

مشخصه‌یابی و مقایسه ضرایب پلاسمای لیزری با روش ردیاب لانگمیر در فشارهای پایین اتمسفر

نادر مرشدیان^۱، فرشته شاهوردی^۲ و امیر حسین فرهد^۳

۱. پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای - پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲. گروه فیزیک، دانشگاه آزاد، واحد تهران مرکز، تهران

۳. پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

پست الکترونیکی: nmorshed@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۲/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۸/۱۸)

چکیده

در این پژوهش، پارامترهای پلاسمای تولید شده در میدان لیزر نانو ثانیه، نظیر دمای الکترونی، چگالی یون و همچنین سرعت یون در فشارهای مختلف گاز محیط به وسیله تک ردیاب لانگمیر مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از منحنی مشخصه جریان-ولتاژ ردیاب، در فشارهای مختلف (بازه 5×10^{-5} تا 10 میلی‌بار) دمای الکترون در گستره $2-29$ eV و همچنین چگالی یونی از مرتبه 10^{13} cm^{-3} در مقیاس میلی‌متری و 10^{11} cm^{-3} در مقیاس سانتی‌متری از هدف تخمین زده شده است. در این روش جدا از مشخصه جریان-ولتاژ به دست آمده از ردیاب لانگمیر، با استفاده از زمان رسیدن بیشترین ذرات باردار (بیشینه سیگنال جریان) از لحظه تشکیل پلاسما می‌توان سرعت ذرات را در فاصله مشخصی از محل تشکیل پلاسما یا سطح هدف به دست آورد. اندازه‌گیری زمان‌های ثبت شده از پرواز الکترون‌ها و یون‌ها، سرعت آنها را از مرتبه 10^7 cm/s برای الکترون‌ها و 10^6 cm/s برای یون‌ها برآورد می‌کند. همچنین نتایج حاصل از این آزمایش با مقادیر به دست آمده در شرایط مشابه آزمایشگاهی به روش سایه‌نگاری مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای لیزری، ردیاب لانگمیر، زمان پرواز

۱. مقدمه

می‌دهد. در این زمان ذرات بلافاصله آزاد شده و پلاسما در مرز و سطح هدف ایجاد می‌شود. یکی از کاربردهای اصلی فیزیک پلاسمای لیزری همجوشی محبوس شده مانند^۲ است که رویکردی دیگر برای انرژی همجوشی هسته‌ای به شمار می‌آید [۱ و ۲]. از فیزیک پلاسمای لیزری در

مطالعه پلاسمایی که به وسیله لیزر تولید می‌شود^۱، یکی از رو به رشدترین زمینه‌های فیزیک حال حاضر به شمار می‌آید. وقتی یک پرتو قدرتمند لیزر به یک هدف جامد برخورد می‌کند، فرآیندهای گرمایی نظیر ذوب یا بخار رخ

۲. Inertial confinement fusion

۱. Laser produce plasma

رابطه (۱) نشان داده می‌شود

$$f(v)dv = ce^{-\frac{1}{2}mv^2/kT} dv, \quad (1)$$

می‌توان میانگین سرعت الکترون‌ها را طبق رابطه (۲) به دست آورد، در رابطه (۱)، T دمای ذرات، v سرعت ذرات، k ثابت بولتزمن و c ضریب نرمالیزاسیون است

$$\langle v_e \rangle = \left(\frac{\lambda k T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

در این رابطه T_e دمای الکترون و m_e جرم الکترون‌هاست. با ارایه معادله بولتزمن برای چگالی الکترون‌ها طبق رابطه (۳) داریم

$$n_e = n_0 \exp\left[\frac{eV_p}{kT_e}\right], \quad V_p > 0 \quad (3)$$

V_p پتانسیل الکتریکی پلاسما و n_e چگالی الکترون است. به کمک این معادله آماری می‌توان رابطه‌ای بین چگالی جریان الکترونی و دمای الکترون‌ها یافت

$$J_e = n_e e v_e, \quad (4)$$

$$I_e = I_{es} \exp\left[\frac{eV_p}{kT_e}\right], \quad (5)$$

که در آن I_{es} در رابطه (۵) جریان اشباع الکترونی می‌باشد.

