

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

مسعود پیشدست<sup>\* (</sup>، عبداله اسلامی مجد<sup>(</sup>، مسعود کاوش تهرانی<sup>۲</sup> ۱. گروه الکترونیک، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، صندوق پستی: ۱۷۷٤-۱۵۸۷۵، تهران ـ ایران ۲. پژوهشکده علوم و فنآوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، صندوق پستی: ۱۵/۸۳۱٤۵، اصفهان ـ ایران

چکیده: در این پژوهش اثر گازهای پیرامونی هوا، آرگون، هلیم و نئون در فشارهای مختلف بر تابش و گسترش پلاسمای حاصل از برهم کنش باریکهی لیزر با هدف فلزی، با تأکید بر بهینه سازی نسبت سیگنال به تابش پیوستار به روش بیناب نمایی فروشکست القایی لیزری و جذب و پراکندگی پرتو کاوش بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که تابش ها و گسترش پلاسما به نحو قابل توجهی به نوع و فشار گاز پیرامون وابسته است. بیش ترین شدت خطوط نشری اتم مس به ترتیب برای گازهای آرگون، نئون، هوا و هلیم به دست آمده است. برای تمام گازها با افزایش فشار گاز پیرامون از ۵ فشار، روندی افزایشی دارد و به ترتیب برای گازهای آرگون، نئون و هلیم به دست آمده است. برای تمام گازها با افزایش فشار گاز پیرامون از ۵ فشار، روندی افزایشی دارد و به ترتیب برای گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم بیش ترین مقدار را دارد. نسبت تابش طیفی به پیوستار زمینه به ترتیب برای گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون بیشینه است و برای تمام گازها با افزایش فشار کاهش می یابد. نتایج حاصل از گسترش پلاسما به روش جذب و پراکندگی پر تو کاوش با نظریه سدف - تیلور مقایسه شد. سرعت گسترش پلاسما در نزدیکی سطح هدف در حضور گاز هلیم دو ف رو پراکندگی پر تو کاوش با نظریه سدف - تیلور مقایسه شد. سرعت گسترش پلاسما در نزدیکی سطح هدف در حضور گاز های از سطح به شدت برابر با ۲۵۲۰۰۳/۲۰ و در حضور گازهای نئون، هوا و آرگون به ترتیب ۱۳۹۵ و ۱۳۹۰ به ۲۵۰۰۰ به در می در خاص از مست به ست افت کرده و در فاصله ۳۸۳ از سطح برای گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون به ترتیب ۱۳۵۰ و ۲۵۰۰۰ به دست آمد که با دور شدن از سطح به شدت

کلیدواژه ها: پلاسمای لیزدی، گاز پیرامونی، جذب و پراکندگی پرتو کاوش، بیناب نمایی فروشکست القایی لیزدی

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

M. Pishdast<sup>\*1</sup>, A. Eslami Majd<sup>1</sup>, M. Kavosh Tehrani<sup>2</sup>

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 presure. 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 singnal to backgrourd (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



