



تأثیر پیش‌یونش بر بهبود عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی مدر MTPF2.4kJ

سمانه فاضل‌پور^{ID}، امیر چخماچی‌دوم^{ID}، علی نصیری^{ID}

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

*Email: achakhmachi@gmail.com

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

چکیده

در این مقاله تأثیر پیش‌یونش با استفاده از مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم بر روی مشخصات عملکردی پلاسمای کانونی نوع مدر با انرژی ۲/۴ کیلوژول که توسط بانک خازنی ۱۲ میکروفاراد تا حداکثر ولتاژ ۲۰ کیلوولت شارژ می‌شود، برای گاز هیدروژن ارائه شده است. در این کار مشخصات نشانک‌های جریان و مشتق جریان دستگاه در هر دو حالت بدون پیش‌یونش و با پیش‌یونش در فشار کاری بهینه ۰/۸۵ تور اندازه‌گیری و مقایسه شد. همچنین پرتوی ایکس سخت گسیلی در هر تخلیه و پرتو یون گسیلی دستگاه در هر تخلیه به ترتیب به وسیله آشکارساز سوسونز پلاستیک Ne102 اشعه ایکس و فنجان فارادی در هر دو حالت بدون پیش‌یونش و با پیش‌یونش، در فشار بهینه اندازه‌گیری و بررسی شد. نتایج به دست آمده از بررسی نشانک‌های جریان و مشتق جریان دستگاه نشان می‌دهد که با وجود پیش‌یونش از طریق مدار مقاومت شنت، شکستگی در نشانک‌های جریان و مشتق جریان، در زمان تشکیل تنگش، با شیب و عمقی به مراتب بیشتر نسبت به شکستگی در نشانک‌های جریان و مشتق جریان در زمانی که مدار پیش‌یونش فعال نیست، دیده می‌شود. این نتایج به معنی تشکیل تنگش قوی‌تر در حضور پیش‌یونش از طریق مدار مقاومت شنت بوده و نیز تنگش در نشانک‌ها با وضوح بهتر قابل مشاهده است. از سوی دیگر بررسی و مقایسه دامنه نشانک‌های در یافتی از سیستم تشخیصی فنجان فارادی در دو حالت نشان می‌دهد که در حضور پیش‌یونش، شدت پرتو ایکس سخت گسیلی دستگاه به مراتب بیشتر از زمانی است که مدار پیش‌یونش فعال نیست. بنابراین پیش‌یونش به شکل معناداری موجب افزایش بازده دستگاه پلاسمای کانونی، بهبود شدت پرتو ایکس سخت گسیل شده و افزایش جریان پرتو یونی تولید شده، می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای کانونی، پیش‌یونش، مقاومت شنت، پرتو ایکس سخت، شدت پرتو یون، جریان تخلیه

The effect of pre-ionization on improving the performance of mather type plasma focus device MTPF2.4kj

S. Fazelpour, A. Chakhmachi*, A. Nasiri

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

Technical Paper

Received: 14.05.2024,

Revised: 30.09.2024,

Accepted: 30.09.2024

Abstract

The impact of pre-ionization using a 330 MΩ shunt resistor on the performance characteristics of a Mather Type plasma focus device with 2.4 kJ of energy, charged by a 12 μF capacitor bank to a maximum voltage of 20 kV, will be discussed in relation to hydrogen gas. In this study, the signal characteristics of the current and the current derivative of the device were measured and compared with and without pre-ionization at an optimal operational pressure of 0.85 Torr. Additionally, the emitted hard X-rays and ion beam in each shot were measured using a Ne102 X-ray plastic scintillation detector and Faraday cup, respectively. These measurements were conducted and compared with and without pre-ionization at the optimal pressure. The results from the current and current derivative signals of the device indicate that with initial pre-ionization, the signals exhibit a deeper and sharper fracture at the pinch time compared to when the pre-ionization circuit is inactive. This suggests that a stronger and more defined pinch occurs with pre-ionization. Furthermore, analysis of the Faraday cup signal amplitudes reveals that the intensity of emitted hard X-rays is significantly higher when pre-ionization is utilized compared to when it is not. Therefore, pre-ionization markedly enhances the efficiency of the plasma focus device, increases the intensity of emitted hard X-rays, and generates an ion beam with a higher current.

Keywords: Plasma focus, Pre-ionization, Shunt resistor, Hard X-ray, Ion beam intensity, Discharge current



۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، نیاز فزاینده‌ای برای دستیابی به منابع اشیعه ایکس به دلیل کاربردهای گسترده آن‌ها در صنعت، احساس می‌شود. در میان این دستگاه‌ها، پلاسما یونانی به دلیل داشتن کاربردهای فراوان و عملکرد ساده، بسیار مورد اقبال عمومی قرار گرفته است. از سوی دیگر دستگاه پلاسما یونانی یکی از بهترین و کاربردی‌ترین دستگاه‌ها برای تجربه فرایند گداخت، پژوهش در حوزه پرتو ایکس در گستره نرم و سخت و نیز پژوهش در حوزه باریکه‌های یونی می‌باشد. از این جهت محققین درصدد توسعه و بهینه‌سازی فرایند تشکیل پلاسما، کانونی هستند. بنابراین، بهینه‌سازی فرایند تشکیل پلاسما، تولید و گسیل پرتو ایکس، تولید و گسیل پرتو یونی در پلاسما یونانی و نیز دستیابی به بیشینه عملکرد آن یکی از مهمترین حوزه‌های تحقیقاتی به‌روز در دنیا به‌شمار می‌آید [۱-۴]. دستگاه پلاسما یونانی توانایی تولید پلاسما یونانی چگال با چگالی از مرتبه 10^{22} m^{-3} ، با دمای بالای چند کیلو الکترون‌ولت در مدت زمان کوتاه ۱۰ نانو ثانیه را دارد.