در پلاسما تولید شده در میدان لیزری حرکت گرمایی ذرات باردار، وجود میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی داخل پلاسما سبب جریان ذرات باردار می‌شود. با اعمال ولتاژ بایاس به ردیاب لانگمیر می‌توان این جریان را اندازه‌گیری کرد و با رسم نمودار جریان بر حسب ولتاژ ردیاب مهمترین پارامترهای پلاسما از قبیل چگالی، دما و پتانسیل پلاسما را به دست آورد. بنابراین مهمترین مسئله در نظریه ردیاب لانگمیر تحلیل منحنی مشخصه I-V است. این منحنی شامل سه قسمت می‌باشد که عبارت‌اند از ۱- ناحیه اشباع الکترون^۴، ۲- ناحیه گذار الکترونی (انتقال)^۵ و ۳- ناحیه اشباع یونی^۶. با در نظر گرفتن قسمت اشباع الکترونی و منحنی نیمه لگاریتمی منحنی مشخصه I-V می‌توان دمای

زمینه‌های دیگری نظیر تغییر کیفیت مواد، جوشکاری و کنده‌کاری نیز استفاده می‌شود [۱]. بنابراین برای به دست آوردن فهم بهتری نسبت به فرآیندهایی که در پلاسما اتفاق می‌افتد، لازم است تا حد امکان پارامترهای پلاسما اندازه‌گیری شوند. به کمک روش‌های تشخیصی مختلف می‌توان پارامترهای پلاسما ناشی از برهم‌کنش لیزر با ماده را اندازه گرفت، مهمترین و شناخته‌ترین روش‌های مشخصه‌یابی اپتیکی، الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد که هر یک می‌توانند اطلاعات ارزشمندی را در مورد رفتار زمانی و فضایی پلاسما ارائه دهند. روش‌های اپتیکی نظیر تداخل‌سنجی^۱ و سایه‌نگاری^۲ در این زمینه، بیشتر به کار رفته است [۳-۷]. این روش‌ها بر روی تغییرات ضریب شکست بحث می‌کنند. از روش سایه‌نگاری برای اندازه‌گیری چگالی الکترونی و دمای پلاسما، همچنین به کمک روش تداخل‌سنجی چگالی الکترون تعیین می‌شود [۸ و ۹]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران از روش الکتریکی نظیر ردیاب لانگمیر^۳ به عنوان ابزار ساده و در عین حال مفید برای شناسایی پارامترهای پلاسما لیزری استفاده کرده‌اند [۹-۱۲]. همچنین به کمک این روش می‌توان صحت نتایج حاصل شده به روش‌های دیگر را مورد بررسی قرار داد. در روش ردیاب لانگمیر با اعمال ولتاژ بایاس به ردیاب و تحلیل منحنی مشخصه جریان بر حسب ولتاژ ردیاب می‌توان به چگالی و دمای پلاسما دست یافت [۵-۸]. در مقاله حاضر، نتایج حاصل از کاربرد ردیاب لانگمیر برای اندازه‌گیری دمای الکترون و چگالی ناشی از برخورد باریکه لیزر با هدف فلز آرایه و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مبانی نظری آزمایش

در پلاسما تعادلی، طبق تابع توزیع ماکسول-بولتزمن که با

۳. Electron saturation region

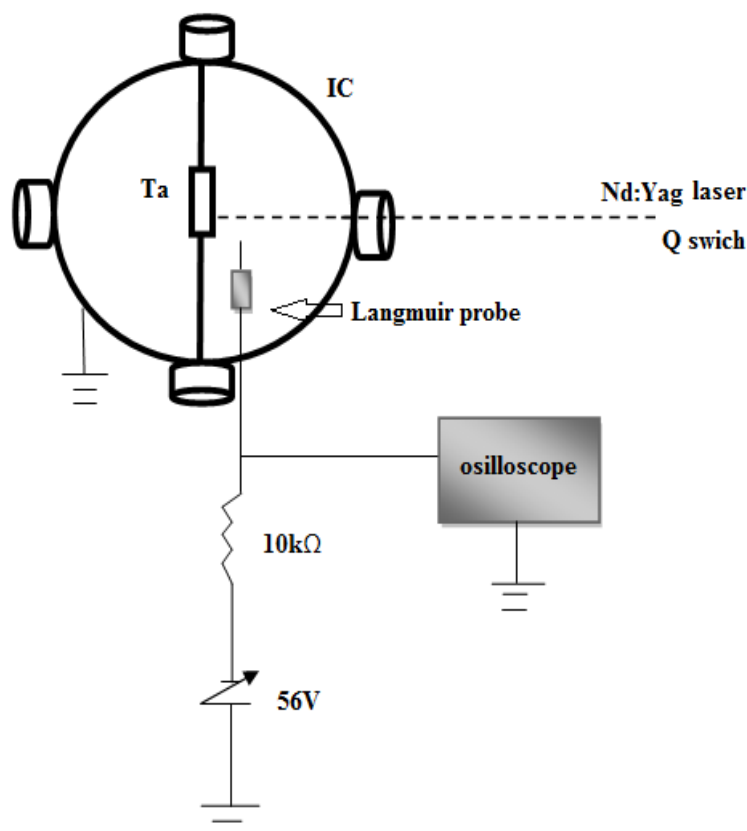
۴. Electron transition region

۵. Ion saturation region

۱. Interferometry

۲. Shadowgraphy

۳. Single Langmuir probe



شکل ۱. آرایش تجربی به کار رفته در آزمایش اندازه‌گیری پارامترهای پلاسمای به روش ردیاب لانگمیر.