#### ۱. مقدمه

امروزه به دلیل کاربردهای فراوان برهم کنش لیزر و ماده از قبیل لايهنشاني [1]، ساخت نانو ذرات [۲]، ماشين كاري دقيق [۳]، جراحي [۴]، آنالیز مواد، بینابنمایی فروشکست القایی لیزری(۱) (LIBS) [۵] و چشمه های نوری پرتو ایکس بـرای لیتـو گرافی و میکروسکویی [۶، ۷]، مطالعهی دقیق فرایندهای پیچیدهی حاصل از آن و همچنین عوامل مؤثر بر ایـن فراینـدها از اهمیـت ویـژهای برخوردار است. به طور کلی این عوامل به سه دسته عوامل پیرامونی (نظیر نوع، فشار و دمای گاز)، ویژگی،های باریکهی فرودی و همچنین نوع و شرایط ماده ی هدف، بستگی دارند [٨-١٩]. در مقایسه با شرایط خلا، برهم کنش لیزر با ماده در حضور گاز پیرامون، به دلیل پدیدههایی نظیر کاهش کندگی، ایجاد موج ضربه، کند شدن و محصورسازی پلاسما، نفوذ و برخورد گونه های موجود در پلاسمای گسترش یابنده و گاز پیرامون بسیار پیچیدہتر است [۲۰-۲۲]. زمانی که پالس پرانرژی لیزر با شاری بیش از آستانهی کندگی ماده به هدف برخورد کند، پیوندهای شیمیایی شکسته می شوند و ابری از الکترون ها، ذرات خنثي، يونها و مولكولها پديد مي آينـد [١، ٢٣]. ايـن ابـر داغ ذرات پرانرژی، با سرعت بالا در گاز زمینه گسترش می یابد و تابش و موج ضربه<sup>(۲)</sup> تولید می کند. یاسو و همکاران در سال ۱۹۹۰ میلادی، اثر فشار گازهای آرگون، هوا و هلیم را بر تبخیر و تابش اتمی پلاسمای حاصل از برهم کنش لیزر با آلیاژ آلومینیم و آهن بررسی نمودند و بیش ترین تابش اتمی و دمای پلاسما را برای گازهای آرگون، هوا و هلیم گزارش کردند [۲۴]. اثر فشار این گازها در محدودهی ۱۰ تا ۷۶۰Torr بر پلاسمای مس حاصل از برهم کنش با لیزر اگزایمر در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط لی و همکاران مطالعه و بیشینه شدت تابش نشری در فشار ۱۰Torr برای آر گون و هوا و ۵۰Torr برای هلیم مشاهده شده است [۲۵]. هاریلال و همکاران در سال ۱۹۹۸ اثر گاز پیرامونی بر دما و چگالی پلاسمای حاصل از برهم کنش لیزر با کربن را در فشارهای <sup>۵</sup>-۱۰ تا ۱۰mbar بررسی کردند و نشان دادند که دمای پلاسما در گازهای به ترتیب آرگون، هلیم و هوا بالاترین مقدار را دارد که با افزایش فشار، دما ابتدا افزایش و سپس کاهش مییابد [۲۶]. تأثیر گازهای هلیم، آرگون و هوا در فشار اتمسفر بر چگالی و دمای پلاسمای حاصل از برهم کنش لیزر و فـولاد در

۱۹۹۹ میلادی توسط آگویلرا گزارش شده است [۲۷]. در سال ۲۰۰۶ نیز هاریلال اثرات گاز پیرامونی را بر دینامیک پلاسمای قلع حاصل از برهم کنش با لیزر گزارش نمود [۲۸]. در سال ۲۰۱۰ اثر شرایط پیرامونی بر گسترش و تابش پلاسمای آلومینیم بررسی شد [۲۹]. شازیا و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی اثر فشار در محدودهی ۵۰ تا ۷۶۰Torr و نوع گاز پیرامونی (آرگون، هوا و هلیم) را بر بینابنمایی و ریختشناسی سطح کادمیم در برهم کنش با لیزر بررسی نمودند [۳۰]. نظر و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی، اثر این گازها در فشار ۵۰ تا ۷۶۰Torr را بر تابش پلاسمای لیزری مس بررسی نموده و نشان دادند که بیش ترین تابش طیفی پلاسما به ترتیب برای گازهای آر گون، هوا و هلیم در فشارهای ۲۰، ۵۰ و ۱۰Torr به دست می آید و دما و چگالی الكتروني يلاسما نيز به همين ترتيب در اثر حضور اين گازها دارای بیش ترین مقدار هستند [۳۱]. در سال ۲۰۱۳ میلادی، اگنس و همکاران در تحقیقی مشابه نشان دادند که در برهم کنش ليزر فمتوثانيه با هدف آلومينيم در حضور گازهاي مختلف، بيش ترين تابش طيفي، دما و چگالي الكتروني پلاسما بـه ترتيب برای گازهای آرگون، هوا و هلیم رخ میدهد [۳۲]. چان و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی، اثر گاز پیرامونی آر گون و هوا را بر تابش و ریخت شناسی فیلم ناز ک <sup>(۳)</sup> CIGS بررسی نمودند [۳۳]. سیدرا و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی، اثر گازهای آرگون، هلیم، اکسیژن، ازت، دیاکسید کربن و ترکیب برخی از آنها را بر پلاسمای تانتالوم حاصل از برهم کنش با لیزر بررسی نمودند و نشان دادند که دما، چگالی الکترونی و تـابش پلاسـما 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 پلاسمای آلومینیم را در دو گاز هلیم و آر گون و در فشارهای مختلف شبیه سازی نمودند [۳۵]. در سال های گذشته با پیشرفت فن آوری لیزرهای پالسی پُرتوان، پژوهش های گستردهای نیز در زمینهی گسترش پلاسما در خلاً و در حضور گاز پیرامونی انجام شده است [۳۶-۴۰]. تولید پلاسما و گسترش موج ضربهی حاصل از آن برای گازها [۴۱، ۴۲، ۴۳]، مايعات [۴۴، ۴۵، ۴۶] و جامدات [۴۱، ۴۷] به طور تجربي و نظری بررسی شده است. مطالعهی رفتار مشخصه های دینامیکی موج ضربهی تولید شده، به در ک بهتر فرایندهای پیچیدهی

