



بررسی اثر جنس تونهادی آند بر توزیع مکانی چشمه ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی

میرعماد، سید میلاد - شیرانی بیدآبادی، بابک*

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این پژوهش اثر جنس ماده‌ی تونهادی آندی بر ناحیه‌ی گسیل تابش‌های ایکس دستگاه پلاسمای کانونی مورد مطالعه قرار گرفت. تونهادهای آندی از جنس‌های آلومینیوم، روی، قلع، تنگستن و سرب ساخته شدند. در ولتاژ عملکردی 21 kV، برای هر جنس تونهاد، در فشارهای 0.3، 0.6، 0.9، 1.2 mbar، تصاویر دوربین روزنه‌ای که ناظر بر سطح و بالای آند است، ثبت شدند. نتایج نشان داد که ناحیه‌ی گسیل تابش‌های ایکس در بالای سطح آند تنها ناشی از تابش‌های پلاسمای گرمایی گاز تزیقی نیست و به جنس تونهادی آند بستگی دارد. این ناحیه می‌تواند به دلیل عبور الکترون‌های پر انرژی از بخار فلز تونهاد، که در بالای سطح آند تجمع یافته است باشد. کلمات کلیدی: پلاسمای کانونی، تابش ایکس پالسی، دوربین روزنه‌ای، رادیوگرافی اشعه ایکس

Investigation the effect of anode's insert material on spatial distribution of X-ray source in plasma focus device

Miremad, Seyed Milad; Shirani Bidabadi, Babak*

University of Isfahan, Faculty of Advanced Science & Technologies, Department of Nuclear Engineering

Abstract:

In this paper, the effect of anode's insert material on spatial distribution of X-ray emission zone of plasma focus device was studied. Anode's insert materials were fabricated out of aluminum, zinc, tin, tungsten and lead. For each insert material at the constant operating voltage 21 kV, at the various pressures of 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 mbar, the image of pinhole camera that monitored the surface and top of anode, was recorded. The results indicated that the X-ray emission zone above the anode surface not only include thermal radiation of plasma but also depend on anode's insert materials. This zone could be due to passage of the high energy electrons from the vapor of anode's material above the anode's surface.

Key words: Plasma focus, pulsed X-ray, Pinhole camera, X-ray radiography

مقدمه :

پلاسمای تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی دارای حجم کوچکی است و در مدت زمان بسیار کوچکی از مرتبه‌ی چند ده نانوثانیه تولید می‌شود. از این رو بیشتر دستگاه‌های تشخیصی متعارف در این شرایط غیر قابل استفاده هستند. دوربین روزنه‌ای می‌تواند پرتوهای ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی را از نظر فضایی تفکیک کند. هرچند زمانی که از فیلم رادیوگرافی به عنوان آشکارساز پشت روزنه‌ی دوربین روزنه‌ای استفاده شود، اندازه‌گیری‌ها مستقل از زمان است، اما می‌توان با استفاده از آشکارسازهای مناسب تابش‌های ایکس نرم و سخت را از نظر زمانی از هم تفکیک کرد. هریس و همکارانش [۱] به مطالعه در خصوص محل تولید ایکس نرم و سخت در دستگاه پلاسمای کانونی پرداختند و تابش‌های ایکس گسیلی را به لحاظ زمانی