۳. شرح آزمایش

برای انجام آزمایش، آرایش تجربی مطابق شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفت که شامل یک نوسانگر لیزر سوئیچ Q با طول تشدیدگر ۱۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. بسته به نرخ دمش محیط فعال، می‌توان انرژی در حدود ۴۰-۸۰ میلی‌ژول دریافت کرد. برای افزایش این انرژی پرتوی خروجی این نوسانگر از تقویت کننده‌ای به قطر ۹ میلی‌متر می‌گذرد و پس از تقویت با انرژی ۱۱۰ میلی‌ژول وارد محفظه برهم‌کنش شده و با عبور از عدسی L به فاصله کانونی ۷٫۵ سانتی‌متر بر روی هدفی از جنس فولاد به ضخامت ۳ میلی‌متر متمرکز می‌شود. شدت لیزر $10^5 \times 5$ وات بر سانتی‌متر مربع، انرژی هر پالس لیزر ۱۱۰ میلی‌ژول است. این نوسانگر به روش سوئیچ Q فعال تپ‌های با پهنای زمانی ۳۰ نانوثانیه ایجاد می‌کند. از چندین سوزن فولادی به ضخامت ۰٫۳۵ میلی‌متر که در

الکترون‌ها را از رابطه (۶) به دست آورد:

$$\frac{d \ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \quad (6)$$

در بیشترین ولتاژ بایاس منفی الکترون‌ها دفع و جریان یونی به اشباع می‌رسد. در این صورت طبق رابطه (۷) چگالی یون محاسبه می‌شود

$$I_{i(\text{sat})} = n_i e v_i A, \quad (7)$$

در این رابطه A مساحت ردیاب، $I_{i(\text{sat})}$ جریان اشباع یونی و v_i سرعت یون‌هاست، که از رابطه (۸) به دست می‌آید

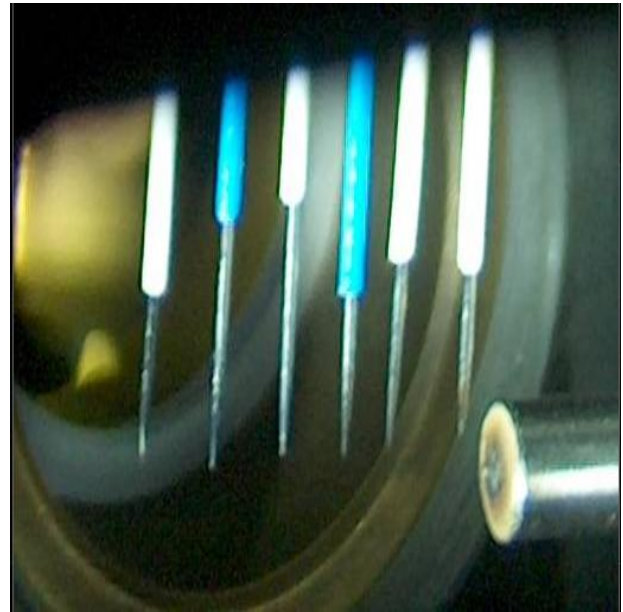
$$v_i = \frac{d}{t}, \quad (8)$$

d و t به ترتیب فاصله ردیاب از هدف و زمان قله سیگنال ردیاب هستند. از آنجایی که چگالی پلاسمای در ناحیه اندازه‌گیری محدود است با اعمال بیشتر ولتاژ بایاس مثبت به ردیاب لانگمیر، یون‌ها دفع و جریان الکترون‌ها افزایش می‌یابد و در ولتاژهای بیشتری نسبت به یون‌ها به اشباع می‌رسند.

۴. تحلیل داده‌های تجربی

با اعمال ولتاژ بایاس در گستره -۵۶ تا $+۵۶$ ولت می‌توان جریان ردیاب را به صورت تابعی از زمان ثبت، سپس نمودار جریان بر حسب ولتاژ ردیاب (منحنی $I-V$) رسم نمود. شکل (۳) نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافت شده در فشارهای ۳×10^{-4} و ۵×10^{-5} میلی‌بار برای جریان یونی و الکترونی نشان می‌دهند. همان گونه که مشاهده می‌شود سیگنال جریان الکترونی با قطبش منفی و سیگنال جریان یونی با قطبش مثبت روی نمودار اسیلوسکوپ نشان داده شده است. دامنه ولتاژ سیگنال‌های جریان الکترون بیشتر از یون است و سریع‌تر با ولتاژ بایاس تغییر می‌کند. همچنین میانگین زمان تخلیه جریان الکترونی در مقاومت حدوداً ۱۲ s و زمان تخلیه برای جریان یونی در حدود ۸ s می‌باشد. به کمک سیگنال‌های به دست آمده در ولتاژهای بایاس مختلف و تحلیل جریان و ولتاژ می‌توان نمودار جریان بر حسب ولتاژ را رسم نمود.