مختلف رخدهنده در برهم کنش لیزر و ماده کمک می کند. به علاوه در فن آوری گداخت هستهای، شیمی، مهندسی، بیولوژی و پزشکی مفید خواهد بود [۴۸، ۴۹]. گسترش پلاسمای آهن در برهم کنش با لیزر در سه فشار مختلف گاز آرگون با روش تصویربرداری <sup>(۴)</sup> ICCD توسط محمود و همکاران در سال ۲۰۰۹ انجام شده است [۵۰]. این گروه در آزمایش مشابهی در سال ۲۰۱۰ میلادی، گسترش پلاسمای 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 برهم کنش لیزر و هوا استفاده نمودند [۵۲]. در این روش به دلیل استفاده از لیزر پیوسته هليم نئون به عنوان پرتو كاوش، نياز به همزمانسازي ميان ليزر فرودي و زمان تصويربرداري وجود ندارد و همچنين به جاي 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 تـابش[تمرکـز بـر بهینهسازی نسبت تابش طیفی به تابش پیوستار زمینه (S/B)] و گسترش پلاسمای حاصل از برهم کنش لیزر با هدف فلـزی بـوده است که نتایج آن در لایهنشانی لیزری فیلم نازک، فن آوری 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 تابش های پلاسما بررسی گردید تا نوع و فشار بهینه برای دست یابی به بیش ترین مقدار نسبت سیگنال به تابش پیوستار زمینه که برای کاربردهای طیفسنجی فروشکست القایی لیزری حیاتی است، به دست آید. به جای استفاده از روش های معمول مطالعهی گسترش پلاسما نظیر تداخل سنجی، هولو گرافی، سایهنگاری و یا عکسسبرداری سریع پلاسما [۵۳–۵۸، ۲۱] که با وجود کار آمد بودن از لحاظ فنی مشکل هستند و به دلیل نیاز به اجزای اپتیکی و دوربین های خاص پرهزینه هستند، از روش ساده و مؤثر جذب و پراکنـدگی پرتـو كاوش توسط پلاسما براي اندازه گيري سرعت گسترش پلاسما استفاده و نتایج تجربی با مدل موج ضربه سدف- تیلور (۵) مقایسه شده است.



## ۲. چیدمان تجربی

برای مطالعات تجربی این پیژوهش، از لیزر Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴nm، پهنای پالس ۲۸ns استفاده شد و شدت باریکهی لیزر در سطح هدف در حد <sup>۲</sup>-GW/cm است. گازهای محیطی هوا، آر گون، 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 ناهمواری ها، سطح هدف به دقت پرداخت و سپس توسط اَسِتُن 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 ۷٫۵cm بر روی هدف، کانونی شد. با توجه به واگرایی mrad ۱≈۹ در باریکهی لیزر،  $D = t\sqrt{tf\theta} \approx trum$ قطر لکهی لیزر در سطح هدف در حد  $D = t\sqrt{tf\theta} \approx trup$ محاسبه شد. مقدار اندازه گیری شده توسط میکروسکوپ در حدود ۲۳۰μm است که دلیل این اختلاف، قرار دادن نمونه قبل از موضع کانونی شدن باریکهی لیزر است. برای ثبت تابش پلاسما در طولموجهای مختلف، یک بینابنمای نوری در آزمایشگاه ساخته شد. به منظور انتقال تابش های پلاسما به بینابنما، از فیبر نوری پلاستیکی با قطر هستهی ۱mm در فاصلهی حدود ۳mm از سطح هدف استفاده شد. تابش پلاسمای خارج شده از فيبر نورى، ابتدا بر روي يک آينهى سهموى و سپس تورى نورى ۱۱۰۰ lin/mm به منظ ور تفکیک طیفی تابانده و پرتوهای پراشیده به کمک عدسی بر روی سطح حساس دوربینی با فرمانپذیری خارجی و زمان نورگیری حدود ۱۰۰۹s ارسال شدند. برای تنظیم زمان مناسب میان آغاز تابش لیزر و لحظهی راهاندازی دوربین، از یک تأخیردهندهی الکترونیکی با تفکیک زمانی ۱µs هماهنگ با راهانداز سوییچ Q لیزر استفاده شد. سرعت گسترش پلاسما نیز با استفاده از روش جذب و پراکندگی ليزر هليم نئون توسط پلاسما اندازه گيري شد.