و مکانی تفکیک کردند. آن‌ها گزارش کردند که پرتوهای ایکس نرم از پلاسما و پرتوهای ایکس سخت از نوک الکتروود مرکزی، و همچنین تابش‌های پلاسمایی ۲۰ ns قبل‌تر از تابش‌های ایکس سطح آند ساطع می‌شوند. فاوور و همکارانش [۲] پژوهشی روی مشخصه‌های گسیل تابش ایکس به صورت وابسته به زمان و مکان در دستگاه پلاسمای کانونی ۳ kJ انجام دادند که از گاز کاری هیدروژن و افزودنی آرگون استفاده کردند. گزارش آن‌ها بیانگر وجود دو پرپود در تولید ایکس نرم مطابق با دو تراکم کامل و مجزا در تنگش می‌باشد. از آنجا که بخش عمده‌ای از تابش ایکس دستگاه پلاسمای کانونی در اثر مکانیسم باریکه-هدف تولید می‌شود، بدون شک جنس آند نقش تعیین کننده‌ای بر مشخصه‌های ایکس گسیلی خواهد داشت. هندسه و ابعاد ناحیه‌ی گسیلنده‌ی اشعه ایکس، اطلاعات مفیدی پیرامون استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی برای تصویربرداری را در اختیار محققین قرار می‌دهد. حسین و همکارانش [۳] با قرار دادن تونهدای سربی در داخل آند مسی دستگاه پلاسمای کانونی ۱/۸ kJ که با گاز هیدروژن پر شده بود، تصاویر ناحیه‌ی کانونی گسیلنده اشعه ایکس را توسط دوربین روزنه‌ای اشعه ایکس در فشار بهینه ۰/۵ mbar، به دست آوردند. برای این کار با قرار دادن فیلتر بر روی روزنه‌ی دوربین، نواحی گسیل اشعه ایکس نرم و سخت را از هم جدا کرده و بر روی فیلم‌های فوجی^۱ این نواحی را مشاهده کردند. شفیق و همکارانش [۴] نیز، گسیل پرتوایکس در پنجره‌های انرژی متفاوت از یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر را با قرار دادن دیسک‌هایی از فلزات مختلف در نوک آند مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از دیودهای PIN با فیلترسازی تفاضلی به عنوان آشکارساز وابسته به زمان پرتوایکس و از دوربین روزنه‌ای برای تحلیل مستقل از زمان تابش ایکس استفاده شده است. بازده تبدیل توان الکتریکی مصرفی به توان تابشی در هندسه 4π برای فلزهای از جنس سرب، تنگستن و مولیبدن به ترتیب ۱/۲۸٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۲٪ به دست آمده است. در این پژوهش سعی شد، اثر جنس تونهدای آندی بر ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور از ۵ تونهدای آندی با جنس‌های آلومینیوم، روی، قلع، تنگستن و سرب استفاده شد. در ولتاژ عملکردی ۲۱ kV، با استفاده از یک دوربین روزنه‌ای که بر روی دیواره‌ی محفظه قرار گرفته و ناظر بر سطح و بالای آند بود، ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس برای هر یک از تونهداها در فشارهای مختلف ۱/۲ mbar، ۰/۹، ۰/۶ و ۰/۳ گاز تزریقی هوا ثبت شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

روش کار :

در این مطالعه از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ۲/۵ kJ ساخته شده در دانشگاه اصفهان استفاده شد. برای کار با این دستگاه از یک مدار یکسوساز-دوبرابر کننده‌ی ولتاژ برای شارژ خازنی با ظرفیت $11/4 \mu F$ تا ولتاژ کاری ۲۱ kV استفاده شد. آند مرکزی از جنس مس و به شکل استوانه‌ای به قطر ۲/۵ cm و طول مؤثر

^۱ FUJI Films

۱۳ cm می‌باشد که در انتهای باز آن، حفره‌ای استوانه‌ای به قطر ۱ cm و عمق ۲ cm ایجاد شده است تا تونپاده‌های ساخته شده، بتوانند در این محل جاگذاری شوند. پنج تونپاده آندی به شکل استوانه‌ای به قطر ۱ cm، از فلزات آلومینیوم، روی، قلع، تنگستن و سرب ساخته شد. این تونپاده‌ها طوری در حفره‌ی انتهایی باز آند قرار داده شدند که سر آن‌ها با آند مرکزی هم سطح بوده و هیچ بالا زدگی یا تورفتگی وجود نداشته باشد. برای ثبت تصویر ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس، از دوربین روزنه‌ای No2 (مطابق شکل ۱-الف) که بر روی دیواره‌ی محفظه نصب شده و ناظر بر سطح و بالای آند است، استفاده شد (شکل ۱-ب). دوربین روزنه‌ای می‌تواند مشخصه‌هایی مانند، دید کلی از موقعیت مکانی ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس، سایز تقریبی آن و نگرشی کیفی از چگالی تابشی ستون پلاسمای گسیلنده‌ی ایکس را نتیجه دهد.



