



طراحی و ساخت سامانه تشخیصی پروب لانگمویر به منظور تعیین دما، چگالی یون و الکترون، و پتانسیل پلاسما در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی ایران

مریم قیانوری، آمنه کارگریان*، مرتضی صدقات، علیرضا اصل‌زعیم

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

*Email: akargarian@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۴

چکیده

در این مقاله، هدف طراحی و ساخت سامانه تشخیصی پروب لانگمویر جهت اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما در دستگاه گداخت به روش محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی ایران (IR-IECF) به منظور مشخصه‌یابی چشمه‌ی پلاسمایی این دستگاه می‌باشد. بدین منظور، یک سامانه تشخیصی پروب لانگمویر برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف پلاسما از جمله دمای الکترون، چگالی الکترون، چگالی یون، و پتانسیل پلاسما طراحی و ساخته شده است. با در نظر گرفتن مشخصات چشمه پلاسمایی دستگاه IR-IECF، الکتروود مورد استفاده برای پروب یک مفتول از جنس تنگستن با قطر و طول به ترتیب ۰/۳ و ۱/۵ میلی‌متر و محافظ آن لوله‌ای سرامیکی از جنس آلومینا با قطر داخلی ۰/۷ سانتی‌متر انتخاب شده است. جنس اتصالات و پایه نگه‌دارنده پروب بر روی محفظه خلأ نیز استیل ضدزنگ می‌باشد. مدار الکترونیکی پروب قادر است ولتاژ و جریان به ترتیب ۵۰۰ ولت و ۱ میلی‌آمپر را تأمین نماید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در بین دو الکتروود در فاصله ۲۵ میلی‌متری از الکتروود بیرونی، دمای الکترون برابر با ۵۰/۱ eV، چگالی الکترون برابر با $3.1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$ ، پتانسیل پلاسما برابر با ۱۹۸ V و چگالی یون برابر با $0.4 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی ایران، سامانه تشخیصی پروب لانگمویر، مشخصه‌یابی پلاسما

Design and construction of Langmuir probe diagnostic system for determination of temperature, ion and electron density and potential in IR-IECF device

M. Ghapanvari, A. Kargarian*, M. Sedaghat, A. AsleZaeem

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Research Article

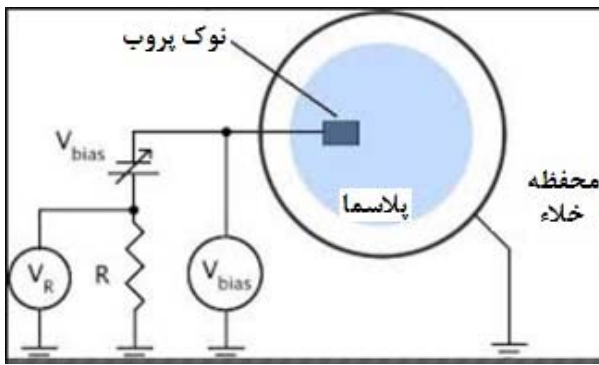
Received 7.8.2021, Accepted 26.9.2021

Abstract

This paper aims to design and construct a Langmuir probe diagnostic system for plasma parameters measurement in the Iranian Inertial Electrostatic Confinement Fusion (IR-IECF) device. For this purpose, a Langmuir probe diagnostic system is designed and constructed to determine the plasma parameters such as temperature, ion and electron density, and potential. Considering the characteristic of the plasma source of IR-IECF, the electrode selected for the probe is a tungsten wire with a diameter and length of 0.3 and 1.5mm, respectively, protected by an alumina ceramic tube with an inner diameter of 0.7cm. The connections and probe holder base on the vacuum chamber are stainless steel. The electrical circuit of the probe provides voltage and current of 500v and 1mA, respectively. The obtained results demonstrate that between two electrodes and at a distance of 25mm from the external electrode, the electron temperature, the electron density, the plasma potential, and the ion density are 50.1 eV, $3.1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$, 198V, and $0.4 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$, respectively.

Keywords: IR-IECF device, Langmuir probe diagnostic system, Plasma diagnostic





شکل ۱. شمای کلی از سامانه پروب لانگمویر [۹].