برای این منظور مطابق با سمت راست شکل ۱، پرتو لیزر پیوستهی کاوش هلیم- نئون، با توان ۲mW و طول موج ۶۳۲/۸nm، به طور موازی با سطح هدف در فاصله مشخص از آن و عمود بر پرتو برهم کنش کننده از سطح هدف عبور می کند



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

و به کمک آینهی تخت، به آشکارساز نوری هـدایت مـیشـود. برای باریک نمودن پرتو هلیم-نئون و اندازه گیری دقیق تر فاصلهی آن از سطح نمونه و در نتیجه افزایش دقت بر آورد سرعت پلاسما، از دو عدسی همگرا استفاده گردید. برای جلوگیری از ورود پرتوهای پراکنده شده لیزر برهم کنش کننده به آشکارساز نوری، از مجموعهی سه فیلتر نوری با عبوردهی کمتر از ۱٪ در ۱۰۶۴nm و یک روزنه به قطر ۳mm 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، لیزرکاوش به صورت اُفت دامنیهی سیگنال باریکیهی کاوش بر روی صفحه نمايش گر أسيلوسكوپ تكترونيكس مدل TDS3052B قابل مشاهده است. با این چیدمان، امکان اندازه گیری سرعت گسترش پلاسما در چندین نقطه با فاصلههای مشخص از مکان برهم کنش میسر شد. به منظور افزایش صحت اندازه گیریها، نتایج ارائه شده از میانگین گیری بر روی دست کم پنج بار اندازه گیری به دست آمده است.

یکی از نظریه های گسترش پلاسما در برهم کنش لیزر و ماده، نظریه ی موج ضربه<sup>(\*)</sup> است. برای توصیف امواج کُروی ضربه، می توان از نظریه ی سدف – تیلور استفاده نمود [۵۸] که مبنای آن انفجار نقطه ای است. در صورتی که مقدار قابل توجهی از انرژی به طوری ناگهانی در یک نقطه از فضا تخلیه شود، یک موج فیرخطی به نام موج ضربه ایجاد می شود و در محیط گسترش می یابد. این موج ضربه در حین گسترش، جرم گاز پیرامون را به گونه ای جاروب می کند که  $m < <_m$  است. است. است و m به تر تیب می یابد. این موج ضربه در حین گسترش، خرم گاز پیرامون را به می یابد. این موج ضربه در حین گسترش، خرم گاز پیرامون را به مونه ای گاز پیرامون و منشأ انرژی (جرم کندگی) هستند. زمانی موج ضربه و n فشار گاز پیرامون است. براساس این نظریه، مکان ضربه ی حاصل از انفجار نقطه ای  $R_s$  با گذشت زمان طبق مکان ضربه ی حاصل از انفجار نقطه ای  $R_s$  با گذشت زمان طبق

$$R_{\rm S} = \xi_{\rm o} \left(\frac{E_{\rm S}}{\rho}\right)^{1/2} t^{\gamma_{\rm o}} \tag{1}$$

ې ثابت وابسته به  $\gamma$  است. ${}^{\hspace*{-0.5pt}\circ}_{\circ}$ 

$$\xi_{\circ} = \left(\frac{\mathfrak{o}}{\mathfrak{r}}\right)^{\mathfrak{r}_{\circ} \mathfrak{o}} \left(\frac{\mathfrak{r}}{\mathfrak{s}\pi}\right)^{\mathfrak{r}_{\circ} \mathfrak{o}} \left(\frac{\gamma+\mathfrak{r}}{\mathfrak{r}}\right)^{\mathfrak{r}_{\circ} \mathfrak{o}}$$
(7)