ب



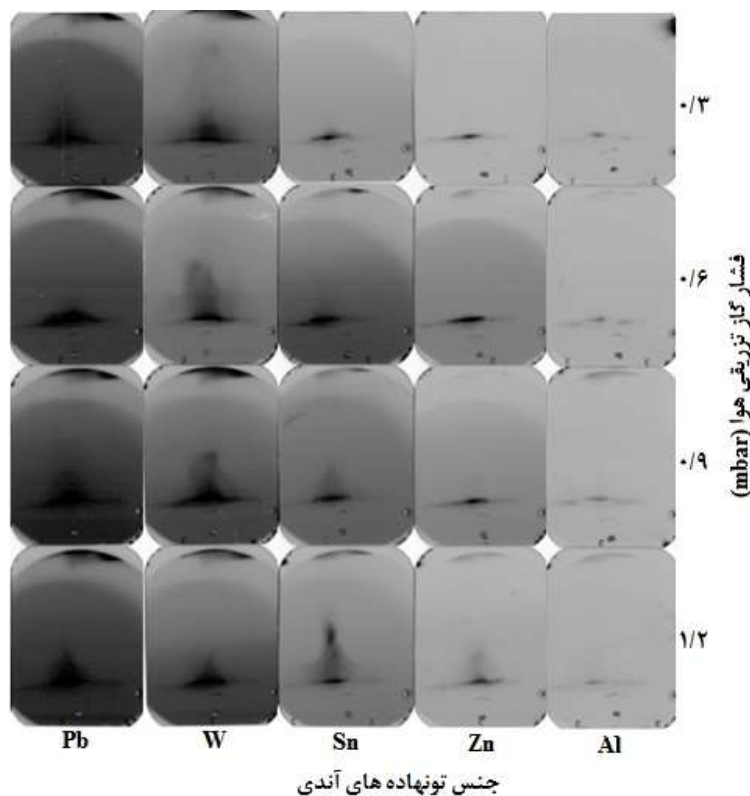
الف

شکل ۱: الف) قسمت‌های مختلف دوربین روزنه‌ای، ب) دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 و محل نصب دوربین روزنه‌ای

قطر روزنه دوربین برابر $500\mu\text{m}$ و بزرگنمایی آن برابر واحد (unity) تنظیم شد. برای ثبت تصاویر از فیلم رادیوگرافی دندان کدک سرعت E استفاده شد. برای هر تونپاده‌ی آندی، توزیع مکانی تابش‌های ایکس در فشارهای ۱/۲، ۰/۹، ۰/۶ و ۰/۳ گاز تزریقی هوا ثبت شد. از پیچ‌های روگوفسکی و سوسوزن BC-400 به ترتیب برای مشاهده‌ی سیگنال مشتق جریان و شدت ایکس گسیلی و اطمینان از تشکیل پینچ و گسیل ایکس استفاده شد. تصاویر ثبت شده‌ی هر تونپاده، مربوط به ۳ تخلیه‌ی متوالی پینچ دار دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد و هر سری آزمایش سه مرتبه تکرار شده است.