یکی از چالش‌های پیش‌رو در رابطه با دستیابی به شرایط مناسب، کاهش ناخالصی‌های نامطلوب در فرایند شکل‌گیری پلاسما و تشکیل تنگش در پلاسما یونانی است، به‌طوری که این مورد یکی از دلایل اصلی کاهش عملکرد دستگاه است. این ناخالصی‌ها معمولاً در اثر فرسایش و کند و پاش سطح آند در هنگام تشکیل پلاسما توسط الکترون‌های فراری تولید می‌شوند. بنابراین، باید روش‌هایی را برای کاهش ناخالصی‌های نامطلوب و نیز دستیابی به عملکرد بهینه دستگاه طراحی شود.

دستگاه‌های پلاسما یونانی به خانواده دستگاه‌های تنگش^۱ تعلق دارند و به‌صورت پالسی کار می‌کنند. این دستگاه‌ها می‌توانند به کمک تراکم و شتاب مغناطیسی، پلاسمایی داغ و چگال تولید کنند. دستگاه‌های پلاسما یونانی قابلیت تولید الکترون، یون، نوترون و پرتو ایکس نرم و سخت را در گستره گسترده از طول‌موج‌ها و انرژی‌ها را دارند. ماشین‌های پلاسما یونانی را می‌توان به عنوان چشمه‌های پالسی برای تولید پرتوهای پرانرژی و با شدت زیاد نیز در نظر گرفت. مهمترین این پرتوها عبارتند از پرتو ایکس نرم (با انرژی‌های کمتر از ۱۰ keV) و پرتو ایکس سخت (با انرژی‌های بیشتر از ۱۰ keV). گسیل پرتو ایکس نرم عمدتاً به علت برانگیختگی

اتم‌های گاز انجام می‌پذیرد. گسیل پرتو ایکس سخت نیز به علت برخورد الکترون‌های پرانرژی پلاسما با آند دستگاه و براساس مکانیزم پدیده تابش ترمزی تولید می‌شوند [۵، ۶]. تلاش‌های فراوانی برای افزایش شدت پرتو ایکس تولیدی و افزایش بازده دستگاه با استفاده از تغییراتی در پارامترهای بانک انرژی و جریان تخلیه و تغییراتی در شکل آند، جنس مواد به‌کار رفته در آند، کاهش شعاع الکترودها، افزایش فشار گاز انجام شده‌اند. در کنار این روش‌های ساختار محور، استفاده از پیش‌یونش برای از بین بردن میدان‌های الکتریکی قوی که باعث انتشار الکترون‌های فراری می‌شوند، روشی مؤثر جهت افزایش شدت پرتو ایکس تولیدی و افزایش بازده دستگاه معرفی شده است [۷، ۸].

پیش‌یونش جهت یونیزه کردن گاز داخل محفظه، پیش از شروع به کار سیستم انجام می‌شود. به عبارتی دیگر با داشتن فرایند پیش‌یونش مناسب، ولتاژ مورد نیاز برای آغاز تخلیه کاهش می‌یابد. به تبع کاهش ولتاژ، نیاز به منابع تغذیه با مشخصات ولتاژ و جریان بالا وجود ندارد و در هزینه نیز صرفه‌جویی می‌گردد. با استفاده از پیش‌یونش تا حد زیادی می‌توان پلاسما یونانی یکسان و یکنواخت در راستاهای مختلف، و نیز چگال‌تری ایجاد کرد. که این عمل توان خروجی دستگاه و شدت پرتو ایکس تولیدی را نیز افزایش می‌دهد.

چندین روش پیش‌یونش در دستگاه پلاسما یونانی وجود دارد که تاکنون توسط محققین بررسی شده است. روش‌های پیش‌یونش در دستگاه پلاسما یونانی عبارتند از [۹-۱۵]:

- استفاده از رینگ اورانیم ۲۳۸ تهی شده (DU)
- استفاده از باریکه الکترون
- استفاده از مقاومت شنت.

دینامیک کلی تشکیل پلاسما در دستگاه پلاسما یونانی اساساً بدین‌صورت است که ابتدا در فاز شکست، با اعمال پتانسیل بسیار بالا بین دو الکتروده آند و کاتد، جریان تخلیه می‌شود. در فاز دوم، غلاف جریان متقارن محوری در انتهای عایق دستگاه تشکیل می‌شود و غلاف جریان بعدی به سمت انتهای باز الکتروده مرکزی (آند) توسط نیروی $J \times B$ شتاب می‌گیرد. در فاز سوم، غلاف جریان به سرعت در انتهای مجموعه الکتروده مرکزی فرو می‌ریزد. در شکل ۱، طرحی از دستگاه پلاسما یونانی به همراه فرایند تشکیل پلاسما در آن نشان داده شده است.

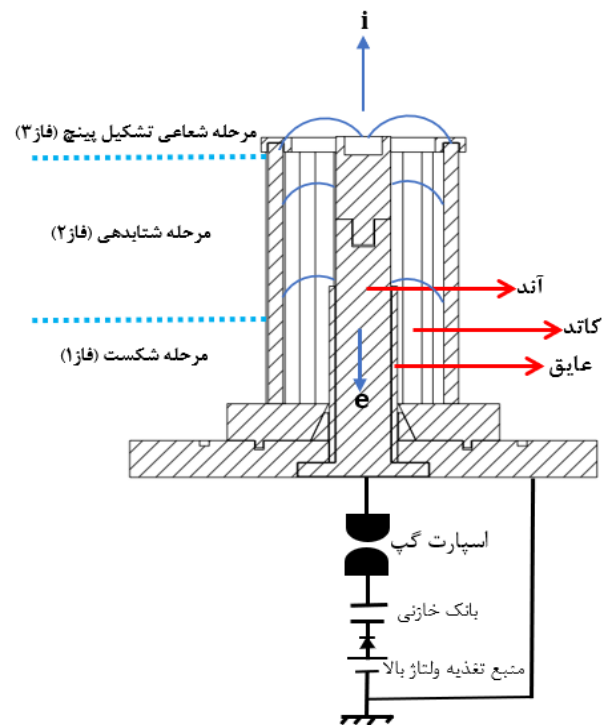


با به حداقل رساندن غیریکنواختی‌ها در مرحله شکست و فروپاشی محوری، می‌توان پرتوهای ایکس و نوترون تقویت شده را در طول فاز فروپاشی به دست آورد.

