mrad}$ در باریکه‌ی لیزر، قطر لکه‌ی لیزر در سطح هدف در حد $D = 2\sqrt{2}f\theta \approx 210\ \mu\text{m}$ محاسبه شد. مقدار اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ در حدود $230\ \mu\text{m}$ است که دلیل این اختلاف، قرار دادن نمونه قبل از موضع کانونی شدن باریکه‌ی لیزر است. برای ثبت تابش پلاسما در طول موج‌های مختلف، یک بیناب‌نمای نوری در آزمایشگاه ساخته شد. به منظور انتقال تابش‌های پلاسما به بیناب‌نما، از فیبر نوری پلاستیکی با قطر هسته‌ی 1mm در فاصله‌ی حدود 3mm از سطح هدف استفاده شد. تابش پلاسما خارج شده از فیبر نوری، ابتدا بر روی یک آینه‌ی سهموی و سپس توری نوری $1100\ \text{lin/mm}$ به منظور تفکیک طیفی تابانده و پرتوهای پراشیده به کمک عدسی بر روی سطح حساس دوربینی با فرمان‌پذیری خارجی و زمان نورگیری حدود $100\ \mu\text{s}$ ارسال شدند. برای تنظیم زمان مناسب میان آغاز تابش لیزر و لحظه‌ی راه‌اندازی دوربین، از یک تأخیردهنده‌ی الکترونیکی با تفکیک زمانی $1\ \mu\text{s}$ هماهنگ با راه‌انداز سویچ Q لیزر استفاده شد. سرعت گسترش پلاسما نیز با استفاده از روش جذب و پراکندگی لیزر هلیم نئون توسط پلاسما اندازه‌گیری شد.

برای این منظور مطابق با سمت راست شکل ۱، پرتو لیزر پیوسته‌ی کاوش هلیم-نئون، با توان 2mW و طول موج 632.8nm ، به طور موازی با سطح هدف در فاصله مشخص از آن و عمود بر پرتو برهم‌کنش کننده از سطح هدف عبور می‌کند

مختلف رخ‌دهنده در برهم‌کنش لیزر و ماده کمک می‌کند. به علاوه در فن‌آوری گداخت هسته‌ای، شیمی، مهندسی، بیولوژی و پزشکی مفید خواهد بود [۴۸، ۴۹]. گسترش پلاسما آهن در برهم‌کنش با لیزر در سه فشار مختلف گاز آرگون با روش تصویربرداری ICCD^(۴) توسط محمود و همکاران در سال ۲۰۰۹ انجام شده است [۵۰]. این گروه در آزمایش مشابهی در سال ۲۰۱۰ میلادی، گسترش پلاسما آهن و گرافیت را در گاز آرگون مطالعه نمودند [۵۱].

آزیر و همکاران در سال ۱۹۹۶ از روش ساده و مؤثر جذب و پراکندگی پرتو کاوش توسط پلاسما برای بررسی سرعت انتشار و ضخامت موج ضربه‌ای ایجاد شده در برهم‌کنش لیزر و هوا استفاده نمودند [۵۲]. در این روش به دلیل استفاده از لیزر پیوسته هلیم نئون به عنوان پرتو کاوش، نیاز به هم‌زمان‌سازی میان لیزر فرودی و زمان تصویربرداری وجود ندارد و هم‌چنین به جای استفاده از دوربین گران‌قیمت، از آشکارساز نوری سریع استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر نوع و فشار گازهای پیرامونی آرگون، هلیم، هوا و نئون بر تابش [تمرکز بر بهینه‌سازی نسبت تابش طیفی به تابش پیوستار زمینه (S/B)] و گسترش پلاسما حاصل از برهم‌کنش لیزر با هدف فلزی بوده است که نتایج آن در لایه‌نشانی لیزری فیلم نازک، فن‌آوری نانو و هم‌چنین بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری سودمند است. برای مطالعه‌ی تابش پلاسما، از روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری استفاده شده است. تأثیر گازهای پیرامونی در فشارهای مختلف بر تابش‌های پلاسما بررسی گردید تا نوع و فشار بهینه برای دست‌یابی به بیش‌ترین مقدار نسبت سیگنال به تابش پیوستار زمینه که برای کاربردهای طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری حیاتی است، به دست آید. به جای استفاده از روش‌های معمول مطالعه‌ی گسترش پلاسما نظیر تداخل‌سنجی، هولوگرافی، سایه‌نگاری و یا عکس‌برداری سریع پلاسما [۵۳-۵۸، ۲۱] که با وجود کارآمد بودن از لحاظ فنی مشکل هستند و به دلیل نیاز به اجزای اپتیکی و دوربین‌های خاص پرهزینه هستند، از روش ساده و مؤثر جذب و پراکندگی پرتو کاوش توسط پلاسما برای اندازه‌گیری سرعت گسترش پلاسما استفاده و نتایج تجربی با مدل موج ضربه سد-تیلور^(۵) مقایسه شده است.

۳. مدل نظری

یکی از نظریه‌های گسترش پلاسما در برهم‌کنش لیزر و ماده، نظریه‌ی موج ضربه^(۶) است. برای توصیف امواج گُروی ضربه، می‌توان از نظریه‌ی سد-تیلور استفاده نمود [۵۸] که مبنای آن انفجار نقطه‌ای است. در صورتی که مقدار قابل توجهی از انرژی به طوری ناگهانی در یک نقطه از فضا تخلیه شود، یک موج غیرخطی به نام موج ضربه ایجاد می‌شود و در محیط گسترش می‌یابد. این موج ضربه در حین گسترش، جرم گاز پیرامون را به گونه‌ای جاروب می‌کند که $m_1 \gg m_2$ است. m_1 و m_2 به ترتیب جرم‌های گاز پیرامون و منشأ انرژی (جرم کندگی) هستند. زمانی این شرط برقرار است که $P_2 \gg P_1$ باشد که P_2 فشار قله‌ی پشت موج ضربه و P_1 فشار گاز پیرامون است. براساس این نظریه، مکان ضربه‌ی حاصل از انفجار نقطه‌ای R_s با گذشت زمان طبق رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود:

$$R_s = \xi_0 \left(\frac{E_s}{\rho} \right)^{1/2} t^{2/5} \quad (1)$$

ξ_0 ثابت وابسته به γ است.