۱. مقدمه

شناخت پارامترهای پلازما برای شناخت رفتار پلازما و نحوه تحول آن و همچنین فهم بهتر پدیده‌هایی که در این محیط اتفاق می‌افتند، حایز اهمیت می‌باشد. چگالی و دما از مهم‌ترین پارامترهای پلازما برای شناسایی آن به شمار می‌روند [۱]. روش‌های مختلفی برای مشخصه‌یابی پلازماها وجود دارند که مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین این روش‌ها عبارتند از مشخصه‌یابی الکتریکی، مشخصه‌یابی مغناطیسی، و مشخصه‌یابی اپتیکی که می‌توانند در تماس مستقیم با پلازما قرار گیرند و مشخصه‌یابی فعال^۱ محسوب شوند یا به طور غیرمستقیم به کاوش و تحلیل پلازما بپردازند که روش انفعالی^۲ نامیده می‌شوند. بسیاری از مشخصه‌یابی‌های پرکاربرد پلازما مانند بازتاب‌سنجی، قطبش‌سنجی، تداخل‌سنجی^۳، سایه‌نگاری^۴، و بیناب‌نمایی^۵ در گروه اپتیکی قرار دارند [۲]. تحلیل و کاوش پلازما در همه این روش‌ها به‌جز بیناب‌نمایی که تحلیل پلازما به کمک تابش یا ذرات گسیلی از خود پلازما صورت می‌گیرد (روش انفعالی) به کمک امواج می‌باشد. از روش بیناب‌نمایی بیش‌تر برای اندازه‌گیری سرعت جریان پلازما و دمای یون استفاده می‌شود. اگر میدان مغناطیسی پلازما ناپایدار باشد میزان تغییرات میدان مغناطیسی با زمان را می‌توان به کمک پروب مغناطیسی اندازه‌گیری کرد، سپس طبق قوانین القای فاراده و آمپر داده‌ها را تحلیل و پارامترهای پلازما را به دست آورد [۳]. یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تشخیصی پلازما استفاده از پروب‌های الکتریکی است. این مشخصه‌یابی روش فعالی است که در تماس مستقیم با پلازما قرار می‌گیرد. شناخته‌شده‌ترین این پروب‌ها، پروب لانگمویر است [۴].

پروب لانگمویر یک سامانه تشخیصی تماسی می‌باشد. نوک این پروب الکتروستاتیکی از یک الکتروود فلزی کوچک تشکیل شده است که در داخل پلازما قرار داده می‌شود (شکل ۱). از این سامانه تشخیصی به‌طور گسترده‌ای برای مشخصه‌یابی چشمه‌های پلاسمایی گوناگون از جمله شناسایی پارامترهای پلاسمای تخلیه تابان در محفظه خلأ توکامک [۵]، پلاسمای لیزری [۶]، پلاسمای دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی [۷، ۸] استفاده شده است.

۲. مبانی نظری

پروب الکتریکی لانگمویر یک سامانه تشخیصی تماسی می‌باشد. نوک این پروب الکتروستاتیکی که از یک الکتروود فلزی کوچک تشکیل شده است، در پلازما فرو برده می‌شود. پروب لانگمویر به یک منبع تغذیه که در ولتاژهای مثبت و منفی گوناگون نسبت به پلازما بایاس شده وصل می‌گردد و جریان جمع‌آوری شده توسط الکتروود پروب اطلاعاتی از شرایط پلازما به ما