 $\gamma$  نسبت ظرفیت گرمایی ویژه گاز،  $E_s$  انرژی منجر به کندگی (حدود ۷۰٪ انرژی لیزر [۵۰]) و  $\rho_1 = \beta$ چگالی گاز زمینه هستند و از چسبندگی و سرمایش تابشی صرفنظر می شود. در این نظریه، یک هسته با فشار بالا و چگالی کم، پوستهی نازک و فشرده شده را به جلو می راند. بستگی زمانی <sup>۲۰</sup> t در معادلهی (۱) اهمیت چشم پوشی از سرمایش تابشی در حضور گاز پیرامونی با چگالی کافی را نشان می دهد. در صورت قابل توجه بودن سرمایش پلاسما، نظریهی فشار راهانداز برف روب<sup>(۷)</sup> ( <sup>۲۰</sup> t)، یا پایستگی تکانهی برف روب<sup>(۸)</sup> برقرار خواهد بود.

#### ٤. نتايج و بحث

1.2 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 ۵۱۵/۳۲nm) 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 ۲.** الف) شدت تابش خط اتمی پلاسمای مس، ب) شدت تابش پیوستار به ازای گازها و فشارهای مختلف.

استفاده شده، شدت تابش خطوط اتمی از فشار ۵ تا حدود ۱۰۰ mbar افزایش می یابد و سپس تا فشار اتمسفر روند کاهشی از خود نشان می دهد. در مراجع [۳۱، ۳۲] 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 بر خورد ذرات پلاسما، انتقال بخشی از انرژی گاز پیرامونی به پلاسمای 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.

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 اتمهای گاز پیرامونی در فشارهای بالا، نرخ رشد انرژی الکترونهای آزاد ناشي از پديدهي جذب برمشترالانگ معكوس را كاهش داده و باعث كاهش دما و چگالي الكتروني پلاسما مي 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 شكل ٢. الف، بيش ترين 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 همچنین هدایت گرمایی متفاوت این گازها است. میزان اتلاف انرژی یلاسما به دلیل برخوردهای کشسان و ناکشسان الکترونها با اتمهای گاز پیرامونی در حضور گازهای با نسبت E/M بزرگ تر (کــه M وزن اتمــى و E اولـين انـرژى يـونش اســت)، بیش تر است [۲۶، ۳۱، ۳۲]. همچنین هدایت گرمایی گاز يراموني نقش به سزايي در اتلاف انرژي پلاسما دارد. در جدول ۱ مشخصههای چهار گاز آرگون، هلیم، نئون و هوا ارائه شده است. کمترین وزن اتمی و همچنین بیش ترین نسبت E/M و هدایت گرمایی به ترتیب متعلق به هلیم، نئون، هوا و آرگون است. تأثیر نـوع گـاز پیرامـونی و فشـار آن بـر تـابش پیوسـتار پلاسـما در شکل ۲. ب نشان داده شده است. بیش ترین مقدار تابش پیوستار پلاسما به ترتيب در حضور گازهاي آرگون، هوا، نئون و هليم مشاهده می شود. همچنین با افرایش فشار گاز پیرامون تا ۲۰۰mbar تابش پیوستار مستقل از نوع گاز به شدت افزایش مییابد و سپس اشباع میشود. دو سازو کار عمدهی 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 رابطهی زیر به دست می آید [۳۵]:

$$I_{\text{brems}}(\nu) = \frac{n_{\text{e}} e^{\gamma}}{\gamma \epsilon \pi^{\gamma} c^{\gamma} \varepsilon_{\circ}^{\gamma} m_{\text{e}} h} \frac{h}{K_{\text{B}} T} \sqrt{\frac{K_{\text{B}} T}{m_{\text{e}}}} e^{-\frac{h\nu}{K_{\text{B}} T}} \sum_{m} n_{\text{m}} z_{\text{m}}^{\gamma}$$
(**Y**)



جدول ۱. مشخصه های فیزیکی گازها [۵۹، ۵۹]