$$\xi_0 = \left(\frac{5}{2} \right)^{2/5} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/5} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{2/5} \quad (2)$$

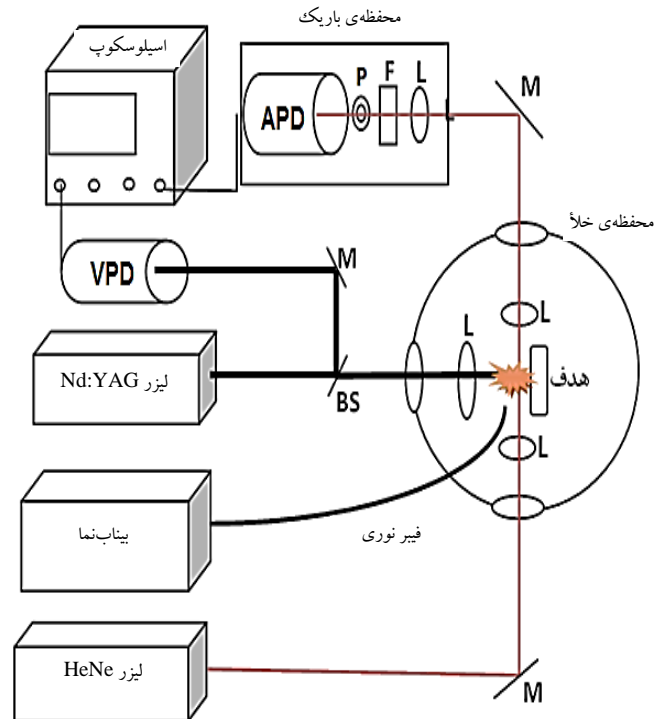
γ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه گاز، E_s انرژی منجر به کندگی (حدود ۷۰٪ انرژی لیزر [۵۰]) و ρ_1 چگالی گاز زمینه هستند و از چسبندگی و سرمایش تابشی صرف‌نظر می‌شود. در این نظریه، یک هسته با فشار بالا و چگالی کم، پوسته‌ی نازک و فشرده شده را به جلو می‌راند. بستگی زمانی $t^{2/5}$ در معادله‌ی (۱) اهمیت چشم‌پوشی از سرمایش تابشی در حضور گاز پیرامونی با چگالی کافی را نشان می‌دهد. در صورت قابل توجه بودن سرمایش پلاسما، نظریه‌ی فشار راه‌انداز برف روب^(۷) $(t^{2/3})$ ، یا پایستگی تکانه‌ی برف روب^(۸) برقرار خواهد بود.

۴. نتایج و بحث

۴.۱ تأثیر نوع و فشار گاز پیرامون بر تابش پلاسما و نسبت سیگنال

به پیوستار زمینه

تأثیر نوع گاز پیرامونی و فشار آن بر تابش خطوط طیفی اتمی مس (به عنوان نمونه 515.32 nm) و هم‌چنین تابش پیوستار پلاسما در شکل ۲ نشان داده شده است. فشار گاز پیرامونی تأثیر به‌سزایی بر شدت تابش خط اتمی دارد. برای هر چهار گاز



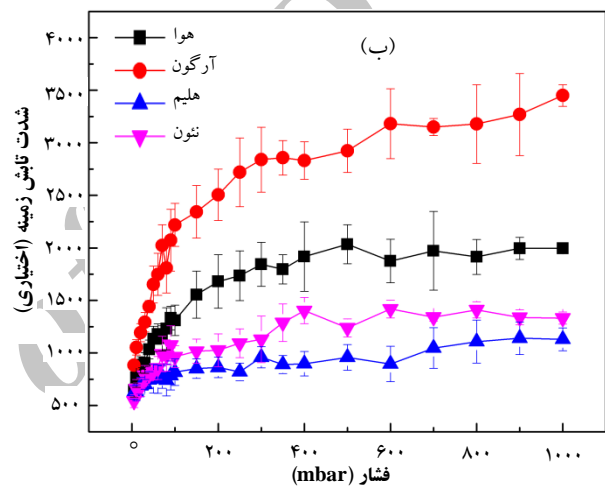
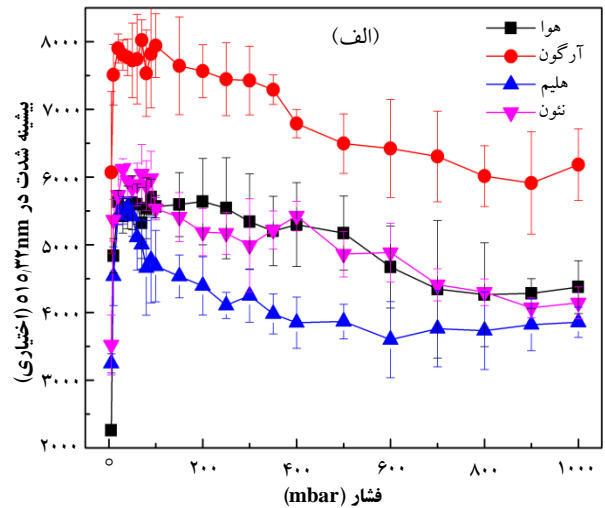
شکل ۱. چیدمان تجربی، M: آینه، APD: آشکارساز دیود بهمنی، VPD: آشکارساز نوری دیود خلأ، F: فیلتر، L: عدسی، P: روزنه، BS: شکافنده‌ی پرتو.

و به کمک آینه‌ی تخت، به آشکارساز نوری هدایت می‌شود. برای باریک نمودن پرتو هلیم-نون و اندازه‌گیری دقیق‌تر فاصله‌ی آن از سطح نمونه و در نتیجه افزایش دقت برآورد سرعت پلاسما، از دو عدسی همگرا استفاده گردید. برای جلوگیری از ورود پرتوهای پراکنده شده لیزر برهم‌کنش کننده به آشکارساز نوری، از مجموعه‌ی سه فیلتر نوری با عبوردهی کم‌تر از ۱٪ در 1064 nm و یک روزنه به قطر 3 mm در ورودی آشکارساز نوری دیود بهمنی استفاده شد و مجموعه‌ی آشکارساز نوری، روزنه و فیلترها در داخل یک محفظه‌ی تاریک قرار گرفتند. زمان رسیدن پلاسما به باریکه‌های متوالی، لیزر کاوش به صورت اُفت دامنه‌ی سیگنال باریکه‌ی کاوش بر روی صفحه نمایش گر اسیلوسکوپ تکترونیکس مدل TDS3052B قابل مشاهده است. با این چیدمان، امکان اندازه‌گیری سرعت گسترش پلاسما در چندین نقطه با فاصله‌های مشخص از مکان برهم‌کنش میسر شد. به منظور افزایش صحت اندازه‌گیری‌ها، نتایج ارائه شده از میانگین‌گیری بر روی دست کم پنج بار اندازه‌گیری به دست آمده است.