۳. طراحی و ساخت پروب لانگمویر

بخش‌های مختلف پروب لانگمویر با در نظر گرفتن شرایط و ویژگی‌های چشمه پلاسمایی دستگاه IR-IECF طراحی و ساخته شدند. از آنجایی که، ولتاژ بایاس از طریق الکتروود پروب به پلازما اعمال می‌گردد و جریان ذرات باردار (الکترون‌ها و یون‌ها) در پلازما از طریق این الکتروود وارد مدار الکتریکی پروب می‌گردد، الکتروود پروب باید به گونه‌ای طراحی گردد تا بتواند در مقابل محیط بسیار داغ پلازما در دستگاه IR-IECF از خود مقاومت کافی را نشان دهد. در بین فلزات، تنگستن، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی، مکانیکی و حرارتی، مناسب‌ترین گزینه برای استفاده به عنوان الکتروود پروب است. مسأله مهم دیگر در طراحی الکتروود پروب، محاسبه میزان سطح مقطعی از الکتروود پروب می‌باشد که در تماس مستقیم با محیط پلازما قرار دارد. هر چه میزان سطح مقطع پروب بیشتر باشد میزان جریان عبوری آن نیز بیشتر است. بنابراین، سطح مقطع پروب باید تا اندازه‌ای بزرگ باشد که منبع تغذیه پروب قادر به تأمین جریان الکتریکی باشد. از طرفی، ابعاد الکتروود باید به گونه‌ای انتخاب شود که در ناحیه اشباع به دلیل عبور جریان بالا، الکتروود پروب آسیب نبیند و در خطر ذوب‌شدگی قرار نگیرد. برای محافظت از الکتروود پروب، از عایق الکتریکی استفاده می‌شود. عایق الکتریکی ماده‌ای است که بارهای الکتریکی درون آن نمی‌توانند آزادانه حرکت کنند و اگر این مواد توسط یک میدان الکتریکی تحریک شوند جریان الکتریکی بسیار کمی از درون آن‌ها عبور خواهد کرد [۱۰، ۱۱]. اکسید آلومینیم یا آلومینا یکی از ترکیبات غیرآلی است که به‌عنوان یک عایق مناسب می‌باشد. سختی، استحکام و مقاومت به سایش آلومینا در بین اکسیدها، از همه بالاتر است و از این رو باعث می‌شود تا این ماده به عنوان عایق استفاده قرار گیرد. با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده بر روی کارهای قبلی مربوط به طراحی و ساخت پروب‌های لانگمویر استفاده شده در دستگاه‌های مختلف و مشابه با دستگاه IECF، و همچنین شناخت پلاسمای دستگاه IR-IECF، الکتروود مورد استفاده برای پروب یک مفتول از جنس تنگستن با قطر و طول به ترتیب ۰.۳ و ۱/۵ میلی‌متر و محافظ آن لوله‌ای سرامیکی از جنس آلومینا با قطر داخلی ۰.۷ سانتی‌متر انتخاب شد. جنس اتصالات و پایه نگه‌دارنده پروب بر روی محفظه خلأ، نیز استیل ضد زنگ می‌باشد. در شکل ۲ پروب لانگمویر ساخته شده نشان داده شده است.

می‌دهد [۱۲]. برای به‌دست آوردن پارامترهای پلازما، لازم است منحنی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) پروب مورد بررسی دقیق قرار گیرد. این منحنی دارای سه بخش اصلی؛ ناحیه اشباع الکترونی، ناحیه گذار، و ناحیه اشباع یونی می‌باشد [۵]. در ناحیه اشباع الکترونی، ولتاژ پروب نسبت به پلازما مثبت می‌باشد. بنابراین، در این ناحیه، با افزایش ولتاژ پروب، یون‌ها دفع و جریان الکترون‌ها افزایش می‌یابد. هنگامی که ولتاژ پروب با پتانسیل پلازما برابر می‌شود جریان الکترونی به اشباع می‌رسد. با استفاده از جریان اشباع الکترونی، چگالی الکترون‌ها به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_{e(sat)} = en_e v_e A \quad (1)$$