شکل ۴ و ۵ نمونه‌ای از منحنی مشخصه ($I-V$) به ترتیب در فشار ۳×10^{-4} و ۵×10^{-5} میلی‌بار به ترتیب در فاصله ۴ و ۱ میلی‌متری ردیاب از هدف را نشان می‌دهند. همان طور که قبلاً اشاره شد این منحنی از سه قسمت مهم تشکیل شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است. در دورترین قسمت سمت چپ نمودار، جایی که همه الکترون‌ها دفع شده‌اند ناحیه اشباع یون نامیده می‌شود. قسمتی از منحنی که جریان‌های الکترون و یون برابر (جریان کل صفر) هستند، پتانسیل شناور V_f نامیده می‌شود. در ناحیه انتقال، جریان یون قابل صرف نظر کردن است و الکترون‌ها به وسیله پتانسیل منفی V_p-V_s دفع می‌شوند. V_s پتانسیل پلاسما و V_p پتانسیل اعمال شده به ردیاب می‌باشد. در پلاسماهایی که ماکسولی باشد این قسمت منحنی به صورت نمایی است. با در نظر گرفتن قسمت اشباع الکترون نمودار جریان - ولتاژ ردیاب و رسم منحنی نیمه‌لگاریتمی، طبق روابط (۶) و (۷) دمای الکترون و چگالی یون با تغییر فاصله ردیاب از سطح هدف در فشارهای مختلف را می‌توان محاسبه کرد.

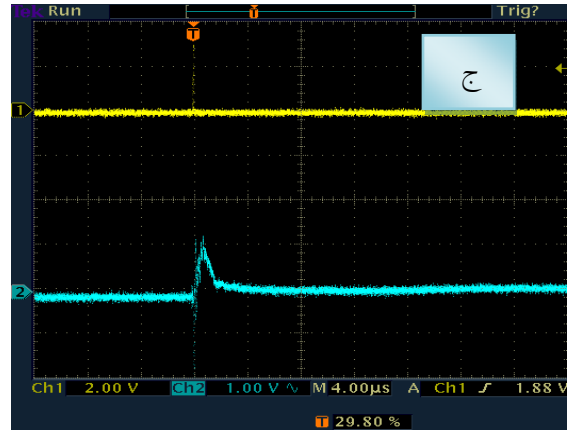
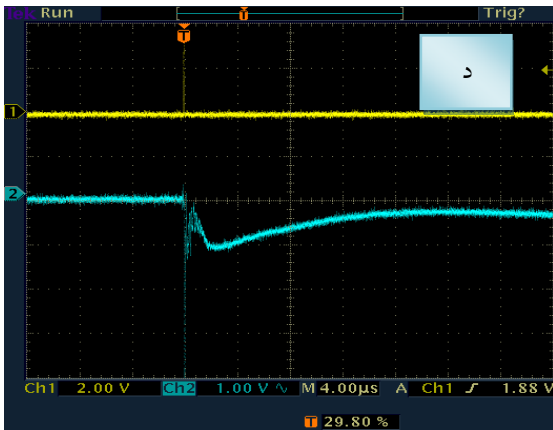
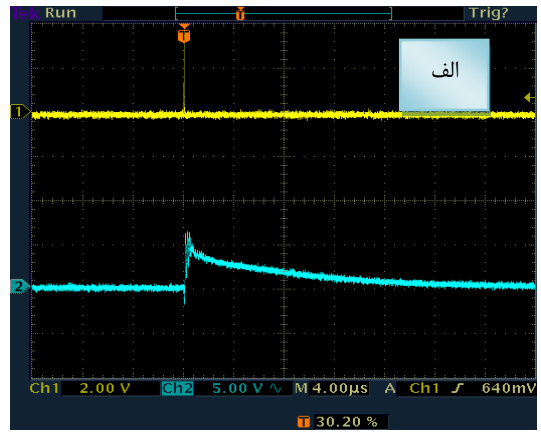
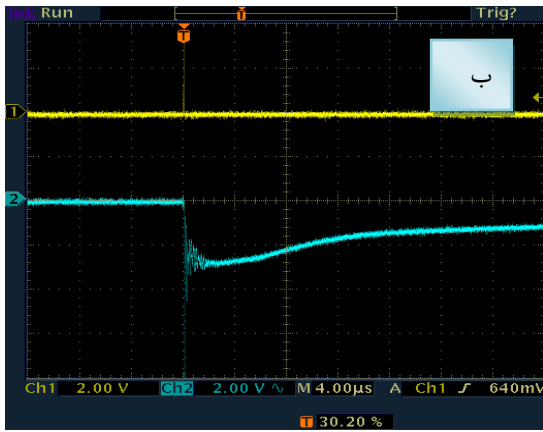


شکل ۲. تصویری از ردیاب لانگمیر به کار رفته در آزمایش.