کاهش غیریکنواختی‌ها و افزایش پایداری پلاسمای تنگش به شرایط پیش‌یونش قبل از فاز اولیه تخلیه اصلی بستگی دارد. پیش‌یونش ممکن است به طور مستقل یا با روش‌های وابسته به تخلیه بعدی، تولید شود که با کاهش امپدانس اولیه بین الکترودها، بر شروع و تثبیت تخلیه تنگش به آرامی، اثر می‌گذارد. بنابراین، منجر به عملکرد پایدار تخلیه تنگش با تراکم بالاتر، چگالی انرژی بیشتر و زمان محبوس شدن پلاسما طولانی‌تر می‌شود.

اثر پیش‌یونش بر روی عملکرد دستگاه تنگش زتا^۱ گاز دمنده^۲، توسط رودن و همکاران مطالعه شده است [۱۶]. آن‌ها گزارش کردند که پیش‌یونش باعث افزایش پایداری و بهبود یکنواختی پلاسمای تنگش و کاهش دامنه ناپایداری ریلی-تیلور در این دستگاه شده است. فریوالد^۳ و همکاران اثر پیش‌یونش را بر روی گسیل نوترون، از طریق تزریق یک پرتو الکترونی نسبتی پالسی به یک دستگاه پلاسمای کانونی مطالعه کردند [۱۷]. مطالعات آن‌ها افزایش پنج برابری در گسیل نوترون را گزارش می‌کند. از جمله موارد گزارش شده دیگر می‌توان به بررسی اثر پیش‌یونش ناشی از تخلیه درخششان مداوم، در فاز شکست دستگاه پلاسمای کانونی، توسط کیس^۴ اشاره کرد [۱۸].

در کار دیگری مکجوچ^۵ نشان داد که استفاده از امواج فرکانس رادیویی به عنوان عامل پیش‌یونش در یک دستگاه تنگش زتا با گازکاری زنون در لیتوگرافی فرابنفش مفیدتر است [۱۹]. او نشان داد که پیش‌یونش به وسیله امواج فرکانس رادیویی می‌تواند، پلاسمای پیش‌یونش با چگالی بالاتر، با یک مرتبه بزرگی بیشتر، نسبت به روش‌های دیگر ارائه دهد. و نیز باعث تکرارپذیری بهتر خروجی پرتو ایکس می‌شود. در داخل کشور نیز می‌توان به مطالعاتی که در دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات با استفاده از مقاومت شنت جهت پیش‌یونش در پلاسمای کانونی انجام شده است، اشاره نمود [۲۰]. این مطالعات جهت بررسی کاهش ناخالصی و افزایش پایداری تنگش پلاسما استفاده شده است. همچنین تغییراتی در شکل و مشخصات کاتدها ایجاد کرده‌اند.



شکل ۱. طرحی از دستگاه پلاسمای کانونی به همراه فرایند تشکیل پلاسما در آن.

در لحظه تشکیل پلاسمای چگال و فروپاشی آن، باریکه‌های پراثری همانند الکترون‌ها، یون‌ها و نوترون‌ها، تابش‌های ایکس سخت و نرم تولید خواهند شد. با توجه به خصوصیات پرتوهای گسیلی دستگاه پلاسمای کانونی، برای کاربردهایی همانند لیتوگرافی پرتو ایکس، میکروسکوپ تماسی، ریز ماشین کاری، لیتوگرافی پرتو الکترونی، رادیوگرافی و همچنین برای پردازش و لایه نشانی لایه‌های نازک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در راستای بهبود عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی، پارامترهای مختلف همانند نوع هندسه و ابعاد آند و کاتد، فشار گاز تزریقی، نوع گاز تزریقی و غیره می‌توانند بر بهبود بازدهی دستگاه بسیار تأثیرگذار باشند. بنابراین، در چند سال گذشته تلاش‌هایی برای تنظیم پارامترهای مختلف دستگاه پلاسمای کانونی در جهت عملکرد بهینه آن انجام شده است. به منظور بهینه‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی، مشاهده شده است که هر سه فاز تشکیل فرایند این دستگاه شامل فاز شکست، شتاب‌دهی و فروپاشی نقش حیاتی را ایفا می‌کنند. این عملکرد بهینه، با تولید نوترون‌ها، پرتو ایکس و پرتوهای ذرات باردار در طول فاز فروپاشی دستگاه کانونی پلاسما مرتبط خواهد بود.

وجود پیش‌یونش برای دستگاه پلاسمای کانونی در فاز شکست و فاز شتاب‌دهی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر دینامیک غلاف پلاسما در طول فاز فروپاشی بگذارد. گزارش شده است که

1. Z-Pinch
2. Hollow Gas-Puff Z-Pinch
3. Freiwald
4. Kies
5. McGeoch





شکل ۲. نمای از چیدمان آزمایشگاهی دستگاه پلاسمای کانونی مدر $MTPF2.4kJ$.

در این آزمایش، به منظور اندازه‌گیری مشتق جریان از یک پروب روگوفسکی، جهت اندازه‌گیری جریان از یک پروب روگوفسکی به همراه یک مدار انتگرال‌گیر، برای اندازه‌گیری شدت پرتو ایکس سخت از آشکارساز سوسوزن پلاستیکی Ne^{102} و جهت اندازه‌گیری گسیل پرتو یون از فنجان فارادی استفاده شده است.