در این جا، A مساحت سطح پروب و $I_{e(sat)}$ جریان اشباع الکترونی است که از روی منحنی مشخصه ولتاژ-جریان قابل محاسبه است. v_e نیز در این رابطه سرعت گرمایی الکترون است. در ناحیه گذار، پتانسیل پروب نسبت به پلازما منفی باشد در این حالت، الکترون‌ها دفع می‌شوند و یون‌ها شتاب می‌گیرند، جریان الکترونی همان‌طور که ولتاژ کاهش می‌یابد، کم می‌شود. اگر توزیع انرژی، ماکسولی باشد، شکل منحنی در این جا بعد از این که سهم یون‌ها کم شد نمای خواهد بود. سرانجام در نقطه پتانسیل شناور، ولتاژ پروب به آن اندازه منفی است که همه الکترون‌ها به جز یک شار برابر با شار یون‌ها را دفع کند و بنابراین هیچ جریان خالصی دریافت نمی‌کند. به این ناحیه، ناحیه گذار یا ناحیه تأخیری الکترون می‌گویند. با استفاده از منحنی نیمه لگاریتمی مشخصه جریان-ولتاژ در ناحیه گذار، دمای الکترون به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d \ln(I) / dv = \frac{e}{KT_e} \quad (2)$$

در این معادله، T_e دمای الکترون است.

در ناحیه اشباع یونی، پتانسیل بسیار منفی تا پتانسیل شناور شروع می‌شود. در این حالت، پروب همه الکترون‌ها را دفع می‌کند، اما یون را جذب می‌کند. در سمت چپ، در فاصله دور، برای مقادیر منفی بزرگ ولتاژ پروب، جایی که همه الکترون‌ها دفع شده‌اند، جریان یونی به اشباع می‌رشد. به این ناحیه از نمودار، ناحیه اشباع یونی می‌گویند که مانند ناحیه اشباع الکترونی نسبتاً صاف می‌باشد. جریان اشباع یونی متناسب با چگالی یونی است:

$$I_{i(sat)} = en_i v_i A \quad (3)$$

در این رابطه، $I_{i(sat)}$ جریان اشباع یونی است.

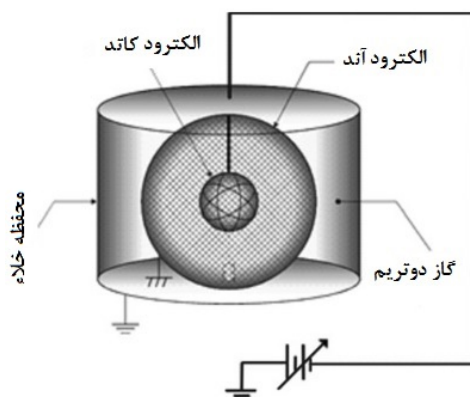


۴. تحلیل نتایج تجربی

پس از ساخت اجزای پروب، اتصالات مربوط به خلأ، و مدار و سیستم‌های الکتریکی مورد نیاز، پروب بر روی محفظه خلأ دستگاه IR-IECF نصب گردید. این دستگاه یکی از دستگاه‌های متداول در زمینه محصورسازی پلاسما در گداخت هسته‌ای است که متشکل از دو کره فلزی مشبک و هم‌مرکز است. الکترودها توسط یک منبع تغذیه الکتریکی به ولتاژ بالا متصل و هم‌زمان با تخلیه الکتریکی گاز در محفظه دستگاه، گاز یونیزه و یک ناحیه پلاسمای نسبتاً داغ و چگال در مرکز سیستم ایجاد می‌گردد. پلاسمای ناحیه مرکزی در محدوده فشاری چند میلی‌تور تا چند پاسکال از نوع تخلیه تابان بوده که محل انجام واکنش‌های گداخت هسته‌ای است. شکل ۵ شمای کلی از دستگاه IR-IECF را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما، پروب از دریچه ورودی تعبیه‌شده بر روی بدنه وارد محفظه خلأ می‌گردد، به گونه‌ای که نوک پروب در بین دو الکتروود کروی دستگاه و در تماس کامل با محیط پلاسما قرار می‌گیرد. انتهای الکتروود پروب به مدار الکتریکی متصل می‌باشد. شکل ۶ تصویری از پروب لانگمویر قرار گرفته بین الکتروودهای دستگاه IR-IECF را نشان می‌دهد.

