

اندازه‌گیری دمای الکترون در دستگاه IECF با استفاده از سامانه تشخیصی پروب لانگمویر منفرد

آمنه کارگریان، مرتضی صداقت موحد، علیرضا اصل زعییم، مریم حسین‌زاده، مریم قپانوری*

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران، ایران

چکیده:

دستگاه محصورسازی گداخت اینرسی الکتروستاتیکی (IECF) یکی از دستگاه‌های متداول در زمینه محصورسازی پلاسما در گداخت هسته‌ای است. برای ارزیابی عملکرد چشمه پلاسمایی این دستگاه لازم است پارامترهای پلاسما مورد ارزیابی و کنترل قرار گیرند. در کار حاضر، با استفاده از سامانه تشخیصی پروب لانگمویر به اندازه‌گیری دمای الکترونی پلاسمای تشکیل شده در دستگاه IECF موجود در پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای پرداخته شده است. پروب لانگمویر به عنوان یک ابزار تشخیصی دقیق و قدرتمند برای تعیین پارامترهای پلاسما در چشمه‌های یونی و الکترونی به کار می‌رود. علاوه بر این، در چشمه‌های پلاسمایی، جهت شناسایی پارامترهای دستگاه و تحلیل ابعادی آن در راستای دستیابی به مقیاس‌های بزرگتر، باید از سیستم‌های تشخیصی مناسب بهره گرفته شود که پروب لانگمویر پاسخ مناسبی برای این نیاز می‌باشد. پروب طراحی و ساخته شده یک پروب لانگمویر منفرد می‌باشد. شرایط کاری دستگاه در این آزمایش ولتاژ ۱ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی آمپر است. در این شرایط، دمای پلاسما ۵۰.۱ الکترون ولت تخمین زده شد.

کلیدواژه‌ها: پروب لانگمویر، محصورسازی الکتروستاتیکی اینرسی، دمای پلاسما

Electron temperature measurement in IECF device using a single Langmuir probe

A. Kargarian, M. Sedaghat, A. Aslezaem, M. Hosseinzadeh, M. Ghapanvari*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14399-51113, Tehran, Iran

Abstract:

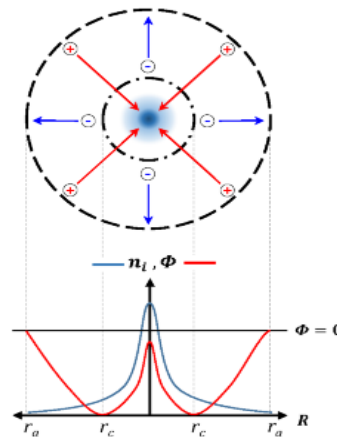
The inertial electrostatic confinement fusion (IECF) device is one of the conventional devices for plasma confinements in the nuclear fusion. For evaluation and control of the plasma source in this device, it is required the plasma parameters to be controlled. In the present work, using the diagnostic system Langmuir probe, the electron temperature of plasma in IECF device has been measured. The Langmuir probe, as a powerful and precise diagnostic system, is applied for determination of plasma parameters. Moreover, in plasma sources, to identify the device parameters and dimensional analysis for achievement to large scale, it is necessary to use of the appropriate diagnostic system that the Langmuir probe is actually a suitable diagnostic system for this requirement. The designed and constructed probe is a single Langmuir probe. In this experiment, the work condition of the device is 1KV and 1mA. In this condition the achieved electron temperature is 50.1 eV.

Keywords: Langmuir probe, Inertial electrostatic confinement fusion, Plasma temperature.