۱.۲ پیش‌یونش

پیش‌یونش با استفاده از جریان کم ($0.2-0.102$ میلی‌آمپر) و ولتاژ بالا از طریق یک مقاومت شنت حاصل می‌شود. برای این منظور یک مسیر موازی با سوئیچ اسپارک‌گپ در مدار دشارژ با استفاده از مقاومت شنت 330 مگااهم، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است ایجاد می‌کنیم. در طول زمان شارژ بانک خازنی، جریان به‌طور پیوسته جریان می‌یابد. جریان الکتریکی از طریق مقاومت شنت از آند به صفحه پایه کاتد جریان یافته و باعث یونیزه‌شدن گاز در نزدیکی محل اتصال آند و صفحه پایه کاتد می‌شود.

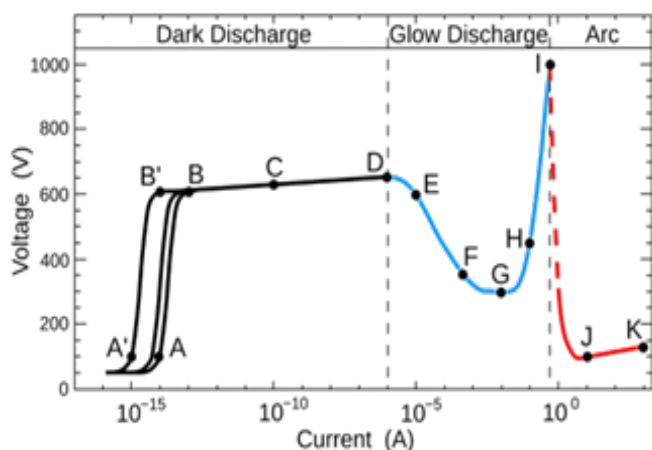
در این مقاله به بررسی تأثیر پیش‌یونش بر عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی مدر $MTPF2.4kJ$ از نظر گسیل پرتو ایکس، گسیل یون و شرایط تنگش در فشارکاری 0.85 تور^۱ پرداخته شده است. در این بررسی، پارامترهایی همانند مشتق جریان، جریان، نشانک فنجان فارادی و همچنین گسیل پرتو ایکس سخت برای گاز هیدروژن برای دو حالت با و بدون پیش‌یونش مورد پردازش و مطالعه قرار گرفته شد.

انتخاب مقاومت شنت در محدوده 50 تا 400 مگااهم و نیز دستیابی به فشار بهینه و مناسب جهت عملکرد بهینه دستگاه پلاسمای کانونی با وجود پیش‌یونش از طریق مدار مقاومت شنت، جزء مراحل بررسی تجربی لازم برای رسیدن به پیش‌یونش دستگاه پلاسمای کانونی است. در مورد تفاوت این تحقیق با کار بقیه محققین در حوزه پلاسمای کانونی، می‌توان به این نکته اشاره کرد که هر دستگاه پلاسمای کانونی با توجه به مشخصات خاص خود اعم از هندسه کاتد و آند، ابعاد قسمت‌ها، مشخصات بانک خازنی و سایر موارد، جهت استفاده از مدار پیش‌یونش مقاومت شنت، نیازمند ایجاد شرایط مناسب مختص به خود است. در این کار از یک مقاومت شنت 330 مگااهم استفاده شده اما با توجه به رفتار غیریکنواخت پلاسمای کانونی بیش از 100 تخلیه در فشارهای 0.7 ، 0.75 ، 0.82 ، 0.85 و 0.9 تور، در آزمایش‌های تجربی گرفته شده تا شرایط مناسب جهت پیش‌یونش به‌دست آید. بنابراین، بررسی نتایج تجربی برای رسیدن به شرایط بهینه کاری دستگاه پلاسمای کانونی $MTPF2.4kJ$ با استفاده از پیش‌یونش از طریق مدار مقاومت شنت 330 مگااهم را می‌توان مهمترین دستاورد این تحقیق دانست.

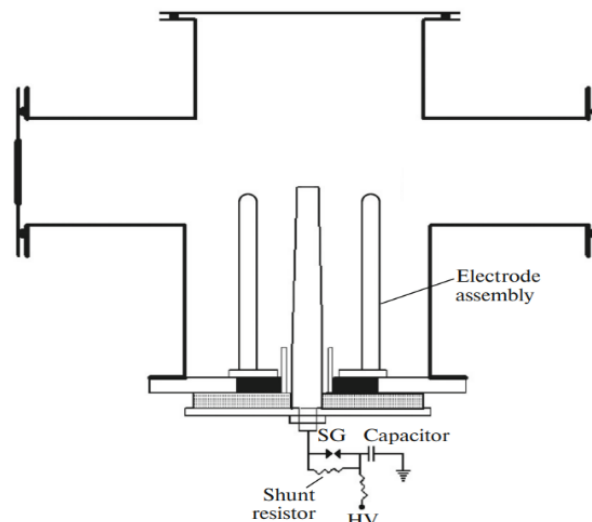
۲. چیدمان آزمایشگاهی

دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ($MTPF2.4kJ$) مورد استفاده در این مطالعه، دارای یک آند با هندسه استوانه‌ای با شعاع 14.5 میلی‌متر، طول 145 میلی‌متر و طول مؤثر 95 میلی‌متر از جنس مس بوده، که در مرکز آرایه‌ای 12 عددی از کاتدهای میله‌ای از جنس مس با شعاع 5 میلی‌متر و طول 145 میلی‌متر قرار گرفته است. عایق دستگاه یک لوله پیرکس با طول 96 میلی‌متر ضخامت 3 میلی‌متر و قطر داخلی 30 میلی‌متر و قطر خارجی 36 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بانک خازنی این دستگاه دارای ظرفیت 12 میکروفاراد است و تا حداکثر ولتاژ 20 کیلوولت توانایی شارژ دارد. همچنین القاییدگی کل دستگاه در حدود 136 نانو هانری می‌باشد. شکل ۲، نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی مدر $MTPF2.4kJ$ نشان داده شده است.