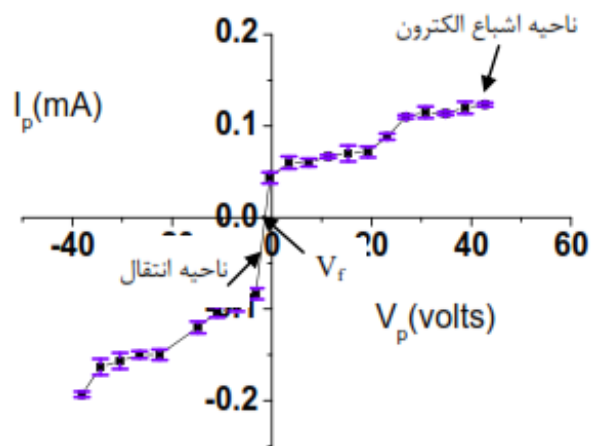
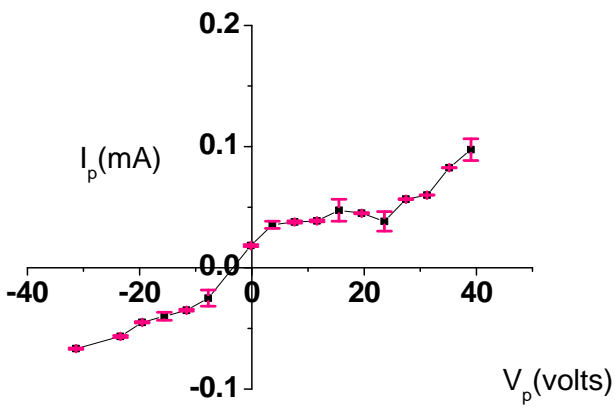
یک آرایش شانه‌ای و در فاصله ۳ میلی‌متر نسبت به هم قرار گرفته‌اند مطابق شکل ۲ به عنوان ردیاب لانگمیر استفاده شده است. نزدیک‌ترین ردیاب در فاصله یک میلی‌متر از هدف قرار گرفته است. ردیاب‌ها از طریق اتصال فیدترو^۱ به یک مدار الکتريکی که در بیرون محفظه برهم‌کنش قرار دارد متصل شده‌اند. در هر زمان یکی از ردیاب‌ها جلوی هدف قرار گرفته و به ولتاژ بایاس متصل شده است.

از یک منبع تغذیه برای اعمال ولتاژ و یک اسیلوسکوپ سریع دیجیتال برای مشاهده سیگنال‌های الکتريکی و نمونه رفتار زمانی تپ لیزر بر هم‌کنش به همراه فوتودایود استفاده شده است. در مدار مورد نظر از مقاومت‌های ۱۰ کیلو اهمی برای محاسبه جریان مطابق با شکل ۱ استفاده شده است. اندازه‌گیری‌ها در فشارهای مختلف از ۱۰۰۰ تا حدود ۵×10^{-5} میلی‌بار انجام شده است. فشار داخل محفظه به کمک دهنده چرخشی ابتدا تا ۱۰^{-3} میلی‌بار و سپس به کمک دهنده توربومولکولار تا ۱۰^{-5} میلی‌بار کاهش داده شد.

۱. Feed-through

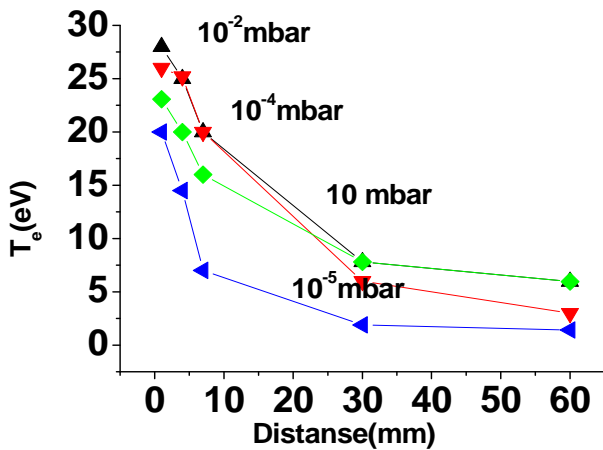


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه‌ای از سیگنال ثبت شده در فشار 3×10^{-4} میلی‌بار در فاصله چهار میلی‌متری هدف (الف) از جریان یونی، (ب) جریان الکترونی و در فشار 5×10^{-5} میلی‌بار، (ج) جریان یونی، (د) جریان الکترونی ردیاب در فاصله یک میلی‌متری هدف در ولتاژ بایاس ۴۸ ولت.