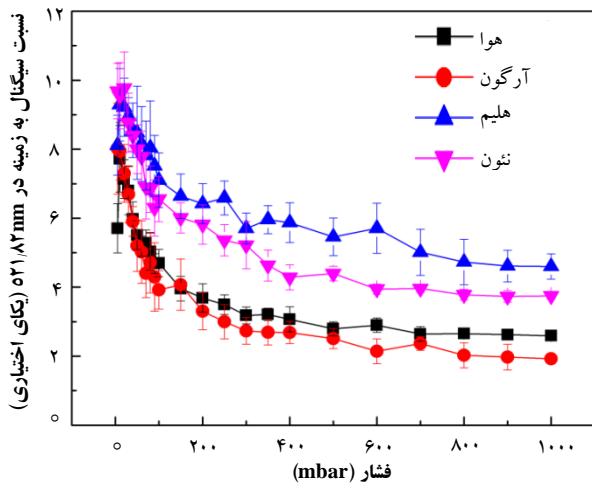
با افزایش بیش تر فشار گاز پیرامونی، محصورسازی زیاد پلاسما در نزدیکی سطح هدف، باعث افزایش اثر سپر پلاسما و کاهش برهم کنش مؤثر لیزر با هدف می شود. گرچه در این حالت بخش بیش تری از انرژی لیزر در پلاسما جذب می شود، اما افزایش بیش تر فرکانس برخورد کشسان الکترون ها با اتم های گاز پیرامونی در فشارهای بالا، نرخ رشد انرژی الکترون های آزاد ناشی از پدیده ی جذب برمشترالانگ معکوس را کاهش داده و باعث کاهش دما و چگالی الکترونی پلاسما می شود [۲۶]. بالاترین شدت خط اتمی ۵۱۵,۳۲nm در گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم به ترتیب در فشارهای ۷۰، ۱۰۰، ۴۰ و ۳۰mbar مشاهده شد. سایر خطوط اتمی مس نیز رفتاری مشابه از خود نشان دادند. مطابق با شکل ۲، الف، بیش ترین شدت تابش خطوط اتمی به ترتیب در گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم مشاهده شد که دلیل آن نسبت انرژی اولین یونش بر وزن اتمی و هم چنین هدایت گرمایی متفاوت این گازها است. میزان اتلاف انرژی پلاسما به دلیل برخوردهای کشسان و ناکشسان الکترون ها با اتم های گاز پیرامونی در حضور گازهای با نسبت E/M بزرگ تر (که M وزن اتمی و E اولین انرژی یونش است)، بیش تر است [۲۶، ۳۱، ۳۲]. هم چنین هدایت گرمایی گاز پیرامونی نقش به سزایی در اتلاف انرژی پلاسما دارد. در جدول ۱ مشخصه های چهار گاز آرگون، هلیم، نئون و هوا ارائه شده است. کم ترین وزن اتمی و هم چنین بیش ترین نسبت E/M و هدایت گرمایی به ترتیب متعلق به هلیم، نئون، هوا و آرگون است. تأثیر نوع گاز پیرامونی و فشار آن بر تابش پیوستار پلاسما در شکل ۲، ب نشان داده شده است. بیش ترین مقدار تابش پیوستار پلاسما به ترتیب در حضور گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم مشاهده می شود. هم چنین با افزایش فشار گاز پیرامون تا ۲۰۰mbar تابش پیوستار مستقل از نوع گاز به شدت افزایش می یابد و سپس اشباع می شود. دو سازوکار عمده ی تابش پیوستار پلاسما عبارتند از تابش برمشترالانگ و تابش بازترکیب. انرژی تابش برمشترالانگ در واحد حجم، واحد زمان و فرکانس در فرکانس مشخص ۷ از رابطه ی زیر به دست می آید [۳۵]:

$$I_{\text{brems}}(\nu) = \frac{n_e e^1}{24\pi c^3 \epsilon_0^2 m_e h} \frac{h}{K_B T} \sqrt{\frac{K_B T}{m_e}} e^{-\frac{h\nu}{K_B T}} \sum_m n_m z_m^2 \quad (3)$$

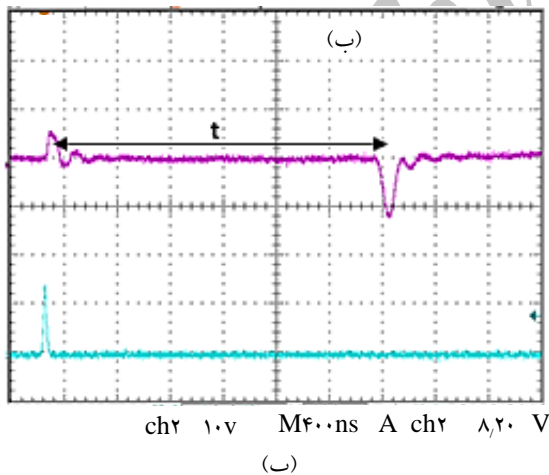
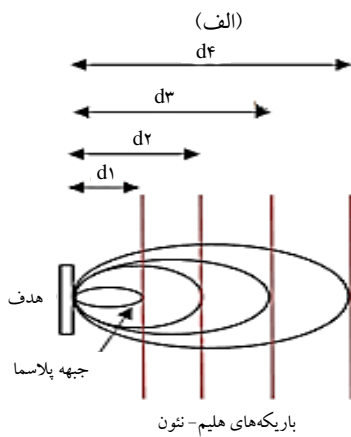


شکل ۲. الف) شدت تابش خط اتمی پلاسما (مس، ب) شدت تابش پیوستار به ازای گازها و فشارهای مختلف.