Email: m.ghapanvari@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی-اینرسی متشکل از دو کره فلزی مشبک و هم مرکز (و یا دو استوانه هم محور) به عنوان آند و کاتد است. این الکترودها توسط یک منبع تغذیه الکتریکی به اختلاف پتانسیل بسیار بالایی (معمولاً حدود بیست تا صد پنجاه کیلو ولت) متصل می‌گردند. همزمان با تخلیه الکتریکی گاز در محفظه دستگاه، الکترون‌ها شروع به حرکت و شتابگیری نموده ضمن یونیزاسیون گاز کاری به سمت آند حرکت می‌کنند. یون‌ها تولید شده، در میدان الکتریکی به سمت مرکز و الکترون‌ها (و یون‌های منفی تولید شده بر اثر پتانسیل منفی الکتروود کاتد) در جهت عکس، شتاب گرفته موجب ایجاد یک ناحیه پلاسمای نسبتاً داغ و چگال در مرکز سیستم می‌گردد [۱-۳]. پلاسمای ناحیه مرکزی در محدوده فشاری چند میلی تورا تا چند پاسکال از نوع تخلیه تابان بوده که محل انجام واکنش‌های هسته‌ای است و در صورت استفاده از گاز دوتریوم، نوترون‌های گداخت هسته‌ای با انرژی ۲/۴ مگا الکترون‌ولت تولید می‌نماید. با توجه به شتاب‌گیری و برخورد الکترون‌ها به سمت محفظه خارجی دستگاه، علاوه بر نوترون، تولید اشعه ایکس نرم و سخت در این دستگاه امری طبیعی به شمار می‌رود. در واقع ایده انجام گداخت به روش الکترواستاتیکی از اوایل سال ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ توسط فرانس ورتوهرشمطرح شد که در آن شبکه کروی توری شکل در داخل محفظه خلأ به ولتاژ بالا وصل می‌شد تا یون‌ها به سمت مرکز دستگاه شتاب گیرند و گداخت هسته‌ای در ناحیه مرکزی انجام شود. با استفاده از همین روش هرش با به‌کارگیری سوخت دوتریوم-تری‌تیوم، توانست تا 2×10^{10} نوترون بر ثانیه را در حالت پایا و پیوسته با استفاده از اضافه کردن شش چشمه یونی، بدست آورد. در شکل ۱ شمای کلی از نحوه حرکت یون‌ها و الکترون‌ها در میدان الکتریکی دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی به همراه نمودار چگالی یون‌ها ترسیم گردیده است [۳].



شکل ۱: شمای کلی از دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی و جهت حرکت یون‌ها و الکترون‌ها [۲].

در سال ۱۳۸۸ در پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران دستگاه محصورسازی گداخت الکترواستاتیکی اینرسی طراحی و ساخته شد. الکترودهای این دستگاه از چند سیم فولادی حلقوی ضدزنگ به قطر ۱ میلی‌متر و به صورت مشبک ساخته شده است. برای بررسی نحوه‌ی کار و ارزیابی عملکرد چشمه پلاسمایی دستگاه IECF نیازمند ابزاری جهت اندازه‌گیری و کنترل مشخصات پلازما می‌باشیم. در کار حاضر، برای تخمین دمای پلازما در این دستگاه یک نمونه پروب لانگمویر منفرد طراحی و ساخته شده است.

۲. مبانی نظری

یکی از دسته‌بندی‌های مهم جداسازی سامانه‌های تشخیصی بر مبنای تماس این سامانه‌ها با پلازما می‌باشد. بنابراین می‌توان سامانه‌های تشخیصی را به دو دسته تماسی و غیرتماسی تقسیم‌بندی نمود. پروب الکتریکی لانگمویر یک سامانه تشخیصی تماسی می‌باشد. نوک این پروب الکترواستاتیکی از یک الکتروود فلزی کوچک تشکیل شده است که در پلازما فرو برده می‌شود.

پروپ لانگمویر به یک منبع تغذیه که در ولتاژهای مثبت و منفی گوناگون نسبت به پلاسما بایاس شده وصل می‌گردد و جریان جمع‌آوری شده توسط پروپ اطلاعاتی از شرایط پلاسما به ما می‌دهد. با این شرایط که ولتاژ بایاس بیش از اندازه مثبت نباشد، انتظار می‌رود که سرعت الکترون‌ها از توزیع ماکسول-بولتزمن به دست آید:

$$f(v)dv = c \exp\left(-\frac{1/2mv^2}{KT_e}\right) dv \quad (1)$$

که در این معادله، T دما، v سرعت و c ثابت بهنجارسازی است. با استفاده از معادله چگالی بولتزمن و منحنی نیمه لگاریتمی مشخصه جریان-ولتاژ ($I-V$)، دمای الکترون بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