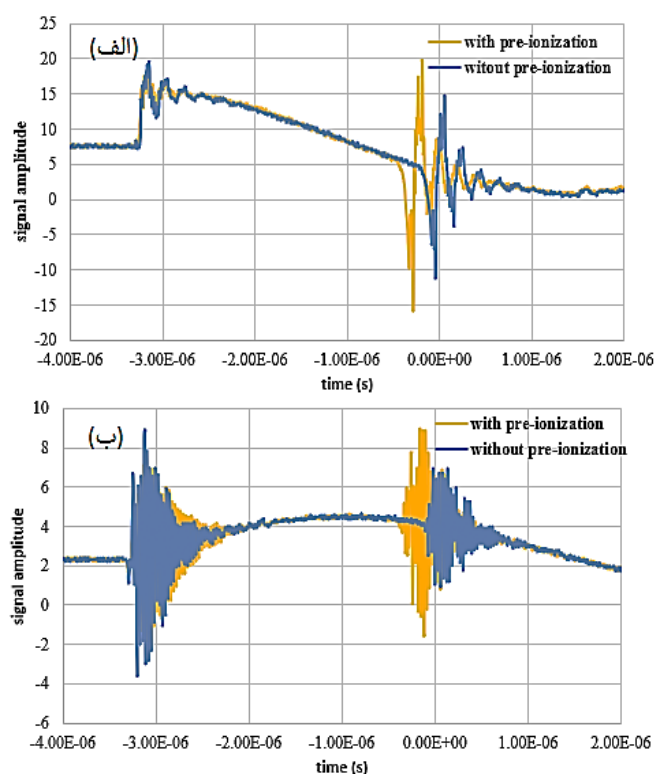




شکل ۴. نمودار مشخصه ولتاژ-جریان تخلیه الکتریکی گاز نئون در فشار ۱ تور.



شکل ۳. طرحی از قرارگیری مدار مقاومت شنت موازی با اسپارت گپ.



شکل ۵. الف) تغییرات جریان و ب) مشتق جریان، دستگاه پلاسمای کانونی مدر برای دو حالت با و بدون پیش‌یونش.

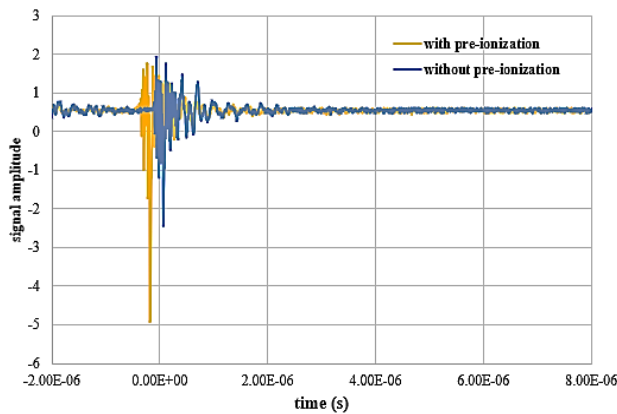
براساس شکل ۵، مشاهده می‌شود که وجود مقاومت شنت و پیش‌یونش اولیه گاز درون محفظه، منجر به ایجاد شیب مشخص و شدید در نشانک پیچه روگوفسکی خواهد شد که خود نشان‌دهنده تشکیل تنگش قوی‌تری نسبت به حالت بدون پیش‌یونش است. لازم به ذکر است که پیش‌بینی شده که در فشار بهینه، زمان تشکیل تنگش با حضور مقاومت شنت نسبت به حالت بدون مقاومت شنت، کاهش می‌یابد. در حقیقت

در مورد استفاده از مقاومت ۳۳۰ مگا اهمی در مدار پیش‌یونش باید گفت که اگر به نمودار مشخصه ولتاژ-جریان تخلیه الکتریکی گازها و به عنوان نمونه برای گاز نئون در فشار ۱ تور در شکل ۴، دقت کنیم [۲۱]، متوجه خواهیم شد که مرحله تخلیه درخشان در محدوده جریانی 10^{-6} تا 10^{-5} آمپر قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، تخلیه درخشان پایدار در محدوده جریانی 0.01 تا 0.1 آمپر رخ می‌دهد. با توجه به ولتاژ کاری ۱۲ کیلوولت آزمایشات انجام شده در این تحقیق، استفاده از مقاومت ۳۳۰ مگا اهمی، موجود و قابل دسترس برای این گروه کاری، سبب می‌شود جریان پیش‌یونش در محدوده تخلیه درخشان پایدار قرار می‌گیرد.

۳. بحث و نتایج

آزمایشات انجام شده به گونه‌ای صورت گرفته شد که گاز هیدروژن به محفظه تزریق شده و آزمایشات در فشار کاری برابر با ۰/۸۵ تور انجام گرفت. در این مقاله، تمام آزمایشات در دو شرایط، بدون حالت پیش‌یونش و با حالت پیش‌یونش (مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم) مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در شکل ۵، تغییرات جریان (الف) و مشتق جریان (ب)، دستگاه پلاسمای کانونی مدر 2.4 kJ MTPF برای دو حالت با (به رنگ نارنجی) و بدون پیش‌یونش (به رنگ آبی) در فشار کاری ۰/۸۵ تور نشان داده شده است.



شکل ۷. تغییرات شدت پرتو ایکس سخت در دو حالت با پیش‌یونش (به رنگ نارنجی) و بدون پیش‌یونش (به رنگ آبی).

براساس شکل ۷، مشاهده می‌شود که با اضافه کردن مدار پیش‌یونش، شدت پرتو ایکس سخت نسبت به حالت بدون مقاومت شنت به شکل معناداری افزایش می‌یابد و در این تخلیه، ایکس سخت قوی‌تری تولید خواهد شد. در حقیقت، شدت پرتو ایکس سخت در حالت با وجود پیش‌یونش نسبت به حالت بدون مقاومت شنت در فشار کاری ۰/۸۵ تور گاز هیدروژن در حدود سه برابر افزایش یافته است.