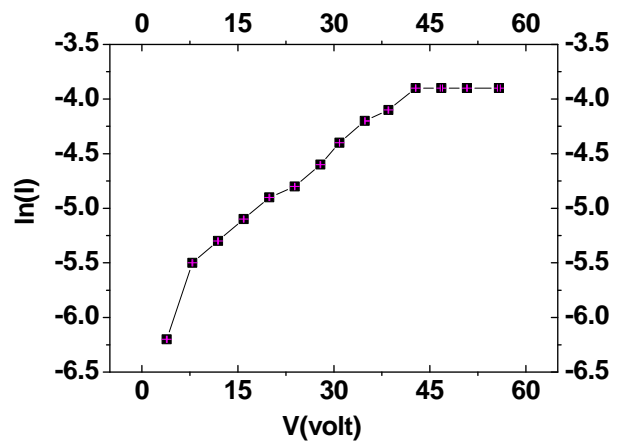


شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار جریان بر حسب ولتاژ ردیاب در فاصله ۱ میلی‌متری از هدف در فشار 10^{-5} میلی‌بار.

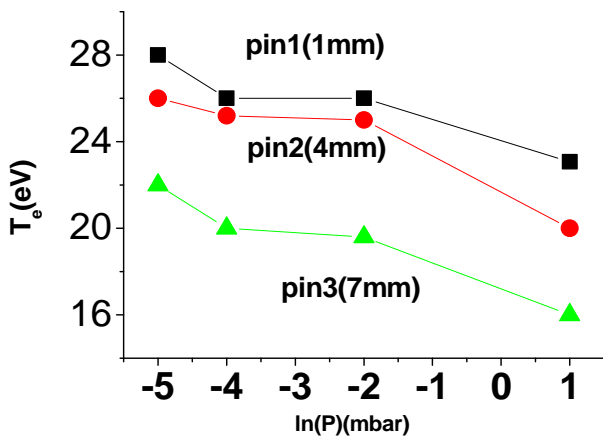
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار جریان بر حسب ولتاژ ردیاب در فاصله چهار میلی‌متری از هدف در فشار 10^{-4} میلی‌بار.



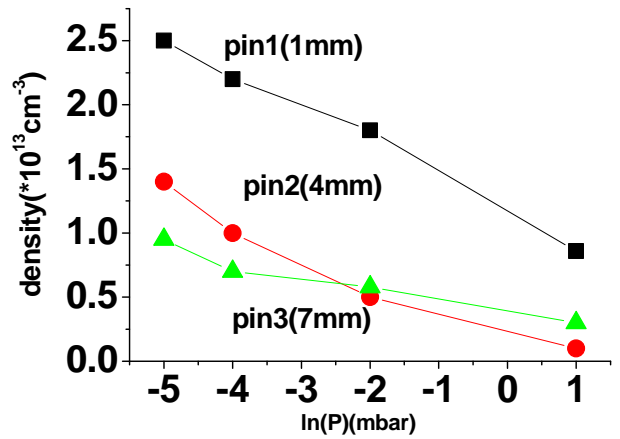
شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار دمای الکترون بر حسب فاصله ردیاب تا سطح هدف در فشارهای مختلف



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی نیمه‌لگاریتمی جریان بر حسب ولتاژ ردیاب در فاصله چهار میلی‌متری از هدف در فشار ۱۰^{-۴} میلی‌بار.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار دمای الکترون بر حسب فشار در فاصله‌های مختلف ردیاب تا سطح هدف.

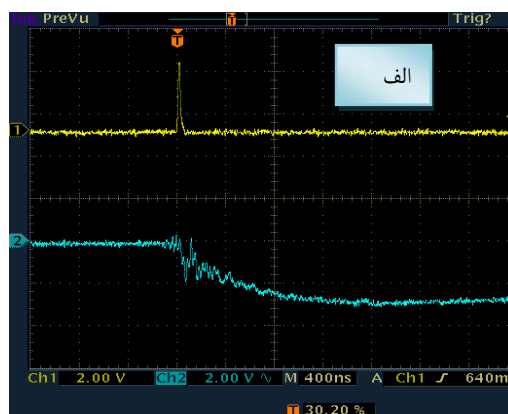
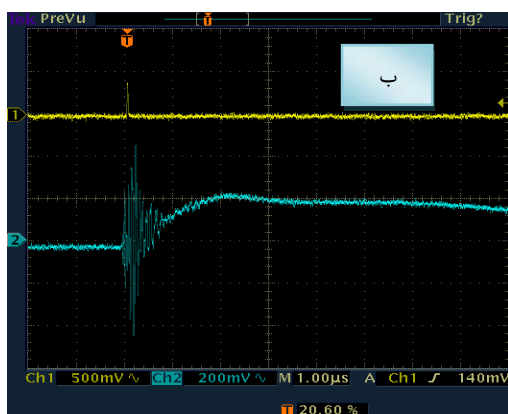


شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار چگالی یون بر حسب فشار در فواصل مختلف از محل برخورد باریکه لیزر بر سطح هدف.