هوا	نئون	هليم	آر گون	گاز
۲۸,۹۶	۲۰٫۲	۴	۳٩,٩۵	وزن اتمی (مولکولی) (M)(gr/mol)
۱۵٫۵۸	21,08	14,09	10,79	انرژی یونش (eV) (E)
• ۵۲	١,•٧	۶,۱۴	٠,٣٩	نسبت <i>E/M</i>
۶۲,F۰	117	36.79	47,0V	هدایت گرمایی (``cals <sup>-`</sup> deg <sup>-`</sup> cm)
۱,۴	1,9990	1,897	1,894	نسبت ظرفیت گرمایی ویژه
•/٩•٣٨	·,91VA	.,1748	1,7409	°چگالی (kg/m <sup>۳</sup> ) در فشار v۵۰ mbar

که در آن، c سرعت نور، m<sub>m</sub> m<sub>e</sub> و n<sub>m</sub> به ترتیب جرم الکترون، چگالی های یونی و الکترونی میباشند. <sub>i</sub> z و *S* نیز عدد اتمی و گذردهی خلأ هستند. با توجه به این که بالاترین دما و چگالی الکترونی پلاسما به ترتیب در حضور گازهای آرگون، نئون، هوا و هلیم ایجاد می شود و نیز انرژی یونش گاز آرگون پایین ترین و هلیم بالاترین مقدار را مطابق با جدول ۱ دارد، منطقی به نظر می رسد که تابش پیوستار پلاسما در حضور گاز آرگون بیشینه و در حضور هلیم کمینه باشد.

نسبت S/B با استفاده از قله شدت سه خط طیفی اتم مس، I<sub>P</sub> و میانگین شدت تابش زمینه، I<sub>b</sub>، در دو سوی خطوط طیفی، طبق رابطهی زیر محاسبه گردید:

$$S / B = \frac{I_{\rm P} - I_{\rm b}}{I_{\rm b}} \tag{(f)}$$

شکل ۳ رفتار S/B خط نشری اتمی ۵۲۱٬۸۲nm مس را برای گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم در فشارهای ۵ تا ۱۰۰۰mbar نشان میدهد. بیش ترین مقدار S/B به ترتیب برای گازهای هوا، نئون، هوا و آرگون مشاهده می شود. هم چنین برای گازهای هوا، آرگون، هلیم و نئون بیش ترین مقدار S/B به ترتیب در فشارهای ۱۰، ۵، ۱۰ و ۲۰mbar مشاهده شد. سایر خطوط اتمی نیز رفتار مشابهی نشان دادند.

### ۲.٤ اثر نوع گاز پیرامونی بر گسترش پلاسما

روش های معمول بررسی گسترش پلاسمای لیزری و اندازه گیری سرعت انتشار آن، پُرهزینه و مشکل هستند. در پژوهش حاضر، از جذب و پراکندگی پرتو لیزر هلیم نئون توسط پلاسما به منظور آشکارسازی مکان پلاسما استفاده شد. مطابق شکل ۴. الف، باریکهی لیزر کاوش هلیم – نئون با تغییر مکان عدسی در چندین



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



**شکل ٤.** الف) لبه پلاسما در فاصلههای مشخص ۵، ۵، ۳، ۹، ۹، باریکه لیزر هلیم- نئون را قطع می کند، ب) نمودار بالایی (بنفش): تغییرات زمانی شدت باریکه لیزر کاوش، فرورفتگی و اُفت سیگنال ناشی از جذب باریکهی کاوش در پلاسما در لحظه رسیدن پلاسما به موضع باریکهی کاوش در راست نمودار مشاهده می شود. نمودار پایینی (فیروزهای) سیگنال مربوط به باریکهی لیزر برهم کنش.

نقطه و در فاصله های ۵/۵ تا ۶۳۳۳ از هدف تنظیم و به آشکارساز دیود بهمنی هدایت گردید. زمانی که جبهه موج ضربه با باریکهی 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. لحظهی t در نمودار بنفش شکل ۴. ب (نمودار بالا)، زمان رسیدن جبهه ی پلاسما به باریکهی هلیم- نئون و قلهی مشاهده شده در نمودار فیروزهای رنگ (نمودار پایین)، پالس لیزر برهم کنش را نشان می دهند که به جای مبدأ زمان در اندازه گیری ها استفاده شده است.