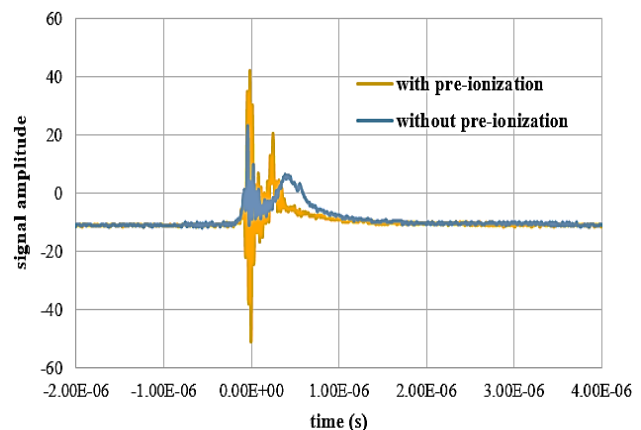
با توجه به ماهیت ذاتی عملکرد تصادفی دستگاه پلاسما کانونی به منظور یک بررسی دقیق و آماری، تغییرات بازده مشتق جریان، شدت یون‌های گسیلی و پرتو ایکس گسیلی، برای هشت پلان آزمایش در فشار کار ۰/۸۵ تور برای پیش‌یونش با مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم (به رنگ نارنجی) و بدون پیش‌یونش (به رنگ آبی)، در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که از یک طرف شدت پرتو ایکس سخت تابش شده توسط دستگاه برای حالت با کمک پیش‌یونش در مقایسه با حالت بدون پیش‌یونش برای تخلیه‌های هشت‌گانه در شرایط یکسان، تغییرات بسیار کمتری دارد. بنابراین دستگاه پلاسما کانونی در خصوص تولید پرتو ایکس در حضور پیش‌یونش قابلیت تکرارپذیری بیشتری دارد و دستگاه در این حالت عملکرد به نسبت یکسانی را در شرایط مشابه در هر پلان آزمایش از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر تکرار تخلیه در شرایط یکسان نشان می‌دهد که مقدار بیشینه بازده پرتو ایکس در حضور پیش‌یونش، بیشتر از حالت بدون پیش‌یونش است، و این مسئله به صورت معناداری قابل تکرار است. همچنان که در مقدمه اشاره شد، موضوع بهبود عملکرد دستگاه را عمدتاً می‌توان به افزایش یکنواختی غلاف جریان، کاهش امپدانس و کاهش ناخالصی‌ها با وجود پیش‌یونش نسبت داد.

پیش‌یونش اولیه گاز منجر به افزایش سرعت متوسط حرکت لایه جریان در دستگاه پلاسما کانونی به میزان سه برابر حالت بدون پیش‌یونش می‌گردد [۱۱].

در ادامه، با استفاده از یک پروب فنجان فارادی به بررسی مشخصات پرتو یون‌های شتاب یافته به سمت بالا در هر دو حالت با و بدون پیش‌یونش پرداخته شده است. در شکل ۵، تغییرات شدت یون‌های گسیل یافته در دو حالت با مقاومت شنت (به رنگ نارنجی) و بدون مقاومت شنت (به رنگ آبی) پرداخته شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ از نشانک گرفته شده از فنجان فارادی می‌توان متوجه شد، شدت پرتو یونی گسیل شده براساس شرایط پیش‌یونش به بیش از ۱/۵ برابر حالت بدون پیش‌یونش رسیده است. این خود نشان‌دهنده تولید پرتو یونی با جریانی بسیار بالاتر با وجود پیش‌یونش نسبت به حالت بدون پیش‌یونش است.

به منظور بررسی تأثیر پیش‌یونش بر مشخصات پرتو ایکس سخت گسیلی دستگاه به مطالعه نشانک‌های دریافتی از آشکارساز سوسوزن پلاستیکی می‌پردازیم. در شکل ۷، تغییرات شدت پرتو ایکس سخت از طریق نشانک‌های دریافتی بر روی اسیلوسکوپ در دو حالت با پیش‌یونش (به رنگ نارنجی) و بدون پیش‌یونش (به رنگ آبی) نشان داده شده است.



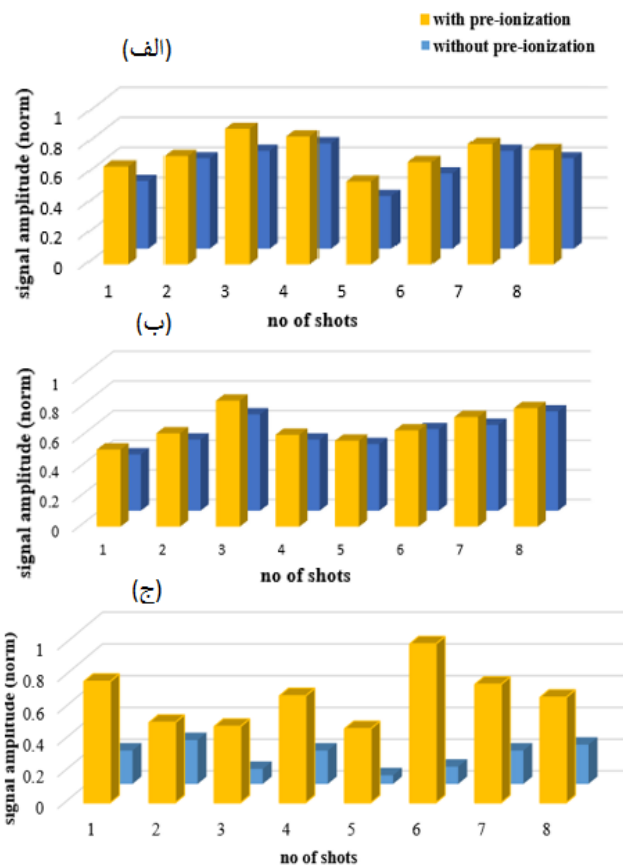
شکل ۶. تغییرات شدت یون‌های گسیل یافته در دو حالت با مقاومت شنت (به رنگ نارنجی) و بدون مقاومت شنت (به رنگ آبی).