استفاده شده، شدت تابش خطوط اتمی از فشار ۵ تا حدود ۱۰۰mbar افزایش می یابد و سپس تا فشار اتمسفر روند کاهشی از خود نشان می دهد. در مراجع [۳۲، ۳۱] نشان داده شده است که شدت تابش، چگالی و دمای الکترونی پلاسما ابتدا با افزایش فشار زمینه، افزایش می یابند و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، با افزایش بیش تر فشار، روندی کاهشی دارند. در فشارهای بسیار کم گاز پیرامونی، پلاسما به سرعت و به طور آزاد در محیط گسترش می یابد و بنابراین چگالی و دمای پلاسما در این حالت پایین است. با افزایش فشار تا ۱۰۰mbar به دلیل افزایش فرکانس برخورد ذرات پلاسما، انتقال بخشی از انرژی گاز پیرامونی به پلاسما نزدیک به سطح هدف و هم چنین محصورسازی پلاسما، دما و چگالی پلاسما افزایش می یابد که مطابق با شکل ۲، الف منجر به افزایش تابش اتمی پلاسما می شود.



شکل ۳. تغییرات نسبت سیگنال تابش پلاسما به تابش پیوستار زمینه برای خط اتمی ۵۲۱٫۸۲ nm مس.



شکل ۴. الف) لبه پلاسما در فاصله‌های مشخص d_1, d_2, d_3, d_4 باریکه لیزر هلیوم-نئون را قطع می‌کند، ب) نمودار بالایی (بنفش): تغییرات زمانی شدت باریکه لیزر کاوش، فرورفتگی و آفت سیگنال ناشی از جذب باریکه‌ی کاوش در پلاسما در لحظه رسیدن پلاسما به موضع باریکه‌ی کاوش در راست نمودار مشاهده می‌شود. نمودار پایینی (فیروزه‌ای) سیگنال مربوط به باریکه‌ی لیزر برهم کنش.

جدول ۱. مشخصه‌های فیزیکی گازها [۳۱، ۵۹]

| گاز | هلیوم | نئون | هو |
|--|--------|--------|--------|
| وزن اتمی (مولکولی) (M) (gr/mol) | ۴ | ۲۰٫۲ | ۲۸٫۹۶ |
| انرژی یونش (E) (eV) | ۲۴٫۵۹ | ۲۱٫۵۶ | ۱۵٫۵۸ |
| نسبت E/M | ۰٫۳۹ | ۱٫۰۷ | ۰٫۵۲ |
| هدایت گرمایی $(10^{-7} \text{ cal}^{-1} \text{ deg}^{-1} \text{ cm}^{-1})$ | ۴۲٫۵۷ | ۳۶۰٫۳۶ | ۶۲٫۴۰ |
| نسبت ظرفیت گرمایی ویژه | ۱٫۶۶۷ | ۱٫۶۶۷ | ۱٫۴ |
| چگالی (kg/m^3) در فشار ۷۵۰ mbar | ۱٫۲۴۵۶ | ۰٫۱۲۴۸ | ۰٫۹۰۳۸ |

که در آن، c سرعت نور، n_m و n_e به ترتیب جرم الکترون، چگالی‌های یونی و الکترونی می‌باشند. Z_i و Z_e نیز عدد اتمی و گذردهی خلأ هستند. با توجه به این‌که بالاترین دما و چگالی الکترونی پلاسما به ترتیب در حضور گازهای آرگون، نئون، هوا و هلیوم ایجاد می‌شود و نیز انرژی یونش گاز آرگون پایین‌ترین و هلیوم بالاترین مقدار را مطابق با جدول ۱ دارد، منطقی به نظر می‌رسد که تابش پیوستار پلاسما در حضور گاز آرگون بیشینه و در حضور هلیوم کمینه باشد.

نسبت S/B با استفاده از قله شدت سه خط طیفی اتم مس، I_p و میانگین شدت تابش زمینه، I_b ، در دو سوی خطوط طیفی، طبق رابطه‌ی زیر محاسبه گردید:

$$S/B = \frac{I_p - I_b}{I_b} \quad (۴)$$

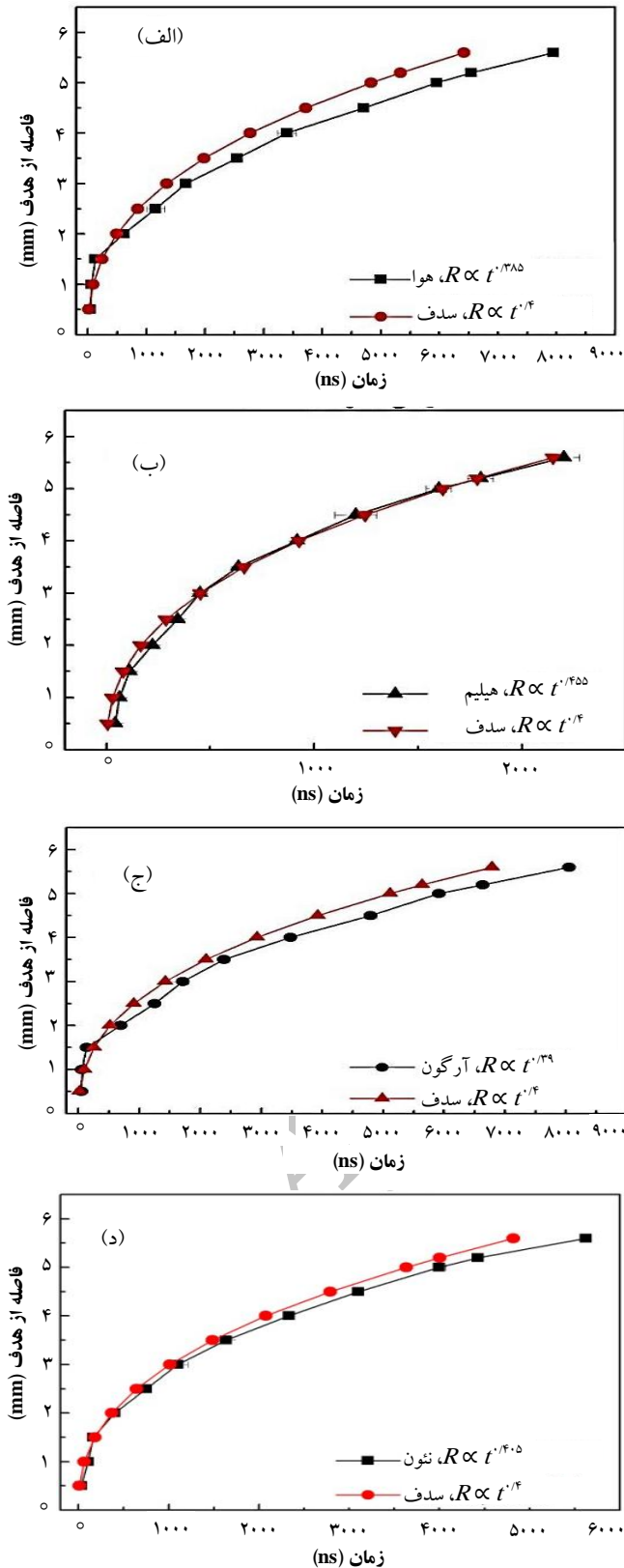
شکل ۳ رفتار S/B خط نشری اتمی ۵۲۱٫۸۲ nm مس را برای گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیوم در فشارهای ۵ تا ۱۰۰۰ mbar نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار S/B به ترتیب برای گازهای هلیوم، نئون، هوا و آرگون مشاهده می‌شود. هم‌چنین برای گازهای هوا، آرگون، هلیوم و نئون بیش‌ترین مقدار S/B به ترتیب در فشارهای ۱۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ mbar مشاهده شد. سایر خطوط اتمی نیز رفتار مشابهی نشان دادند.