۳. شرح آزمایش و نتایج تجربی

پروپ لانگمویر از اجزای مختلفی تشکیل شده است که شامل ۱- الکترو پروپ، ۲- حفاظ نوک پروپ، ۳- فیدترو و اتصالات مربوط به خلاء، ۴- مدار الکتریکی و منبع تغذیه پروپ می‌باشد. الکترو پروپ لانگمویر باید به گونه‌ای طراحی گردد تا بتواند در مقابل محیط بسیار داغ پلاسما در دستگاه IECF از خود مقاومت کافی را نشان دهد. در بین فلزات، تنگستن، مناسب‌ترین گزینه برای استفاده به عنوان الکترو پروپ است. برای حفاظ پروپ از لوله سرامیکی آلومینا استفاده شد. این ماده دارای دمای ذوب بسیار بالا و مقاومت الکتریکی بسیار بالایی است و از لحاظ شیمیایی نیز بسیار پایدار است. با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده همچنین شناخت پلاسماهای دستگاه IR-IECF، به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر در شرایط کاری مدنظر، منبع تغذیه DC با حداکثر دامنه ۳۰۰ ولت و جریانی در محدوده یک میکروآمپر تا حداکثر چند میلی‌آمپر مورد طراحی و ساخته شد. پس از ساخت اجزای پروپ، اتصالات مربوط به خلاء، و مدار و سیستم‌های الکتریکی مورد نیاز، پروپ از دریچه ورودی تعبیه‌شده بر روی بدنه وارد محفظه خلاء می‌گردد، به گونه‌ای که نوک پروپ در بین دو الکترو پروپ دستگاه و در تماس کامل با محیط پلاسما قرار بگیرد. اتصالات بر روی بدنه محفظه خلاء به گونه‌ای ساخته شده‌اند که پروپ قابلیت حرکت در فواصل مختلف از مرکز دستگاه را داشته باشد. انتهای الکترو پروپ به مدار الکتریکی متصل می‌باشد. تصویر از پروپ ساخته‌شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. شکل ۳ پروپ لانگمویر نصب شده بر روی دستگاه IECF را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویری از پروپ لانگمویر ساخته‌شده



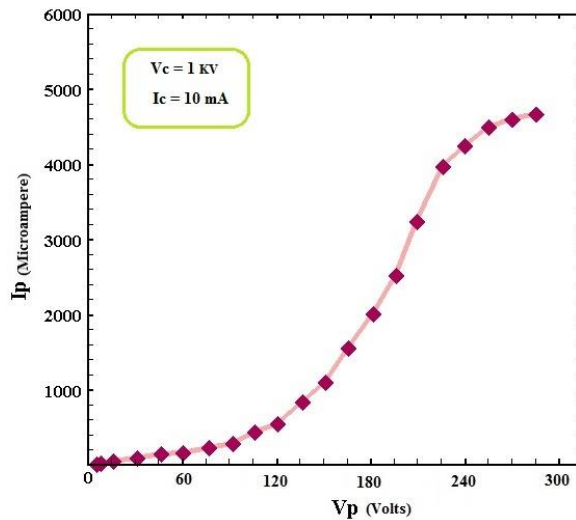
شکل ۳: پروب لانگمویر نصب شده بر روی دستگاه IECF

پس از نصب پروب، با اعمال ولتاژ بالا به کاتد دستگاه، اختلاف ولتاژ لازم بین الکترودهای دستگاه ایجاد شده و با ایجاد فرآیند تخلیه الکتریکی، گاز یونیزه شده و پلاسما ایجاد می‌گردد (شکل ۴). پس از تشکیل پلاسما، با اعمال ولتاژ به الکترود پروب لانگمویر و اندازه‌گیری جریان پلاسما، مشخصه ولتاژ-جریان به دست می‌آید. با تحلیل مشخصه ولتاژ-جریان می‌توان به مشخصات پلاسما در دستگاه IECF پی برد.



شکل ۴: پلاسمای تشکیل شده بین دو الکترود در دستگاه IECF

با اعمال بایاس مثبت و در شرایط ولتاژ کاتد ۱ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی آمپر، مشخصه ولتاژ-جریان پروب به دست آمد. این منحنی در شکل ۵ نشان داده شده است. برای تعیین دمای الکترون و پتانسیل پلاسما بایستی نمودار لگاریتمی متناظر با این مشخصه ولتاژ-جریان را مورد ارزیابی قرار داد. با تحلیل این نمودارها و استفاده از روابط تحلیلی بخش ۲، دمای الکترونی پلاسما در شرایط کاری اعمال شده و فاصله در نظر گرفته شده از مرکز پلاسما، محاسبه شده است.