آلودگی و ناخالصی از یک سو سبب افزایش سرعت طولی و شعاعی لایه جریان شده و از سوی دیگر سبب می‌شود احتمال برخورد و پراگندگی الکترون‌ها با این ناخالصی‌ها به شدت کاهش یابد. بنابراین با توجه به موارد سه‌گانه ذکر شده، تشکیل پلاسمای همگن‌تر، نیز تشکیل لایه جریانی با میزان جریان و یکنواختی سمتی بیشتر در فاز شکست، سبب افزایش نیروی لورنتس و کاهش دامنه ناپایداری‌ها از جمله ناپایداری رابی شده و این خود موجب تشکیل تنگش پایدارتر پلازما در فاز تنگش خواهد شد. این مورد ذکر شده به همراه تشکیل پلاسمای چگال‌تر و نیز لایه جریانی با جریان بیشتر در فاز شکست، سبب می‌شود که ما انتظار ایجاد شکست عمیق‌تر و با شیب تندتر در نشانک‌های مشتق جریان و جریان را داشته و در نتیجه تنگش قوی‌تری را با وجود پیش‌یونش پیش‌رو داشته باشیم. از سوی دیگر تشکیل لایه جریانی با یکنواختی سمتی بیشتر و نیز افزایش سرعت طولی و شعاعی لایه جریان سبب می‌شود زمان ورود به فاز تنگش با وجود پیش‌یونش کاهش یافته و زمان تشکیل تنگش به زمان بیشینه جریان دستگاه نزدیک‌تر شود. از این‌رو فرایند تنگش با وجود پیش‌یونش زودتر اتفاق خواهد افتاد. که این مورد نیز مطابق انتظار در فشار بهینه در تمامی نمودارها قابل تشخیص است. کاهش احتمال برخورد و پراگندگی الکترون‌ها از طریق کاهش ناخالصی از یک سو و تشکیل پلاسمای همگن‌تر و نیز تشکیل لایه جریانی یکنواخت از سوی دیگر، سبب می‌شود احتمال برخورد الکترون‌ها به سر آند دستگاه افزایش یابد. بنابراین انتظار می‌رود تعداد فوتون‌های پرتو ایکس گسیلی نیز افزایش قابل توجهی یابند. همچنان که از نشانک ثبت شده پرتو ایکس نیز مشخص است در این شرایط مطابق انتظار شدت پرتو ایکس گسیلی افزایش قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

تأثیر پیش‌یونش با استفاده از یک مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم بر روی مشخصات عملکردی پلاسمای کانونی نوع مدر MTPF۲.۴kJ با انرژی ۲/۴ کیلوژول برای گاز تزریقی هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته شد. در این بررسی، پارامترهای جریان، مشتق جریان، شدت باریکه یون و شدت پرتو ایکس سخت توسط ابزارهای تشخیصی رگوفسکی، فنجان فارادی و آشکارساز



شکل ۸. (الف) تغییر بازده مشتق جریان، (ب) شدت یون‌های گسیلی و (ج) پرتو ایکس، برای هشت پلان آزمایش برای پیش‌یونش با مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم (به رنگ نارنجی) و بدون پیش‌یونش (به رنگ آبی).

تأثیر به‌کارگیری پیش‌یونش اولیه (با استفاده از مدار مقاومت شنت)، از چند منظر فیزیکی قابل بیان است. (۱) تشکیل پلاسمای اولیه سبب وجود مقدار قابل توجه از الکترون‌های اولیه در فاز شکست شده، بنابراین از یک سو افزایش تعداد الکترون‌های سبب تشکیل پلاسمای چگال‌تر و نیز لایه جریانی با جریان بیشتر در فاز شکست خواهد شد. و از سوی دیگر توانایی حرکت آزادانه این الکترون‌ها در تمام جهات به صورت همسانگرد، سبب تشکیل پلاسمای همگن‌تر و نیز لایه جریانی با یکنواختی سمتی بیشتر در فاز شکست خواهد شد. (۲) پیش‌یونش اولیه در دستگاه سبب می‌شود که امیدانس در مدت زمان تشکیل لایه جریان کاهش یابد، بنابراین در فاز شکست و تشکیل لایه جریان در دستگاه، لایه جریانی با جریان بالاتر تشکیل خواهد شد. (۳) پیش‌یونش اولیه در دستگاه سبب تمیزی هرچه بیشتر محفظه دستگاه، کاهش الکترون‌های گریزان و کاهش آلودگی و ناخالصی خواهد شد. این کاهش