برای روشن کردن دستگاه، ابتدا با روشن شدن پمپ روتاری فشار محفظه تا حدود 10^{-1} میلی‌بار کاهش داده می‌شود و سپس با روشن شدن پمپ توربو، خلأ محفظه بعد از چند دقیقه به حدود 10^{-5} میلی‌بار می‌رسد. سپس، با تزریق گاز دوتریم به داخل محفظه خلأ فشار مطلوب حاصل می‌گردد که دائماً توسط فشارسنج خلأ کنترل می‌شود. پس از آن، با اعمال ولتاژ بالا به الکتروودهای دستگاه، ضمن فرایند تخلیه الکتریکی، گاز دوتریم یونیزه و پلاسما تشکیل می‌گردد. سپس، با اعمال ولتاژ به الکتروود پروب لانگمویر و اندازه‌گیری جریان، منحنی مشخصه ولتاژ-جریان پروب به دست می‌آید. با تحلیل مشخصه ولتاژ-جریان می‌توان به مشخصات پلاسما پی برد.



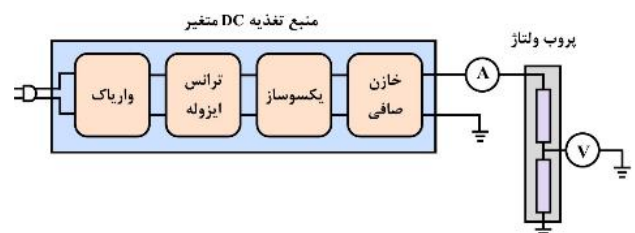
شکل ۵. شمای کلی از دستگاه IR-IECF

با توجه به پایدار بودن پلاسما در دستگاه IR-IECF، از یک منبع تغذیه ولتاژ DC برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان پروب استفاده شده است. شکل ۳ شمای کلی از منبع تغذیه طراحی شده را نشان می‌دهد. منبع تغذیه پروب قادر است ولتاژ و جریان به ترتیب ۵۰۰ ولت و ۱ میلی‌آمپر را تأمین نماید.

برای ساخت این منبع تغذیه، ابتدا سطح ولتاژ برق شهر به کمک واریاک به میزان دلخواه کاهش داده شده و از طریق یک ترانس ایزوله به مدار یک‌سوساز و خازن صافی اعمال می‌شود تا ولتاژ DC لازم برای پروب لانگمویر فراهم شود. شکل ۴ بخش‌های مختلف منبع تغذیه ساخته شده را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان پروب، دو مولتی‌متر مدل VC۹۷ و دو میکروآمپر متر عقربه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲. تصویر کلی از پروب لانگمویر ساخته شده.

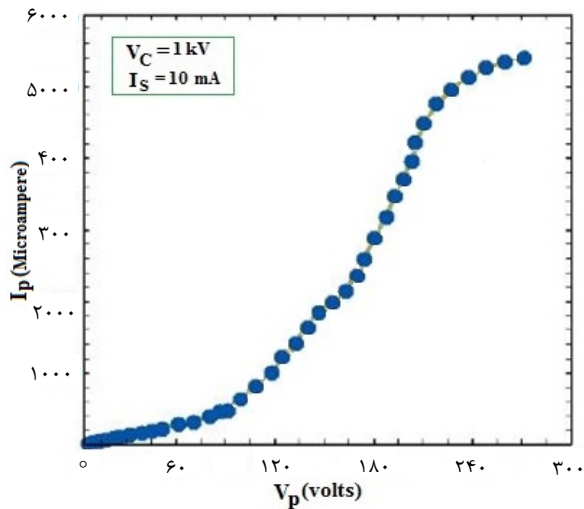


شکل ۳. طراحی مفهومی از منبع تغذیه مورد استفاده برای پروب لانگمویر.



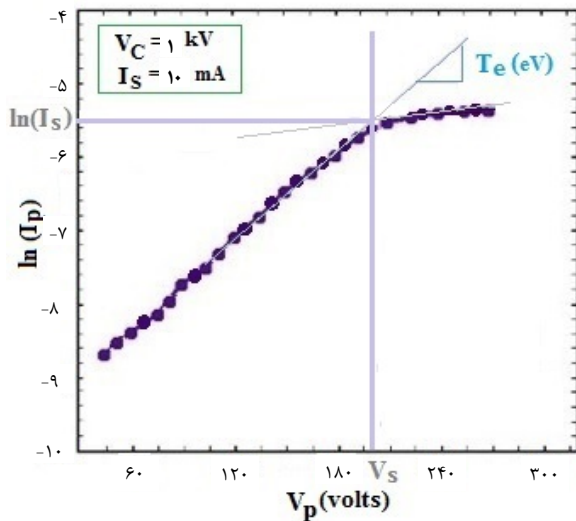
شکل ۴. بخش‌های مختلف منبع تغذیه ساخته شده برای پروب لانگمویر.



