

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

بهینه سازی تجربی تولید یون خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی امیر کبیر با آند مخروطی شکل

مرتضی حبیبی - فاطمه محمدیان - علی مسعودی - مهدی ولی‌خانی - صدیقه‌السادات طبایی - ملیکا محسنی
آزمایشگاه گداخت هسته‌ای، دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

در این مقاله، اثر هندسه‌ی نوک آند یک دستگاه پلاسمای کانونی ۲kJ بر شدت باریکه‌ی یون بررسی شد. سیگنال جریان یون توسط یک فنجان فارادی در بالای الکتروود ثبت شد و در ولتاژ ۱۲kV و سه مقدار فشار، برای هر محدوده پنج شات منجر به پینچ زده شد و میانگین سطح زیر منحنی آشکارساز به عنوان شدت باریکه‌ی یون گاز آرگون حساب شد. طبق نتایج شدت یون به ترتیب از هندسه‌ی استوانه‌ای توخالی، استوانه‌ای توپر، مخروطی توخالی و مخروطی توپر رو به افزایش است. همچنین شدت سیگنال یون بستگی شدیدی به تغییر هندسه‌ی آند داشته و برای افزایش بازدهی دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان مولد یون، هندسه‌ی مخروطی سبب افزایش سه برابری در شدت جریان یون می‌گردد.

کلمات کلیدی: دستگاه پلاسمای کانونی، فنجان فارادی، سیگنال یون، هندسه‌ی مخروطی

۱-مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی شتابدهنده‌ی مگتوهیدرودینامیکی با الکترودهای هم محور است که بخشی از انرژی الکتریکی خازن (از محدوده انرژی ۱kJ تا ۱MJ در دستگاه‌های متداول) در نوک الکتروود مرکزی (آند) به انرژی پلازما تبدیل می‌شود [۱]. مشخصه‌ی پلاسمای کانونی عبارت است از: دمای $۱-۳\text{keV}$ ، چگالی $۱۰^{۱۹}/\text{cm}^3$ و عمر ۳۰۰ns - ۲۰۰ . ذکاالله و همکارانش اثر شکل آند (استوانه‌ای، مخروطی، باریک شونده) را بر شدت اشعه‌ی ایکس و نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی ۳kJ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای هندسه‌ی باریک شونده، شدت تابش ایکس افزایش می‌یابد، در حالی که برای آند مخروطی بسیار کاهش یافته و این اثر را به عدم فاز فروپاشی شعاعی در آند مخروطی نسبت دادند [۲]. تالوکدار و همکارانش تأثیر هندسه‌ی آند بر ساختار پینچ و گسیل اشعه‌ی ایکس را با چهار هندسه‌ی استوانه‌ای، واگرا، بیضوی و همگرا در پلاسمای کانونی $۲/۲\text{kJ}$ بررسی کردند که بهره‌ی اشعه‌ی ایکس در هندسه‌ی همگرا بیشتر و به ترتیب، هندسه‌های استوانه‌ای، بیضوی و واگرا کمترین مقدارها را داشتند [۳]. محمدی و همکارانش تأثیر سه هندسه‌ی

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

آند استوانه‌ای، مخروطی و کروی را بر گسیل اشعه‌ی ایکس نرم و لایه جریان با استفاده از گاز نئون بررسی کردند که پیشینه‌ی بازدهی اشعه‌ی ایکس نرم برای هندسه‌ی استوانه‌ای بدست آمده و برای دو هندسه‌ی دیگر تقریباً نصف هندسه‌ی استوانه‌ای بوده است [۴]. موهانتی و همکارانش مشخصات یون گسیلی و تغییرات آن در فشارها و زوایای مختلف و با سه هندسه آند استوانه‌ای توخالی، تخت و کروی با گاز نیتروژن و با استفاده از آشکارساز فارادی کاپ در یک دستگاه پلاسمای کانونی kJ ۲/۲ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که چگالی یون‌ها برای آند کروی شکل بیشتر بود که به دینامیک لایه‌ی جریان در انتقال اندازه حرکت از فاز محوری به فاز شعاعی نسبت داده شد [۵]. در این مقاله، اثر هندسه‌ی مخروطی شکل نوک آند دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر بر شدت یون‌های گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر مطالعه شده است.