یا مولکول‌های گاز کمتر شده و در نتیجه تعداد یون‌ها و الکترون‌های بیشتری به سطح ردیاب می‌رسند. بنابراین جریان جمع‌آوری شده توسط ردیاب افزایش یافته، و در نهایت چگالی یونی رشد یافته است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در چهار نمودار از بالا به پایین فشار از ۱۰^{-۵} میلی‌بار افزایش یافته تا به ۱۰ میلی‌بار رسیده است در این افزایش فشار، کاهش چگالی کاملاً مشهود است. همچنین این کاهش خود را با افزایش فاصله ردیاب نیز نمایان می‌کند که به صورتی دیگر در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل ۹ دمای الکترون در فشار ۱۰^{-۲} × ۱٫۱۲ میلی‌بار از ۲۸ eV به ۱۶ eV در فشار ۱۰ میلی‌بار رسیده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود منحنی نیمه‌لگاریتمی در فشار ۱۰^{-۴} میلی‌بار نشان داده شده است. به کمک این منحنی نیمه‌لگاریتمی و طبق رابطه دما با شیب این منحنی می‌توان دمای الکترون‌ها را به دست آورد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند چگالی یون و دمای الکترون با افزایش فاصله نسبت به هدف روند کاهشی دارند. علت این مسئله کاهش ذرات پرنرژی درون پلاسماست. همچنین با کاهش فشار گاز زمینه، چگالی یونی روند افزایشی داشته است. این افزایش می‌تواند ناشی از رقیق شدن گاز محیطی باشد که به سبب آن تعداد برخوردهای بین ذرات باردار با اتم‌ها



شکل ۱۰. نمونه‌ای از سیگنال ثبت شده بر اساس زمان پرواز فشار یک اتمسفر در فاصله شش سانتی‌متری از هدف، (الف) جریان الکترونی در ولتاژ بایاس ۴۸ ولت، (ب) جریان یونی در ولتاژ بایاس ۵۶ ولت.

الکترون‌ها بر اساس زمان پرواز می‌باشد.

دمای الکترون با توجه به رابطه (۹) در فاصله ۶ سانتی‌متری و در فشار اتمسفر نسبت به مکان برخورد باریکه لیزر بر سطح هدف ۴٫۷ الکترون ولت برآورد شده است. در حالی که با مشخصه ولتاژ - جریان ردیاب لانگمیر در شرایط مشابه ۵٫۹ الکترون ولت به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مشخصاً در فشار مذکور و فاصله داده شده، در مرز یک پلاسمای تعادلی با دمای میانگینی از دو دمای داده شده (۵٫۳ و ۵) و نیز فشار گاز الکترونی در تعادل با فشار گاز زمینه قرار داریم.

همچنین به کمک سیگنال‌های ثبت شده بر اساس زمان پرواز و رابطه (۹) دمای یون‌ها نیز به دست آمده است. اندازه‌گیری و محاسبات انجام شده در این آزمایش با مقادیر به دست آمده در شرایط مشابه آزمایشگاهی به روش سایه‌نگاری سازگاری خوبی دارد [۱۳ و ۱۴].

۶. نتیجه‌گیری

در این آزمایش دمای الکترون و چگالی یون برای پلاسمای ناشی از برهم‌کنش تپ باریکه لیزر با شدت 5×10^{10} وات بر سانتی‌متر مربع به روش ردیاب لانگمیر اندازه‌گیری شده است. دمای الکترون در فشارهای مختلف در گستره ۲-۲۹ الکترون ولت و میانگین چگالی یونی از مرتبه 10^{13} بر سانتی‌متر مکعب در فاصله‌های بین ۱ mm تا ۶ cm برآورد شده است

نتایج به دست آمده در شکل ۹ نشان می‌دهند دمای الکترون با افزایش فاصله در فشارهای مختلف روند کاهشی داشته است. همچنین دما با افزایش فشار، کاهش پیدا کرده است.