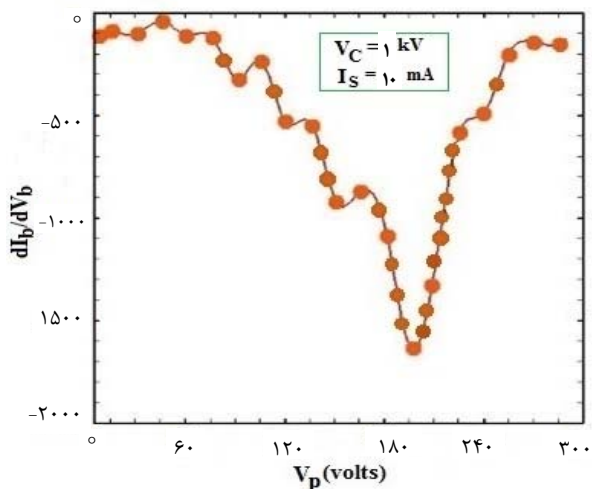


شکل ۶. پروب لانگمویر قرار گرفته بین دو الکترود هم‌مرکز آند و کاتد در دستگاه IR-IECF.

شکل ۷. منحنی ولتاژ-جریان پروب با اعمال بایاس مثبت و در شرایط ولتاژ کاتد ۱ kV و جریان ۱۰ میلی‌آمپر.



شکل ۸. نمودار لگاریتمی ولتاژ-جریان پروب با اعمال بایاس مثبت و در شرایط ولتاژ کاتد ۱ kV و جریان ۱۰ میلی‌آمپر.



شکل ۹. مشتق نمودار ولتاژ-جریان پروب با اعمال بایاس مثبت و در شرایط ولتاژ کاتد ۱ kV و جریان ۱۰ میلی‌آمپر.

با تحلیل منحنی ولتاژ-جریان و استفاده از روابط تحلیلی بخش ۲، پارامترهای پلازما در شرایط کاری اعمال شده و در فاصله ۲۵ میلی‌متری از الکترود بیرونی، محاسبه شده است. ابتدا، با اعمال ولتاژ کاتد ۱ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر، پس از به دست آوردن منحنی مشخصه ولتاژ-جریان، پارامترهای پلازما محاسبه گردید.

شکل ۷ منحنی ولتاژ-جریان پروب در شرایط کاری ولتاژ کاتد ۱ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر را نشان می‌دهد. برای تعیین دمای الکترود، بایستی نمودار لگاریتمی متناظر با مشخصه ولتاژ-جریان را مورد ارزیابی قرار داد. مطابق با رابطه ۲، از روی شیب منحنی نیمه لگاریتمی ولتاژ-جریان دمای الکترود به دست می‌آید. شکل ۸ منحنی نیمه لگاریتمی ولتاژ-جریان پروب در شرایط کاری ولتاژ کاتد ۱ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر را نشان می‌دهد. در واقع، دمای الکترود متناسب با عکس شیب این نمودار می‌باشد. دمای الکترودی محاسبه شده در شرایط کاری در نظر گرفته‌شده در دستگاه برابر با ۵۰/۱ کیلو الکترود ولت می‌باشد. با به‌دست‌آوردن جریان اشباع الکترودی یعنی جریانی که در آن ولتاژ پروب برابر با ولتاژ پلازما است، و همچنین با استفاده از رابطه ۱، چگالی الکترود نیز محاسبه می‌شود. در شرایط کاری اعمال شده یعنی ولتاژ کاتد برابر با ۱ کیلو الکترود ولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر، چگالی الکترود برابر با $3.1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$ به‌دست می‌آید.