۲.۴ اثر نوع گاز پیرامونی بر گسترش پلاسما

روش‌های معمول بررسی گسترش پلاسمای لیزری و اندازه‌گیری سرعت انتشار آن، پرهزینه و مشکل هستند. در پژوهش حاضر، از جذب و پراکندگی پرتو لیزر هلیوم نئون توسط پلاسما به منظور آشکارسازی مکان پلاسما استفاده شد. مطابق شکل ۴. الف، باریکه‌ی لیزر کاوش هلیوم-نئون با تغییر مکان عدسی در چندین



بیش تری حرکت می کند و به مدل گسترش آزاد پلاسما که در شرایط محیط خلأ رخ می دهد، نزدیک تر است.



شکل ۵. نمودار مکان-زمان ($R-t$) برای جبهه موج ناشی از پلاسمای مس برای گازهای الف (هوا، ب) هلیم، ج) آرگون و د) نئون در فشار ۷۵۰ mbar.

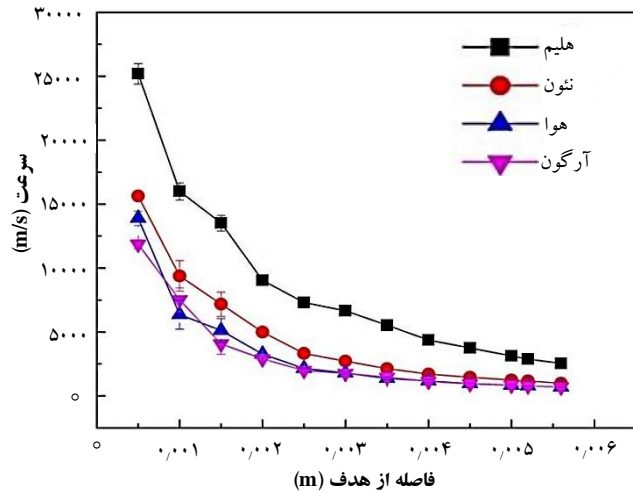
نقطه و در فاصله های ۰/۵ تا ۶mm از هدف تنظیم و به آشکارساز دیود بهمنی هدایت گردید. زمانی که جبهه موج ضربه با باریکه ی لیزر کاوش برخورد می کند، آن را جذب و پراکنده می نماید که مطابق با شکل ۴. ب، این پدیده به صورت اُفت محسوس سیگنال آشکارساز قابل مشاهده است. لحظه ی t در نمودار بنفش شکل ۴. ب (نمودار بالا)، زمان رسیدن جبهه ی پلاسما به باریکه ی هلیم- نئون و قله ی مشاهده شده در نمودار فیروزه ای رنگ (نمودار پایین)، پالس لیزر برهم کنش را نشان می دهند که به جای مبدأ زمان در اندازه گیری ها استفاده شده است.

مکان جبهه ی پلاسما برحسب زمان ($R-t$) در برهم کنش لیزر با هدف مس در حضور گازهای هوا، هلیم، آرگون و نئون با فشار ۷۵۰ mbar در شکل ۵. الف تا ۵. د ترسیم و رفتار مکان- زمان جبهه ی پلاسما در هر گاز با مدل سدف- تیلور مقایسه شده است. برخی مشخصه های فیزیکی گازها که در مدل سدف مورد نیاز است، در جدول ۱ ارائه شده است. طبق شکل ۵. الف و ج، با گذشت زمان و دور شدن جبهه ی پلاسما از سطح در گازهای آرگون و هوا، سرعت گسترش آن کند شده و از نظریه ی سدف دور می شود و به ناحیه ی فشار راه انداز برفروب نزدیک می شود که نشان دهنده ی اُفت انرژی به دلیل تابش است و تابش بیش تر پلاسما در گازهای آرگون و هوا را تأیید می کند. موج ضربه در گاز نئون نیز تقریباً به صورت منطبق بر نظریه ی سدف به حرکت خود ادامه می دهد. گسترش موج ضربه در گاز هلیم به دلیل تابش ناچیز و چگالی کم تر آن به نظریه ی انتشار آزاد پلاسما در محیط نزدیک می شود. سرعت گسترش جبهه ی پلاسما در فاصله ۰/۵ تا ۶mm از سطح هدف برای گازهای آرگون، هلیم، هوا و نئون در شکل ۶ رسم شده است. سرعت گسترش پلاسما به ترتیب در گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون دارای بیش ترین مقدار است که طبق جدول ۱ دلیل آن ترتیب کوچکی وزن اتمی این گازها و در نتیجه محصورسازی کم تر پلاسما است. سرعت گسترش پلاسما در حضور گازهای مختلف و در نزدیکی سطح هدف اختلاف چشمگیری دارد و با دور شدن از سطح و اُفت انرژی موج ضربه، به یک دیگر نزدیک می شوند. در نزدیکی سطح، این سرعت برای گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون به ترتیب برابر ۲۵۲۰۰، ۱۵۶۲۵، ۱۳۹۰۰ و ۱۱۸۶۰ m/s و در دورترین نقطه ی اندازه گیری شده برابر ۲۵۵۰، ۱۰۰۰، ۷۰۰ و ۶۹۰ m/s به دست آمد. به دلیل چگالی کم تر هلیم، جبهه ی پلاسما در حضور این گاز با سرعت