مراجع

1. Ahmed K.M, Diab F.B, Gaber W.H, Emara T.F, Abdelkader M.E. Design and Characterization of One-Capacitor Compact Plasma Focus Device with Tapered Anode. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2023;51:3500-3509.
2. Sohrabi M, Zarrinshad A. Novel "Ionology Art for Art Ionology Methods" in 4π plasma focus device space: bridging art, science and technology. *Journal of Cultural Heritage*. 2020;43:219-226.
3. Niranjana R, Rout R.K, Tomar B.S, Ramanjaneyulu P.S, Paranjape D.B, Kaushik T.C. Application of medium energy plasma focus device in study of radioisotopes. *Physics Letters A*. 2018;382(46):3365-3368.
4. Gribkov V.A, Borovitskaya I.V, Demina E.V, Kazilin E.E, Latyshev S.V, Maslyaev S.A, Pimenov V.N, Laas T, Paduch M, Rogozhkin S.V. Application of dense plasma focus devices and lasers in the radiation material sciences for the goals of inertial fusion beyond ignition. *Matter and Radiation at Extremes*. 2020;5(4).
5. Kato Y, Ochiai I, Watanabe Y, Murayama S. Plasma focus x-ray source for lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*. 1988;6(1):195-198.
6. Zakaullah M, Alamgir K, Shafiq M, Sharif M, Waheed A. Scope of plasma focus with argon as a soft X-ray source. *IEEE transactions on plasma science*. 2002;30(6):2089-2094.
7. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=131369>.
8. <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=462724>.
9. Ahmad S, Hussain S.S, Sadiq M, Shafiq M, Waheed A, Zakaullah M. Enhanced and reproducible neutron emission from a plasma focus with pre-ionization induced by depleted uranium (U238). *Plasma physics and controlled fusion*. 2006;48(6):745.
10. Zakaullah M, Waheed A, Ahmad S, Zeb S, Hussain S. Study of neutron emission in a low-energy plasma focus with β -source-assisted breakdown. *Plasma Sources Science and Technology*. 2003;12(3):443.
11. Ahmad S, Sadiq M, Shafiq M, Waheed A, Lee P, Zakaullah M. The effect of pre-ionization by a shunt resistor on the reproducibility of plasma focus x-ray emission. *Plasma Sources Science and Technology*. 2006;15(3):314.
12. Khan H.U, Shafiq M, Hussain S.S, Zakaullah M. Effect of preionization on soft x-ray emission and plasma dynamics in a small plasma focus system. *Journal of Applied Physics*. 2010;107(7):073301.
13. Ahmad S, Shafiq M, Zakaullah M, Waheed A. Depleted uranium (U238) induced preionization for enhanced and reproducible x-ray emission from plasma focus. *Applied Physics Letter*. 2006;89:61503.

سوسوزن پلاستیکی در دو حالت بدون پیش‌یونش و با پیش‌یونش برای یک فشار مشخص مورد اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج آزمایشات به‌دست آمده در این مقاله می‌توان موارد ذیل را برشمرد.

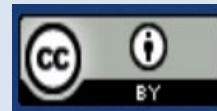
- با استفاده از مقاومت شنت و ایجاد پیش‌یونش اولیه گاز درون محفظه، شیب مشخص و شدید در نشانک پیچه روگوفسکی مشاهده شد که خود نشان‌دهنده تشکیل تنگش قوی‌تری نسبت به حالت بدون پیش‌یونش می‌باشد.
- با استفاده از فنجان فارادی مشاهده شده که شدت یون‌های شتاب‌یافته با وجود پیش‌یونش به $1/5$ برابر حالت بدون پیش‌یونش خواهد رسید و پرتو یونی با جریان بالاتری تولید می‌شود.
- با اضافه کردن پیش‌یونش، شدت پرتو ایکس سخت نسبت به حالت بدون مقاومت شنت به شکل معناداری به میزان سه برابر افزایش می‌یابد و در این تخلیه، ایکس سخت قوی‌تری تولید خواهد شد.
- تغییرات بازده پرتو ایکس برای هشت تخلیه در فشار 0.85 تور برای پیش‌یونش با مقاومت شنت 330 مگا اهم و بدون پیش‌یونش مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات بسیار کم شدت اشعه ایکس در آزمایش‌های مختلف در شرایط مشابه برای حالت پیش‌یونش در مقایسه با حالت بدون پیش‌یونش نشان‌دهنده قابلیت عملکردی تکرارپذیرتر و منظم‌تر دستگاه پلاسما کانونی در حضور پیش‌یونش است. از طرف دیگر بازده دستگاه در تولید پرتو ایکس در حضور پیش‌یونش، بیشتر از حالت بدون پیش‌یونش است، و این مسئله به صورت قابل توجهی داری قابلیت تکرار است. در پایان می‌توان بهبود عملکرد دستگاه را در حضور پیش‌یونش، به افزایش یکنواختی غلاف جریان، کاهش امپدانس و کاهش ناخالصی‌ها نسبت داد.



14. Khan H.U, Shafiq M, Hussain S.S, Zakaullah M. Effect of preionization on soft x-ray emission and plasma dynamics in a small plasma focus system. *Journal of Applied Physics*. 2010;107:073301.
15. Lerner E.J, Yousefi H.R. Runaway electrons as a source of impurity and reduced fusion yield in the dense plasma focus. *Physics of Plasmas*. 2014;21(10):102706.
16. Ruden E. Stability enhancement of a low initial density hollow gas-puff z pinch by e⁻ beam preionization. *Journal of applied physics*. 1987;61(4):1311-1316.
17. Freiwald D.A, Prestwich K.R, Kuswa G.W, Beckner E.H. Neutron enhancement from relativistic electron beam-dense plasma focus interactions. *Physics Letters A*. 1971;36(4):297-298.
18. Khan H.U, Shafiq M. Effect of preionization on the dynamics of current sheath in a small plasma focus device. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2012;167(11):834-840.
19. McGeoch M. Radio-frequency-preionized xenon z-pinch source for extreme ultraviolet lithography. *Applied optics*. 1998;37(9):1651-1658.
20. Piriaei D, Yousefi H.R, Mahabadi T.D, SalarElahi A, Ghoranneviss M. The effects of pre-ionization using a shunt resistor on reproducibility of the x-ray emission in a dense plasma focus device. *Physics of Plasmas*. 2017;24(8):082502-082508.
21. Gallo C.F. Coronas and Gas Discharges in Electrophotography: A Review. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1975;IA-13(6):739-748.

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

فاضل‌پور، سمانه، چخماچی‌دوم، امیر، نصیری، علی. (۱۴۰۴)، تأثیر پیش‌یونش بر بهبود عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی مدر MTPF۲.۴kJ. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۱۲(۲)، ۱۹۸-۲۰۶. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1579.2022>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1680.html