شکل ۹ منحنی مشتق ولتاژ-جریان را نشان می‌دهد. مقدار کمینه این نمودار در ولتاژی (منفی‌ترین ولتاژ) اتفاق می‌افتد که برابر با پتانسیل پلازما است. این ولتاژ جایی است که با تغییر بیش‌تر ولتاژ پروب، جریان آن تغییر بسیار کمی دارد و یا به عبارتی به حالت اشباع رسیده است. همان‌طور که از روی نمودار مشخص است، در شرایط کاری در نظر گرفته شده، پتانسیل پلازما برابر با مقدار ۱۹۸V است.



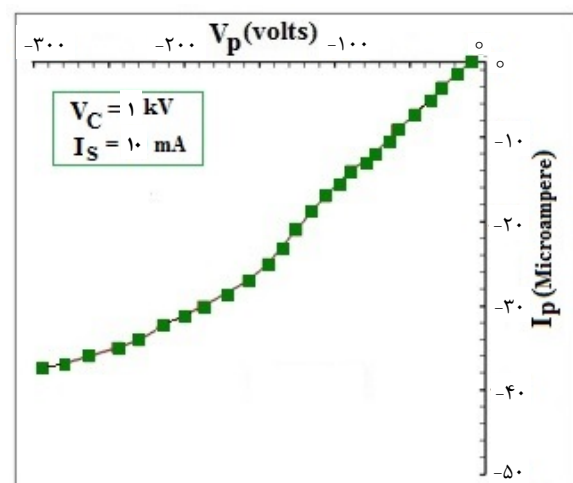
چشمه پلاسمایی این دستگاه از سامانه تشخیصی پروب لانگمویر استفاده شد. الکتروود مورد استفاده برای پروب یک مفتول از جنس تنگستن با قطر و طول به ترتیب ۰/۳ و ۱/۵ میلی‌متر و محافظ آن لوله‌ای سرامیکی از جنس آلومینا با قطر داخلی ۰/۷ سانتی‌متر انتخاب شده است. جنس اتصالات و پایه نگه‌دارنده پروب بر روی محفظه خلأ، استیل ضد زنگ می‌باشد. با توجه به پایدار بودن پلازما در دستگاه IR-IECF، از یک منبع تغذیه ولتاژ DC برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان پروب استفاده شده است. برای ساخت این منبع تغذیه، سطح ولتاژ برق شهر به کمک واریاک به میزان دلخواه کاهش داده شده و از طریق یک ترانس ایزوله به مدار یک‌سوساز و خازن صافی اعمال می‌شود تا ولتاژ DC لازم برای پروب لانگمویر فراهم شود. برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان پروب، دو مولتی‌متر مدل VC۹۷، و دو میکروآمپر متر عقربه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. مدار الکتریکی ساخته شده برای این سامانه قادر است تا ولتاژ و جریان به ترتیب ۵۰۰ ولت و ۱ میلی‌آمپر را تأمین نماید. پس از طراحی، ساخت و آزمایش قسمت‌های مختلف، پروب ساخته شده بر روی دستگاه IR-IECF نصب شد و پارامترهای پلازما تشکیل شده بین دو الکتروود و در فاصله ۲۵ میلی‌متری از الکتروود بیرونی، با استفاده از این سامانه اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان می‌دهد، در این فاصله، دمای الکترون برابر با 5.01 eV ، چگالی الکترون برابر با $3.1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$ ، پتانسیل پلازما برابر با 1.98 V ، و چگالی یون برابر با $0.4 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$ می‌باشد.