شکل ۵: مشخصه ولتاژ-جریان پروب با اعمال بایاس مثبت و در شرایط ولتاژ کاتد ۱ KV و جریان ۱۰ میلی آمپر

دمای الکترونی محاسبه شده در این شرایط کاری در دستگاه برابر با ۵۰.۱ کیلو الکترون ولت می‌باشد. این نتیجه با نتایج به دست آمده در شرایط آزمایشگاهی یکسان در مراجع [۴-۶] منطبق می‌باشد که درستی نتایج و آزمایشات انجام شده در کار حاضر را نشان می‌دهد. در مرجع ۴ بازه تغییرات ولتاژ پروب تا ۱۰۰۰ ولت می‌باشد که در بازه ولتاژ ۱۰۰ تا ۳۰۰ ولت (با توجه به شرایط کاری متفاوت دستگاه که ولتاژ کاتد در بازه ۱ تا ۵ ولت و جریان ۱ تا ۱۰ میلی آمپر است)، اشباع نمودارهای جریان-ولتاژ آغاز شده است (شکل‌های ۸۴ تا ۹۳ مرجع ۴). دمای الکترون محاسبه شده نیز در بازه ۴۰ تا ۵۰ الکترون ولت می‌باشد (شکل‌های ۹۸ و ۹۹ مرجع ۴). این نتایج تأییدی بر نتیجه حاصل شده در مقاله می‌باشد. در مراجع ۵ و ۶ تنها ناحیه گذار منحنی جریان-ولتاژ رسم شده که تا ولتاژ حدود ۸۰ ولت می‌باشد و ناحیه اشباع در شکل‌های این مراجع نمایش داده نشده است. دلیل تفاوت دمای محاسبه شده در این مراجع با دمای گزارش شده در مقاله، جریان بالای تخلیه الکتریکی است که در این مراجع در بازه ۲۰۰ تا ۶۰۰ میلی آمپر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های پروب ساخته شده در مقاله حاضر نیز در این بازه جریان متناظر با دمای گزارش شده در این مراجع است که در مقاله حاضر گزارش نشده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این کار، برای اندازه‌گیری دمای الکترون پلاسمای تشکیل شده در دستگاه IECF یک عدد پروب لانگمیر منفرد طراحی و ساخته شد. الکتروود پروب مفتولی از جنس تنگستن انتخاب شد و برای حفاظ پروب نیز از لوله سرامیکی آلومینا استفاده شد. مدار الکتریکی ساخته شده شامل یک منبع تغذیه DC با حداکثر دامنه ۳۰۰ ولت و جریانی در محدوده یک میکروآمپر تا حداکثر چند میلی‌آمپر می‌باشد. با اعمال بایاس مثبت و در شرایط ولتاژ کاتد ۱ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر، مشخصه ولتاژ-جریان پروب به دست آمد. با تحلیل نمودار ولتاژ-جریان و روابط تحلیلی، دمای الکترونی محاسبه شده در این شرایط کاری در دستگاه برابر با ۵۰.۱ کیلو الکترون ولت می‌باشد. این نتیجه با نتایج به دست آمده در شرایط آزمایشگاهی یکسان در مراجع [۴-۶] منطبق می‌باشد که درستی نتایج و آزمایشات انجام شده در کار حاضر را نشان می‌دهد.



۶. مراجع

1. G.H. Miley "A portable neutron/tunable X-ray source based on inertial electrostatic confinement" Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. A, Vol 422, 16-20, 1999.
2. R. P. Ashley, G. L. Kulcinski, J. F. Santarius, S. KrupakarMurali, G. Piefer, and R. Radel "Steady State D3He Proton Production in an IEC Fusion Device", Fusion Technology, Vol. 39, 546, 2001.
3. G. L. Kulcinski and J. F Santarius, "New Opportunities for Fusion in the 21st Century-Advanced Fuels", Fusion Technology, Vol. 39, p. 480, 2001.
4. R. Meyer, Inertial electrostatic confinement: theoretical and experimental studies of spherical devices, Thesis, Doctor of Philosophy, 2007.
5. Z. Yu, Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Device as Plasma Injection Source, Thesis, Master of Science, 2015.
6. D. Bhattacharjee, D. Jigdung, N. Buzarbaruah, S. R. Mohanty, and H. Bailung. "Studies on virtual electrode and ion sheath characteristics in a cylindrical inertial electrostatic confinement fusion device." Physics of Plasmas 26, 073514, 2019.