مکان جبههی پلاسما برحسب زمان (R-t) در برهم کنش لیزر با هدف مس در حضور گازهای هوا، هلیم، آرگون و نئون با فشار ۷۵۰mbar در شکل ۵. الف تا ۵. د ترسیم و رفتار مکان- زمان جبههی 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 جبههی پلاسما از سطح در گازهای آرگون و هوا، سرعت گسترش آن کند شده و از نظریمی سدف دور می شود و به ناحیمی فشار راهانداز ېرفروب نز ديک مي شود که نشان دهنده ي افت انر ژي په دليل تابش است و تابش بیش تر پلاسما در گازهای آر گون و هوا را تأييد مي كند. موج ضربه در گاز نئون نيز تقريباً به صورت منطبق بر نظریهی سدف به حرکت خود ادامه میدهد. گسترش موج ضربه در گاز هلیم به دلیل تابش ناچیز و چگالی کمتر آن به نظریهی انتشار آزاد پلاسما در محیط نزدیک میشود. سرعت گسترش جبههی یلاسما در فاصله ۰٫۵ تا ۶mm از سطح هدف برای گازهای آرگون، هلیم، هوا و نئون در شکل ۶ رسم شده است. سرعت گسترش یلاسما به ترتیب در گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون دارای بیش ترین مقدار است که طبق جدول ۱ دلیل آن ترتیب کوچکی وزن اتمبی این گازها و در نتیجه محصورسازی کمتر یلاسما است. سرعت گسترش یلاسما در حضور گازهای مختلف و در نزدیکی سطح هدف اختلاف چشمگیری دارد و با دور شدن از سطح و اُفت انرژی موج ضربه، به یکدیگر نزدیک میشوند. در نزدیکی سطح، این سرعت برای گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون به ترتیب برابر ۲۵۲۰۰، ۱۵۶۲۵، ۱۳۹۰۰ و ۱۱۸۶۰m/s و در دورترین نقطهی اندازه گیری شده برابر ۲۵۵۰، ۱۰۰۰، ۷۰۰ و ۶۹۰m/s به دست آمد. به دلیل چگالی کمتر هلیم، جبههی پلاسما در حضور این گاز با سرعت

مرح بیش تری حرکت میکند و به مدل گسترش آزاد پلاسما که در شرایط محیط خلأ رخ میدهد، نزدیک تر است.



**شکل 0.** نمودار مکان-زمان (*R*-t) برای جبهه موج ناشی از پلاسمای مـس بـرای گازهای، الف) هوا، ب) هلیم، ج) آرگون و د) نئون در فشار v۵۰ mbar.





**شکل ٦.** سرعت گسترش پلاسمای مس حاصل از برهم کنش با باریکهی لیزر در فاصلههای مختلف از سطح هدف در حضور گازهای هوا، آر گون، نئون و هلیم در فشار ۷۵۰mbar.

در مرجع [۶۰] با استفاده از روش های سایه نگاری و تصویربرداری سریع، سرعت گسترش پلاسما در برهم کنش لیزر Nd:YAG با هدف آلومینیم، برای پهنای پالس ۶ns با انرژی ۱۰۰mJ در گاز آر گون در فشار ۱atm در فاصله ی جدود ۱٬۵mm از هدف برابر با ۵۳۰۰m/s گزارش شده است که با سرعت حدود ۴۰۰۰m/s اندازه گیری شده در پژوهش حاضر سازگار است. در شبیه سازی انجام شده در مرجع [۶۱]، سرعت گسترش پلاسمای مس (در لحظات اولیه در حد ۱۰۰ns) در گاز پیرامونی هلیم با فشار ۱atm حدود ۲٫۵ برابر سرعت گسترش پلاسما در حضور گاز آرگون گزارش شده است که به نسبت ۲٫۲ به دست آمده در این پژوهش بسیار نزدیک است. هـمچنـین در مرجع [۵۵]، سرعت گسترش پلاسما در برهم کنش لیزر Nd:YAG با بیشینه شدت ''W.cm' با هدف مس در هوا با فشار ۱atm با استفاده از روش سایهنگاری از بـازهی زمـانی ۲۰ تا ۲۵۰ns مطالعه شده است که در فاصله ی حدود ۲mm از سطح هدف، سرعت گسترش پلاسما در حد ۸۰۰۰۰m/s است با سرعت حدود ۳۵۰۰m/s گزارش شده در این مقاله، ساز گاری مناسبی از خود نشان میدهد. اختلاف جزیبی در سرعتهای گزارش شده، ناشی از تفاوت شدت لیزر برهم کنش و همچنین فشار گاز محیطی است. نتایج تجربی نشان میدهند که روش جذب و پراکندگی پرتو کاوش در عین سادگی و هزینه یکم،

می توانـد بـه عنـوان روشـی مـؤثر در مطالعـهی گسـترش پلاسـما استفاده شود.