۲- چیدمان تجربی

پلاسمای کانونی امیرکبیر از نوع مدر با مشخصات $L_0=115nH$ ، $V_0=16kV$ ، $C_0=40\mu f$ و با انرژی حدود kJ ۴ است که جنس محفظه از فولاد ضد زنگ و حجم آن در حدود cm^3 4×10^4 می باشد. صفحه پایینی متصل به آند از جنس برنج و با شعاع کل cm ۱۷/۴ است [۶]. آند دستگاه از جنس مس و ارتفاع آن cm ۱۴/۸ و قطر آن cm ۲/۷۸ می باشد. صفحه برنجی متصل به آند، با ۱۶ اتصال به اسپارگ گپ متصل می شود. سیستم متشکل از ۶ میله کاتد مسی به ارتفاع cm ۱۴/۵ و قطر cm ۰/۹ می باشد که بر روی صفحه مسی سوار می شوند. میله های کاتد در شعاع cm ۴/۴۷ از محور سیستم قرار گرفته اند. عایق دستگاه از جنس پیرکس و ارتفاع، قطر و ضخامت آن به ترتیب cm ۵/۲ و cm ۳ و cm ۰/۳ می باشد. محفظه دستگاه شامل ۶ دریچه در فواصل متقارن به قطر cm ۸/۵ می باشد که برای نصب ابزارهای تشخیصی و یا جهت تصویر برداری از فضای داخل محفظه تعبیه شده اند. با استفاده از آشکارساز فارادی کاپ می توان سیگنال جریان یون‌های پر انرژی حاصل از ناپایداری و تخریب پینچ پلاسمای کانونی را ثبت نمود. در این آشکارساز، ولتاژ معکوس باعث شتاب‌گیری یون‌ها به درون فنجان شده، با برخورد یون به سطح داخلی، الکترون‌ها از سطح کنده می‌شوند و توسط دیواره جذب می‌شوند. با جذب الکترون‌ها، جریانی القا می‌شود که توسط مدار جدا کننده از ولتاژ بایاس جدا شده و در انتها توسط اسیلوسکوپ ثبت می‌گردد. طبق شکل (۱) هندسه‌های به کار رفته به عنوان نوک آند دستگاه عبارتند از: آند استوانه‌ای مسطح، آند استوانه‌ای با سر تو خالی (قسمت خالی سر آند نیز به شکل استوانه است)، آند مخروطی با سر مسطح و آند مخروطی با سر تو خالی. قسمت خالی سر آند نیز به شکل استوانه است و در انتهای آند

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

دستگاه قرار می‌گیرند. در همه این هندسه‌ها، طول کل آند ثابت بوده و برابر با $14/8 \text{ cm}$ (مطابق پارامترهای طراحی دستگاه) می‌باشد.



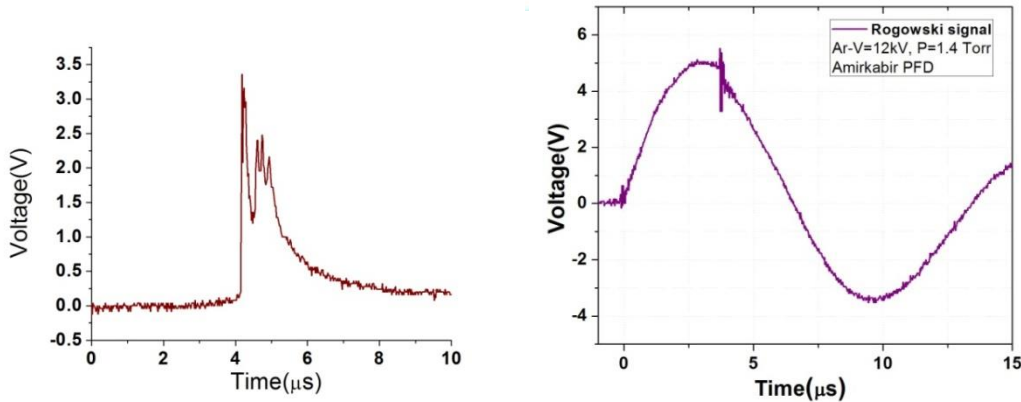
شکل (۱): هندسه‌ی نوک آندهای بکار رفته در آزمایش‌ها همراه با مجموعه‌ی آند و کاند دستگاه