می‌تواند به عنوان روشی مؤثر در مطالعه‌ی گسترش پلاسما استفاده شود.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر نوع و فشار گازهای پیرامونی آرگون، هوا، نئون و هلیم بر تابش‌ها (تمرکز بر نسبت S/B) و گسترش پلاسما حاصل از برهم‌کنش باریکه‌ی کانونی شده‌ی لیزر پالسی Nd:YAG در طول موج 1064nm با هدف مس مطالعه شده است. نتایج نشان دادند که نوع و فشار گاز پیرامونی، تأثیر به‌سزایی بر شدت تابش خط اتمی، تابش پیوستار، نسبت S/B و گسترش پلاسما دارد. شدت تابش خطوط اتمی مس در پلاسما ایجاد شده، به ترتیب در گازهای آرگون، نئون، هوا و هلیم بیش‌تر است. بالاترین شدت در گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم به ترتیب در فشارهای ۷۰، ۱۰۰، ۴۰ و 30mbar مشاهده شد. برای هر چهار گاز مورد اشاره، این شدت خط از فشار ۵ تا حدود 100mbar افزایش می‌یابد و سپس تا فشار اتمسفر روند کاهشی دارد. هم‌چنین با افزایش فشار گاز پیرامون تا 200mbar ، تابش پیوستار مستقل از نوع گاز به شدت افزایش می‌یابد و سپس اشباع می‌شود. بهترین مقدار S/B به ترتیب برای گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون مشاهده شد. هم‌چنین بهترین مقدار S/B برای گازهای هوا، آرگون، هلیم و نئون به ترتیب در فشارهای ۱۰، ۵، ۱۰ و 20mbar مشاهده گردید. از روش ساده جذب و پراکندگی پرتو کاوش برای اندازه‌گیری سرعت گسترش پلاسما استفاده و نتایج تجربی حاصل با نظریه‌ی سد ف مقایسه شدند. گسترش پلاسما در تمام گازها و در زمان‌های کوچک‌تر از 100ns که موج ضربه در محیط گسترش می‌یابد و اُفت انرژی پلاسما ناچیز است، با نظریه‌ی سد ف منطبق است. با گذشت زمان و دور شدن جبهه‌ی پلاسما از سطح در گازهای آرگون و هوا، سرعت گسترش پلاسما کند شده و از نظریه‌ی سد ف دور می‌شود و به ناحیه‌ی فشار راه‌انداز برف‌روب نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده‌ی اُفت انرژی پلاسما به دلیل گسترش، تابش و هدایت گرمایی است. موج ضربه در گاز نئون نیز تقریباً به صورت منطبق بر نظریه‌ی سد ف به حرکت خود ادامه می‌دهد. گسترش موج ضربه در گاز هلیم به دلیل تابش ناچیز پلاسما و وزن اتمی کوچک‌تر هلیم به نظریه‌ی انتشار آزاد پلاسما در محیط نزدیک‌تر است.



شکل ۶. سرعت گسترش پلاسما حاصل از برهم‌کنش با باریکه‌ی لیزر در فاصله‌های مختلف از سطح هدف در حضور گازهای هوا، آرگون، نئون و هلیم در فشار 750mbar .

در مرجع [۶۰] با استفاده از روش‌های سایه‌نگاری و تصویربرداری سریع، سرعت گسترش پلاسما در برهم‌کنش لیزر Nd:YAG با هدف آلومینیم، برای پهنای پالس 6ns با انرژی 100mJ در گاز آرگون در فشار 1atm در فاصله‌ی حدود 1.5mm از هدف برابر با 5300m/s گزارش شده است که با سرعت حدود 4000m/s اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر سازگار است. در شبیه‌سازی انجام شده در مرجع [۶۱]، سرعت گسترش پلاسما مس (در لحظات اولیه در حد 100ns) در گاز پیرامونی هلیم با فشار 1atm حدود 2.5 برابر سرعت گسترش پلاسما در حضور گاز آرگون گزارش شده است که به نسبت $2/2$ به دست آمده در این پژوهش بسیار نزدیک است. هم‌چنین در مرجع [۵۵]، سرعت گسترش پلاسما در برهم‌کنش لیزر Nd:YAG با بیشینه شدت $1 \times 10^{11}\text{W.cm}^{-2}$ با هدف مس در هوا با فشار 1atm با استفاده از روش سایه‌نگاری از بازه‌ی زمانی 20ns تا 250ns مطالعه شده است که در فاصله‌ی حدود 2mm از سطح هدف، سرعت گسترش پلاسما در حد 8000m/s است با سرعت حدود 3500m/s گزارش شده در این مقاله، سازگاری مناسبی از خود نشان می‌دهد. اختلاف جزئی در سرعت‌های گزارش شده، ناشی از تفاوت شدت لیزر برهم‌کنش و هم‌چنین فشار گاز محیطی است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که روش جذب و پراکندگی پرتو کاوش در عین سادگی و هزینه‌ی کم،