٥. نتيجه گيري

در پژوهش حاضر، اثر نوع و فشار گازهای پیرامونی آرگون، هوا، نئون و هلیم بر تابش ها (تمر کز بر نسبت S/B) و گسترش پلاسمای حاصل از برهم کنش باریکهی کانونی شدهی لیزر پالسی Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴nm با هدف مس مطالعه شده است. نتایج نشان دادند که نوع و فشار گاز پیرامونی، تأثیر به سزایی بر شدت تابش خط اتمی، تابش پیوستار، نسبت S/B و گسترش پلاسما دارد. شدت تابش خطوط اتمی مس در پلاسمای ایجاد شده، به ترتیب در گازهای آرگون، نئون، هوا و هلیم بیش تر است. بالاترین شدت در گازهای آرگون، هوا، نئون و هلیم به ترتیب در فشارهای ۷۰، ۱۰۰، ۴۰ و ۳۰mbar مشاهده شد. برای هر چهار گاز مورد اشاره، این شدت خط از فشار ۵ تا حدود ۱۰۰mbar افزایش می یابد و سپس تا فشار اتمسفر روند کاهشی دارد. همچنین با افزایش فشار گاز پیرامون تا ۲۰۰mbar، تابش پیوستار مستقل از نوع گاز به شدت افزایش می یابد و سپس اشباع می شود. 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 ۲۰mbar مشاهده گردید. از روش ساده جذب و پراکندگی پرتو کاوش برای اندازه گیری سرعت گسترش پلاسما استفاده و نتايج تجربي حاصل با نظريه ي سدف مقايسه شدند. گسترش پلاسما در تمام گازها و در زمانهای کوچکتر از ۱۰۰ns که موج ضربه در محیط گسترش مییابد و اُفت انرژی پلاسما ناچیز است، با نظریهی سدف منطبق است. با گذشت زمان و دور شدن جبهه ی پلاسما از سطح در گازهای آر گون و هوا، سرعت گسترش پلاسما کند شده و از نظریهی سدف دور می شود و به ناحیهی فشار راهانداز برفروب نزدیک میشود که نشاندهندهی أفت انرژی پلاسما به دلیل گسترش، تابش و هدایت گرمایی است. موج ضربه در گاز نئون نیز تقریباً به صورت منطبق بر نظریهی سدف به حرکت خود ادامه میدهد. گسترش موج ضربه در گاز هلیم به دلیل تابش ناچیز پلاسما و وزن اتمی کوچک تر هلیم به نظریهی انتشار آزاد پلاسما در محیط نزدیک تر است.



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. Watanable, 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- $\alpha$  and He- $\alpha$  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. Nampoori, 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 هلیم، نئون، هوا و آرگون دارای بیش ترین مقدار است. در نزدیکی سطح هدف، سرعت برای گازهای هلیم، نئون، هوا و آرگون به ترتیب سرعت برای کازهای ۱۳۹۰۰ و ۱۸۶۰۳۱۶ و در دورترین نقطیه، اندازه گیری شده برابر با ۲۵۵۰، ۱۰۰۰ ، ۷۰۰ و ۶۹۰۳۳۶ به دست آمد. نتایج حاصل نشان میدهند که روش جذب و پراکندگی پرتو کاوش در عین سادگی و هزینه بسیار کم، می تواند به عنوان روشی مؤثر در مطالعهی گسترش پلاسما استفاده شود.

پینوشتھا

- 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. Ghezelbash, 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] Wolfganf Sdorra, Key Neimax, Basic investigations for laser microanalysis: III. Application of different buffer gases for laserproduced 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. Arag\_on, 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, *Spectrochem. 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 laserproduced 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, Laserinduced 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.

Ð

[36] D.B. Geohegan, A.A. Puretzky, 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. Palleschi, 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 twoframe 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. Gegiuc, 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.