در نهایت، با اعمال بایاس منفی به دو سر پروب، پروب همه الکترون‌ها را دفع و یون‌ها را جذب می‌کند. برای مقادیر منفی بزرگ ولتاژ بایاس، جایی که همه الکترون‌ها دفع شده‌اند، جریان برابر با جریان اشباع یونی است. با کاهش پتانسیل به مقادیر کم‌تر، تنها یون‌ها با سرعت ثابت جمع‌آوری می‌شوند. به این ناحیه از نمودار، ناحیه اشباع یونی می‌گوییم که مانند ناحیه اشباع الکترونی نسبتاً صاف می‌باشد. همان‌گونه که در بخش ۲ بیان شد (رابطه ۴)، جریان اشباع یونی متناسب با چگالی یونی پلازما است. نمودار مربوط به ناحیه اشباع یون در شرایط ولتاژ کاتد 1 kV و جریان 10 میلی‌آمپر، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در شرایط کاری اعمال شده، چگالی یون برابر با $1/m^3 \times 10^{15} \times 0.4$ به دست می‌آید. رفتار پلازما و پارامترهای به دست آمده برای آن با نتایج به دست آمده در شرایط آزمایشگاهی گوناگون که بر روی دستگاه گداخت به روش محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی در دانشگاه میسوری کلمبیا انجام شده است، منطبق می‌باشد [۱۳] که درستی نتایج و آزمایشات انجام شده در کار حاضر را نشان می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، در این مقاله یک پروب لانگمویر جهت اندازه‌گیری پارامترهای پلازما مانند دما، چگالی یون و الکترون، و پتانسیل پلازما در دستگاه IR-IECF طراحی و ساخته شد. این دستگاه یکی از دستگاه‌های متداول در زمینه محصورسازی پلازما در گداخت هسته‌ای است. برای کنترل و ارزیابی عملکرد



شکل ۱۰. منحنی اشباع یون با اعمال بایاس منفی و در شرایط ولتاژ کاتد 1 kV و جریان 10 میلی‌آمپر.

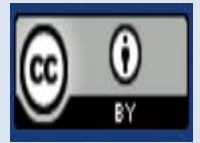


مراجع

1. R.F. Lang, et al., *Characterization of a deuterium–deuterium plasma fusion neutron generator*, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., A*, **879**, 31 (2018).
2. D.L. Crintea, et al., *Plasma diagnostics by optical emission spectroscopy on argon and comparison with Thomson scattering*, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **42**, (2009).
3. H. Bhuyan, et al. *Magnetic probe measurements of current sheet dynamics in a coaxial plasma accelerator*, *Meas Sci Technol.*, **14**, 1769 (2003).
4. R.H. Huddlestone, *Plasma Diagnostics Techniques*, (New York, Academic Press, 1965).
5. F. Sedighi, et al., *Design and fabrication of Langmuir probe system for determination of glow discharge parameters for vacuum vessel conditioning of Damavand tokamak*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **42**, 21 (2021) (In Persian).
6. N. Morshedian, F. Shahverdi, A. Farahbod, *Investigations of electron temperature and density of laser-induced-plasma by Langmuir probe up to the centimeters scale distance from the target*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **35**, 86 (2014) (In Persian).
7. Z. Yu, *Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Device as Plasma Injection Source*, *M.S. thesis, University of Washington*, (2015).
8. D. Bhattacharjee, et al., *Studies on virtual electrode and ion sheath characteristics in a cylindrical inertial electrostatic confinement fusion device*, *Phys. Plasmas*, **26**, (2019).
9. S. Bose, et al., *Langmuir probe in collisionless and collisional plasma including dusty plasma*, *J. Plasma Phys.*, **83**, (2017).
10. S.L. Kakani, *Electronics Theory and Applications*, (New Age International, 2005).
11. A. Waygood. *An Introduction to Electrical Science*, 2nd ed. (Routledge, 2013).
12. M.Y. Naz, et al., *Double and triple Langmuir probes measurements in inductively coupled nitrogen plasma*, *Prog. Electromagn. Res.*, **114**, 113 (2011).
13. R. Meyer, *Inertial Electrostatic Confinement: Theoretical and Experimental Studies of Spherical Devices*, (University of Missouri-Columbia, 2007).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

مریم قبانوری، آمنه کارگریان، مرتضی صداقت، علیرضا اصلزعی (۱۴۰۲)، طراحی و ساخت سامانه تشخیصی پروب لانگمویر به منظور تعیین دما، چگالی یون و الکترون، و پتانسیل پلاسما در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی ایران، ۱۰۳، ۱۵۱-۱۵۷

DOI: 10.24200/nst.2022.1639

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1416.html