مرجع‌ها

- [1] D.B. Chrisey, G.K. Hubler, Pulsed laser deposition of thin films, Wiley, New York, (1994).
- [2] M.F. Becher, I.R. Brock, Hong Cai, D.E. Henneke, J.W. Keto, Jaemyoung Lee, W.T. Nichols, H.D. Glicksman, Metal nanoparticles generated by laser ablation, *Nano. Strut. Mater.* **10** (1998) 853.
- [3] A. Marcinkevicius, S. Juadkazis, M. Watanabe, M. Miwa, Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, *Opt. Lett.* **26** (2001) 277.
- [4] F.H. Loesel, J.P. Fischer, M.H. Gots, C. Horvath, Non-thermal ablation of neural tissue with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. B* **66** (1998) 121.
- [5] L.J. Radziemski, From LASER to LIBS, the path of technology development, *Spectrochim. Acta, Part B* **57** (2002) 1109.
- [6] S.S. Harilal, T. Sizyuk, A. Hassanein, D. Campos, P. Hough, V. Sizyuk, The effect of excitation wavelength on dynamics of laser-produced tin plasma, *J. Appl. Phys.* **109** (2011) 063306.
- [7] S.S. Harilal, G.V. Miloshevsky, T. Sizyuk, A. Hassanein, Effects of excitation laser wavelength on Ly- α and He- α line emission from nitrogen plasmas, *Phys. Plasmas* **20** (2013) 013105.
- [8] Reinhard Noll, Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Fundamentals and Applications, Springer (2012).
- [9] C. Aragon, J.A. Aguilera, Two-Dimensional Spatial Distribution of the Time-Integrated Emission from Laser-Produced Plasmas in Air at Atmospheric Pressure, *Appl. Spectrosc.* **51** (1997) 1632.
- [10] S.S. Harilal, C.V. Bindhu, Riju C. Issac, V. P.N. Nampoore, C.P.G. Vallabhan, Electron density and temperature measurements in a laser produced carbon plasma, *J. Appl. Phys.* **82** (5) (1997).
- [11] M. Akram, Shazia Bashir, Asma Hayat, Khaliq Mahmood, Riaz Ahmad, M. Khaleeq-U-Rahaman, Effect of laser irradiance on the surface morphology and laser induced plasma parameters of zinc, *Laser Part. Beams* **32** (2014) 119–128.
- [12] T. Kim, Y. Yoon, Effect of Irradiation Wavelength on a Laser Induced Plasma, *J. Korean Phys. Soc.* **35** (3) (1999) 198.

سرعت گسترش پلاسما به ترتیب در گازهای هلیوم، نئون، هوا و آرگون دارای بیش‌ترین مقدار است. در نزدیکی سطح هدف، سرعت برای گازهای هلیوم، نئون، هوا و آرگون به ترتیب ۲۵۲۰۰، ۱۵۶۲۵، ۱۳۹۰۰ و ۱۱۸۶۰ m/s و در دورترین نقطه، اندازه‌گیری شده برابر با ۲۵۵۰، ۱۰۰۰، ۷۰۰ و ۶۹۰ m/s به دست آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که روش جذب و پراکندگی پرتو کاوش در عین سادگی و هزینه بسیار کم، می‌تواند به عنوان روشی مؤثر در مطالعه‌ی گسترش پلاسما استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
2. Shock Wave
3. Copper Indium Gallium Selenide
4. Intensified Charge Coupled Device
5. Sedov-Taylor Theory
6. Shock Wave Theory
7. Pressure Driven Snow Plow
8. Momentum Conserving Snow Plow



- [13] J.S. Penczak, Yaoming Liu, Robert J. Gordon, Polarization and fluence dependence of the polarized emission in nanosecond laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochim. Acta, Part B* **66** (2) (2011) 186-188.
- [14] S.M.R. Darbani, M. Ghezlbash, A. E. Majd, M. Soltanolkotabi, H. Saghafifar, Temperature effect on the optical emission intensity in laser induced breakdown spectroscopy of super alloys, *J. Eur. Opt. Soc. Rap. Pub.* **9** (2014) 14058.
- [15] S.H. Tavassoli, A. Gragossian, Effect of sample temperature on laser-induced breakdown spectroscopy, *Opt. Laser Tech.* **41** (4) (2009) 481.
- [16] M. Corsi, G. Cristoforetti, M. Hidalgo, D. Iriarte, S. Legnaioli, V. Palleschi, A. Salvetti, E. Tognoni, Effect of Laser-Induced Crater Depth in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Emission Features, *Appl. Spec.* **59** (2005) 7.
- [17] J. Chen, Z. Chen, J. Sun, X. Li, Z. Deng, Y. Wang, Effects of laser pulse sequence on laser-induced soil plasma emission, *Appl. Opt.* **51** (2012) 34.
- [18] Andrew J. Effenberger, Jr., Jill R. Scott, Effect of Atmospheric Conditions on LIBS Spectra, *Sensors* **10** (2010) 4907.
- [19] Wolfgang Sdorra, Key Neimax, Basic investigations for laser microanalysis: III. Application of different buffer gases for laser-produced sample plumes, *Mikrochim. Acta* **107** (1992) 319.
- [20] N. Farid, S.S. Harilal, H. Ding, A. Hassanein, Emission features and expansion dynamics of nanosecond laser ablation plumes at different ambient pressures, *J. Appl. Phys.* **115** (2014) 033107.
- [21] J.A. Aguilera, C. Aragon, F. Penalba, Plasma shielding effect in laser ablation of metallic samples and its influence on LIBS analysis, *Appl. Surf. Sci.* **127** (1998) 309.
- [22] C.B. Dreyer, G.S. Mungas, P. Thanh, J.G. Radziszewski, *Spectrochim. Acta, Part B* **62** (2007) 1448.
- [23] R. Eason, Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Application-Led Growth of Functional Materials, Wiley, New York (2007).
- [24] Yasou Iida, Effects of atmosphere on laser vaporization and excitation processes of solid samples, *Spectrochim. Acta* **45 B** (12) (1990) 1353.
- [25] Lee Y. I. Thiem T. L., Kim G. H., Teng Y.Y., Sneddon *J. Appl. Spectrosc.* **14** (1992) 1597.
- [26] S.S. Harilal, C.V. Bindhu, V.P.N. Nampoori, C.P.G. Vallabhan, Influence of ambient gas on the temperature and density of laser produced carbon plasma, *Appl. Phys. Lett.* **72** (2) (1998).
- [27] J.A. Aguilera, C. Aragon, A comparison of the temperatures and electron densities of laser-produced plasmas obtained in air, argon, and helium at atmospheric pressure, *Appl. Phys. A* **69** [Suppl.] S475 (1999).
- [28] S.S. Harilal, Beau O'Shay, Yezheng Tao, Mark S. Tillack, Ambient gas effects on the dynamics of laser-produced tin plume expansion, *J. Appl. Phys.* **99**, (2006) 083303.
- [29] Galila Abdellatif, Studying the Role of Ambient Conditions in Laser-induced Al-Plasma Expansion, *J. Korean Phys. Soc.* **56** (1) (2010) 300.
- [30] Shazia Bashir, Nazar Farid, Khaliq Mahmood, M. Shahid Rafique, Influence of ambient gas and its pressure on the laser-induced breakdown spectroscopy and the surface morphology of laser-ablated Cd, *Appl. Phys. A* **107** (2012) 203.
- [31] Nazar Farid, Shazia Bashir, Khaliq Mahmood, Effect of ambient gas conditions on laser-induced copper plasma and surface morphology, *Phys. Scr.* **85** (2012) 015702.
- [32] A. Nakimana, Haiyan Tao, Xun Gao, Zuoqiang Hao and Jingquan Lin, Effects of ambient conditions on femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of Al, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** (2013) 285204.
- [33] Chan-Kyu Kim, Jung-Hwan In, Seok-Hee Lee and Sungho Jeong, Influence of Ar buffer gas on the LIBS signal of thin CIGS films, *J. Anal. At. Spectrom.* **28** (2013) 460-467.
- [34] Sidra Khan, Shazia Bashir, Asma Hayat, M. Khaleeq-ur-Rahman, Faizan-ul-Haq, Laser-induced breakdown spectroscopy of tantalum plasma, *Phys. Plasmas* **20**, (2013) 073104.
- [35] F. Rezaei, S.H. Tavassoli, Developing the model of laser ablation by considering the interplay between emission and expansion of aluminum plasma, *Phys. Plasmas* **20**, (2013) 013301.