۵. محاسبه سرعت و دما به روش زمان پرواز

در شکل ۱۰ نمونه‌ای از سیگنال ثبت شده بر اساس زمان پرواز جریان الکترونی (الف) و جریان یونی (ب) نشان داده شده است. به کمک سیگنال‌های به دست آمده زمان پرواز اندازه‌گیری و طبق رابطه (۸) سرعت الکترون‌ها از مرتبه 10^8 cm/s و سرعت یون‌ها 10^6 cm/s برآورد شده است. این سرعت‌ها با مقادیر به دست آمده از داده‌های گزارش شده با مشخصه ولتاژ - جریان ردیاب لانگمیر در این زمینه مقایسه شده است و نتیجه‌های قبل را تایید می‌کند [۹]. همچنین این داده‌ها با سرعت‌های به دست آمده از روش سایه‌نگاری در شرایط آزمایشگاهی مشابه سازگاری خوبی دارد [۱۳ و ۱۴].

با استفاده از سرعت به دست آمده بر اساس زمان پرواز و با فرض اینکه در فاصله مشخص از ردیاب (۶ سانتی‌متر) و فشار گاز محیط (اتمسفر)، سیال پلاسمایی با الکترون‌ها در حال تعادل هستند، طبق رابطه (۹) می‌توان تقریبی از دمای الکترون‌ها به دست آورد،

$$\frac{1}{2} m_e \langle v_e^2 \rangle = \frac{3}{2} kT_e \quad (9)$$

در این رابطه m_e جرم الکترون و v سرعت به دست آمده برای

لانگمیر در این زمینه با نتایج این آزمایش قابل مقایسه و سازگار است [۸، ۹ و ۱۲]. همچنین اندازه‌گیری و محاسبات انجام شده در این آزمایش با مقادیر به دست آمده در شرایط مشابه آزمایشگاهی به روش سایه‌نگاری [۱۳ و ۱۴] سازگاری خوبی دارند و استفاده از ردیاب لانگمیر به عنوان یک روش کمکی، برآورد کیفی خوبی از دمای الکترون و چگالی یون در فواصل مختلف به ما می‌دهد.

[۱۵]. نتایج نشان می‌دهند که دمای الکترون و چگالی یون با افزایش فاصله نسبت به هدف رفتار کاهشی دارند. این رفتار تا حدودی قابل پیش‌بینی است، چرا که دمای ذرات باردار پس از پیمودن مسیر بیشتر و دور شدن از پلاسما تبادل انرژی در اثر برخورد با ذرات گاز خواهند داشت و دمای آنها کاسته می‌شود. همچنین با افزایش فشار محیط دما و چگالی رفتار کاهشی دارند. این اثر خود ناشی از برخورد ذرات گاز محیط است. مقادیر به دست آمده از داده‌های گزارش شده با ردیاب

مراجع

1. I H Hutchinson, "Principle of Plasma Diagnostics", Cambridge University Press Publisher (1987).
2. T R Dittrich, et al. *Physics of Plasmas* **6** (1999) 2164.
3. A H Dogar, I S Ullah, A Nadeem, and A Qayyum, *Plasmas* **39** (2011) 3.
4. A J H Donne, *Transactions of Fusion Science and Technology* **49** (2006) 349.
5. D W Koopman, *Phys. Fluids* **14** (1971) 1707.
6. R J Von Gutfeld and R W Dreyfus, *Appl. Phys. Lett.* **54** 13 (1989) 1212.
7. R Kumar, A Kumar, and R K Singh, "Jinto Thomas Experimental Investigation of Oscillatory Structures in Laser-blow-off Plasma Plume", Elsevier (2011).
8. J G Lunney, B Doggett, and Y Kaufman, *J. Phys. Conf. Ser.* **59** (2007) 470.
9. S Kumari, A Kushwaha, and A Khare, "Spatial Distribution of Electron Temperature and Electron Density in Laser Induced Ruby Plasma Using Langmuir Probe", 15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, Jeju, Korea, (2010).
10. B Dogget and J G Lunny, *Journal of Applied Physics*
11. R J Goldstone and P H Rutherford, "Introduction to Plasmas physics", Institute of Physics Publishing, Bristol, UK (1995).
12. J M Herndon, T Morrow, and W G Graham, *J. Appl. Phys.* **81**, 5 (1997) 2131.
13. N Morshedian, A H Farahbod, M Afshari, M Tarkashvand, and E Agayari, "Shadowgraphy of Plasma Produced by Nanosecond Laser-Matter Interaction", 9th Kudowa Summer School Kudowa Zdroj, Poland (2010).
14. ل. اصفهانی، ن. مرشدیان، اح. فرهبد، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه تبریز (۱۳۹۰).
15. ف. شاهوردی، ن. مرشدیان، اح. فرهبد، ز. محمدی، «اندازه‌گیری دمای الکترون و چگالی پلاسمای لیزری با استفاده از کاوه لانگمیر»، نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۹۱).