۳- نتایج تجربی

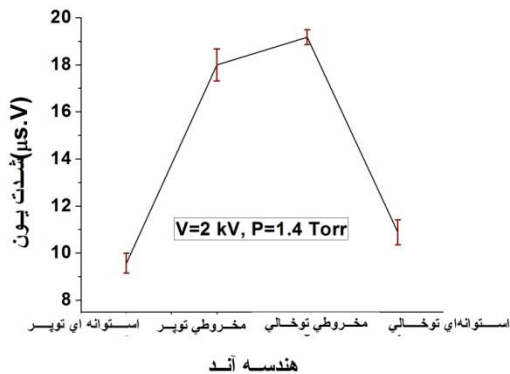
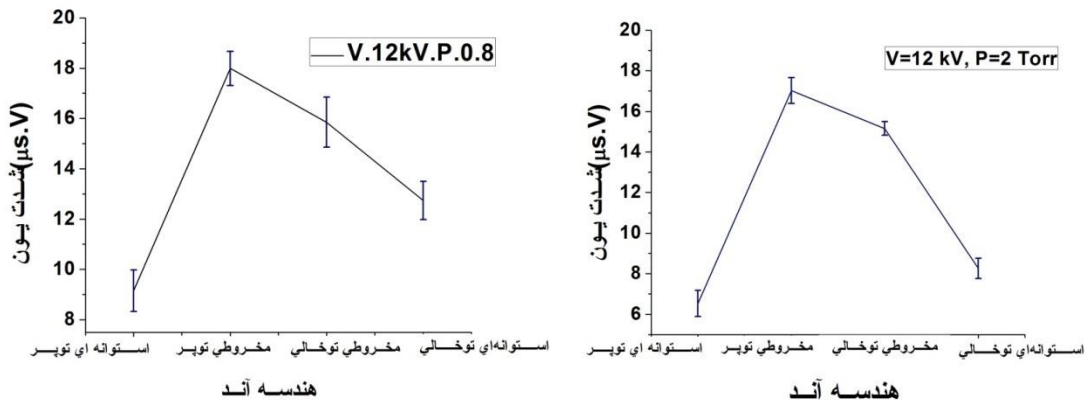
در آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی تاثیر هندسه‌ی آند، از گاز کاری آرگون استفاده شده است. پس از قرار گیری هندسه‌ی مربوطه در داخل محفظه، خازن دستگاه تا ولتاژ ۱۲ کیلو ولت شارژ شده است و بازه‌ای از فشارهای ممکن جهت تشکیل پینچ در نظر گرفته شده است؛ با توجه به پارامترهای طراحی دستگاه، سه مقدار فشار $0/8 \text{ torr}$ ، $1/4 \text{ torr}$ و 2 torr را که در این محدوده دستگاه در ولتاژ مورد نظر قادر به تشکیل پینچ پلاسماست را انتخاب کرده و سطح زیر منحنی جریان فنجان فارادی را حساب می‌کنیم.

در شکل (۲) نمونه‌ای از سیگنال جریان تخلیه‌ی الکتریکی منجر به تشکیل پینچ پلاسما نشان داده شده است. برای اطمینان از تشکیل پینچ می‌بایست سیگنال جریان حاصل از پیچ‌ی روگوفسکی به صورتی که در این شکل ثبت شده است، باشد.

۱۶ و ۵ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل (۲): نمونه ای از سیگنال جریان تخلیه الکتریکی ثبت شده توسط پیچهای روگوفسکی در ولتاژ 12 kV و فشار $1/4\text{ Torr}$ با گاز آرگن و آند مخروطی با سر مسطح، چپ) نمونه ای از سیگنال فنجان فارادی



شکل (۳): شدت یونهای گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی در هندسه های مختلف آند در ولتاژ ثابت و فشارهای مختلف

۴- تحلیل و نتیجه گیری

۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

شکل (۳) ثابت می‌کند که در همه‌ی فشارهای کاری، شدت باریکه‌ی یون گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی در آند با هندسه‌ی نوک مخروطی توپر بیش از هندسه‌ی استوانه‌ای است. همچنین آند مخروطی توخالی نیز در قیاس با آندهای استوانه‌ای توپر و توخالی به شدت باریکه‌ی یونی بیشتر انجامیده است. به عبارت دیگر، با توجه به افزایش چندبرابری شدت باریکه‌ی یون ثبت شده توسط فنجان فارادی در بالای الکتروود آند در اثر گذار از آند استوانه‌ای به آند مخروطی، هندسه‌ی انتهای الکتروود مرکزی نقش قابل توجهی در افزایش بهره‌ی یون دستگاه خواهد داشت. در آندهای استوانه‌ای معمولی فرض می‌شود که پس از اتمام کامل فاز محوری، لایه‌ی جریان وارد فاز شعاعی می‌شود، در حالی که در آندهای مخروطی بخاطر هندسه‌ی لبه‌ی آند، لایه‌ی جریان زاویه‌ی بسیار بزرگی با سطح آند در لحظه‌ی گذار می‌سازد. به عبارت دیگر در مورد آند استوانه‌ای لایه‌ی جریان یک زاویه‌ی بسیار کوچک نسبت به سطح آند در لحظه‌ی گذار می‌سازد. بنابراین با شروع فاز واپاشی شعاعی، مولفه‌ی محوری نیروی لورنتس بزرگ‌تر از مولفه‌ی شعاعی آن است. این نیروی محوری به شدت با انحنای لایه‌ی جریان تغییر می‌کند و قسمت جلویی لایه‌ی جریان را بلندتر و به صورت منحنی می‌سازد. با افزایش این زاویه، نیروی محوری افزایش می‌یابد و لایه‌ی جریان را به سرعت به سمت محور آند می‌کشد. در هندسه‌ی مخروطی حرکت لایه‌ی جریان از فاز محوری به فاز شعاعی بتدریج در اثر غالب بودن هر دو مولفه‌ی شعاعی و محوری نیروی لورنتس رخ می‌دهد. این گذار آرام از فاز محوری به فاز شعاعی، دلیل بالا بودن فراوانی پینچ‌های موفق به تشکیل پینچ در هندسه‌های مخروطی نیز می‌باشد.