- [36] D.B. Geohegan, A.A. Puzos, Dynamics of laser ablation plume penetration through low pressure background gases, *Appl. Phys. Lett.* **67** (1995) 197.
- [37] S. Amoruso, B. Toftmann, J. Schou, Thermalization of a UV laser ablation plume in a background gas: From a directed to a diffusionlike flow, *Phys. Rev. E* **69** (2004) 056403.
- [38] H.C. Le, D.E. Zeitoun, J.D. Parisse, M. Sentis, W. Marine, *Phys. Rev. E* **62** (2000) 4152.
- [39] S.S. Harilal, C.V. Bindhu, M.S. Tillack, F. Najmabadi, A.C. Gaeris, Internal structure and expansion dynamics of laser ablation plumes into ambient gases, *J. Appl. Phys.* **93** (2003) 2380.
- [40] A.K. Sharma, R.K. Thareja, Characterization of laser-produced aluminum plasma in ambient atmosphere of nitrogen using fast photography, *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 4490–4492.
- [41] J.F. Ready, Effects of High-Power Laser Radiation, Academic, New York (1971).
- [42] G.V. Ostrovskaya, A.N. Zaidel, Laser spark in gases, *Sov. Phys-Usp.* **16** (1974) 834.
- [43] C.G. Morgan: *Prog. Phys.* **38**, 621 (1957).
- [44] D.C. Emmony, Interaction of IR laser radiation with liquid, *Infrared Phys.* **25** (1985) 133.
- [45] S. Ridah, Shock waves in water, *J. Appl. Phys.* **64** (1988) 152.
- [46] M.A. Harith, et.al, Dynamics of laser-driven shock waves in water, *J. Appl. Phys.* **66** (1989) 5194.
- [47] N. Bloembergen, Laser-induced electric breakdown in solids, *IEEE J. QE* **10** (1974) 375.
- [48] V.P. Zharov, V.S. Letokhov: Laser Optoacoustic Spectroscopy, *Springer Ser. Opt. Sci* **37** (1986).
- [49] V. Pallechi, D.P. Singh, M. Vaselli, (eds.): Proc. Int'l Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Barga, Italy (1991).
- [50] S. Mahmood, R.S. Rawat, M. Zakaullah, J. Lin, S.V. Springham, T.L. Tan, P. Lee, Investigation of plume expansion dynamics and estimation of ablation parameters of laser ablated Fe plasma, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (2009) 135504.
- [51] S. Mahmood, R.S. Rawat, S.V. Springham, T.L. Tan, P. Lee, Material ablation and plasma plume expansion study from Fe and graphite targets in Ar gas atmosphere, *Appl. Phys. A*, **101** (2010) 695.
- [52] Yu. I. Ostrovsky, M. Butusov, G. Ostrovskaya: Interferometry by Holography, Springer Ser. Opt. Sci., **20** (Springer, Berlin, Heidelberg (1980).
- [53] M.A. Harith, et.al, Experimental studies on shock wave propagation in laser produced plasmas using double wavelength holography, *Opt. Commun.* **71** (1989) 76-80.
- [54] P. Gregorcic, J. Mozina, High-speed two-frame shadowgraphy for velocity measurements of laser-induced plasma and shock-wave evolution, *Opt. Lett.* **36** (15) (2011) 2782.
- [55] A.H. Farahbod, M. Afshari, E. Aghayari, Plasma expansion in laser-target interaction process, *J. Nucl. Sci. Tech.* **58** (2012) 1-7.
- [56] I. Mihaila, C. Ursu, A. Geciuc, G. Popa, Diagnostics of plasma plume produced by laser ablation using ICCD imaging and transient electrical probe technique, *J. Phys.: Conf. Ser.* **207** (2010).
- [57] J.R. Freeman, et.al, Comparison of optical emission from nanosecond and femtosecond laser produced plasma in atmosphere and vacuum conditions, *Spectrochim. Acta, Part B* **87** (2013) 43.
- [58] A.M. Azzeer, A. S. Al-Dwayyan, M. S. Al-Salhi, A. M. Kamal, M. A. Harith, Optical probing of laser-induced shock waves in air, *Appl. Phys. B* **63** (3) (1996) 307.
- [59] <http://www.nist.gov>.
- [60] S.S. Harilal, G.V. Miloshevsky, et.al, Experimental and computational study of complex shockwave dynamics in laser ablation plumes in argon atmosphere, *Phys. plasma* **19** (2012) 083504.
- [61] Annemie Bogaerts, Zhaoyang Chen, Davide Bleiner, Laser ablation of copper in different background gases: comparative study by numerical modeling and experiments, *J. Anal. At. Spectrom* **21** (2006) 384–395.