با عنایت به کمیت $I_0 / (a\sqrt{\rho_0})$ به عنوان پارامتر محرک (S) که به طور مستقیم به سرعت محوری و شعاعی لایه‌ی جریان وابسته است نیز می‌توان استدلال مناسبی برای افزایش شدت یون‌ها در هندسه‌ی مخروطی آند ارائه نمود. با استفاده از مدل برف‌روب در فاز محوری حرکت لایه‌ی جریان پلازما و مدل اسلاگ برای فاز شعاعی، سرعت‌های مشخصه‌ی فاز محوری و شعاعی به ترتیب عبارتند از:

$$(1) c_a = \frac{z_0}{t_a} = \frac{(I/a)}{\rho^{1/2}} \left[\frac{\mu \ln c}{4\pi^2(c-1)} \right]^{1/2} = \frac{(I/a)}{\rho^{1/2}} g_a$$

$$(2) c_r = \frac{a}{t_r} = \frac{(I/a)}{\rho^{1/2}} \left[\frac{\mu(\gamma+1)}{16\pi^2} \right]^{1/2} = \frac{(I/a)}{\rho^{1/2}} g_r$$

که در آن b شعاع بیرونی، a شعاع داخلی، μ نفوذپذیری مغناطیسی، z_0 طول الکتروود داخلی، I جریان مشخصه، ρ چگالی گاز، γ نسبت گرمایی ویژه و g_a و g_r ثابت‌های هندسی حاکم بر فازهای محوری و شعاعی اند؛ به طوری که g_r ثابت بوده و g_a از مقدار متوسط ۰/۵۲ به اندازه‌ی کمتر از ده درصد تغییر می‌کند. از اینرو c_r و c_a فقط به پارامتر محرک جریان (S) وابسته اند. اندازه‌ی پارامتر محرک برای آندهای مخروطی و کروی به دلیل کاهش شعاع آند (a) مقدار بیشتری دارد، در حالی که برای آند استوانه‌ای با شعاع بزرگ‌تر، کمتر است. بنابراین در آندهای کروی و

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

مخروطی با شعاع کوچک‌تر و در نتیجه، پارامتر محرک بالاتر، افزایش انرژی جنبشی پلاسما و ناپایداری های لایه جریان را شاهد هستیم که یکی از نتایج آن، بهره‌ی یون بالاتر خواهد بود. در نتیجه چنانچه بخواهیم از دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان سیستم مولد باریکه‌ی یونی استفاده کنیم، تغییر هندسه‌ی آنند از استوانه‌ای به مخروطی می‌تواند باعث بهبود شدت یون‌های گسیلی شود.

مراجع

-] J.W. Mather, "Investigation of the high energy acceleration mode in the coaxial gun," Phys. Fluids Suppl., vol. 7, 1964
-] M Zakaulah, Intiaz Ahmady, A Omarx, " G Murtazay and M M Begz, Effects of anode shape on plasma focus operation with argon", Plasma Sources Sci. Technol. 5 ,544–552, Printed in the UK ,1996
-] N. Talukdar, N.K. Neog, T.K. Borthkur, " Effect of anode shape on pinch structure and X-ray emission of plasma focus device" , Results in Physics 3, 142–151,2013
-] M A Mohammadi, , S Sobhanian, C S Wong, S Lee, P Lee and R S Rawat" The effect of anode shape on neon soft x-ray emissions and current sheath configuration in plasma focus device"J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 045203 (10pp), 2009
-] S. R. Mohanty, N. K. Neog, H. Bhuyan, R. K. Rout, R. S. Rawat, and P. Lee, " Effect of Anode Designs on Ion Emission Characteristics of a Plasma Focus Device", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 46, No. 5A, 2007, pp. 3039–3044
-] M. Habibi, R. Amrollahi and G. R. Etaati, Design, construction and the first experiments on the Amirkabir Plasma Focus (APF) facility, Plasma Devices and Operations, Vol. 16, No. 3, September 2008, 163–169