نتایج :

نتایج ثبت شده توسط دوربین روزنه‌ای No_2 برای ۵ ماده‌ی مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای تونواده‌ها با عدد اتمی پایین، مثل آلومینیوم ($Z=13$)، روی ($Z=30$) و قلع ($Z=50$)، در فشارهای پایین گاز تزریقی هوا (0.3 mbar)، ناحیه‌ی گسیل تابش‌های ایکس به سطح آند محدود می‌شود. با افزایش فشار (0.6 mbar)، ناحیه‌ی گسیل اندکی روی سطح و حتی عمق آند گسترده شده است. این می‌تواند به دلیل پراثری شدن الکترون‌های برخوردی با سطح آند در این فشار باشد. با افزایش بیشتر فشار (0.9 mbar) ناحیه‌ی ابری شکل و مخروطی بالای سطح آند شکل می‌گیرد و در فشار بالاتر (1.2 mbar) این ناحیه وسعت می‌یابد. در مورد تونواده‌های با عدد اتمی بالاتر مثل تنگستن ($Z=74$) و سرب ($Z=82$)، حتی در فشارهای پایین گاز کاری (0.3 mbar) هاله‌ی ابری شکل مخروطی بالای سطح آند به وضوح دیده می‌شود. برای این دو تونواده با افزایش فشار، ناحیه‌ی ابری شکل بالای سطح آند متمرکز شده و به سمت سطح آند جمع می‌شود. این نتیجه به وضوح در تصاویر مربوط به تونواده‌ی تنگستن مشاهده شد.



شکل ۲: تصاویر دوربین روزنه‌ای No_2 مربوط به تونواده‌های مختلف آندی در فشارهای مختلف گاز تزریقی هوا

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تابش‌های ناحیه‌ی پلاسمایی در بالای سطح آند تنها در نتیجه‌ی پلاسمای گاز تزریقی نیست. زیرا در شرایط یکسان فشار گاز کاری هوا، جنس تونواده بر روی ناحیه‌ی مخروطی گسیل تابش‌های ایکس در بالای سطح آند تأثیر گذار بوده است. مشاهده می‌شود که در تمامی فشارها، با



افزایش عدد اتمی تونهادی آندی، گسیل تابش ترمزی از سطح آند و ناحیه‌ی مخروطی بالای سطح آند افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه‌ی مقیاس خاکستری تصاویر می‌توان نتیجه گرفت که دوز ثبت شده در فیلم‌ها با افزایش عدد اتمی افزایش یافته است.

بحث و نتیجه گیری :

تابش‌های ایکس پالسی دستگاه پلاسمای کانونی عمدتاً از دو فرایند تابش گرمایی پلازما و تابش ناشی از برخورد الکترون‌های پرنرژی با سطح آند تولید می‌شوند. پلاسمای داغ و چگال تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی منبع تولید تابش‌های ایکس است که از آن به عنوان تابش گرمایی پلازما یاد می‌شود که در نتیجه‌ی سه گذار الکترونی آزاد-آزاد، آزاد-مقید و مقید-مقید تابش‌های ایکس گسیل می‌کند. تابش ناشی از برهم کنش باریکه‌ی الکترون شتاب یافته در میدان الکتریکی ایجاد شده در ناحیه‌ی پینچ، با سطح آند، هم دارای مؤلفه‌ی گسسته‌ی ایکس مشخصه‌ی مواد تشکیل دهنده‌ی آند و هم دارای مؤلفه‌ی پیوسته‌ی تابش ترمزی می‌باشد. تفاوت قابل توجهی در توزیع مکانی و شدت چشمه ایکس در استفاده از تونهاده‌های از جنس‌های مختلف مشاهده شد. با افزایش عدد اتمی تونهادی آندی، ناحیه گسیل ایکس از تابش ترمزی سطح آند به یک هاله با شدت زیاد در بالای سر آند گسترش می‌یابد و شدت تابش نیز افزایش زیادی نشان می‌دهد. تشکیل هاله در بالای سر آند نمی‌تواند تنها ناشی از تابش گرمایی پلازما باشد چرا که اگر این طور بود با تغییر تونهاده در یک فشار نباید تغییر چندانی در آن مشاهده می‌شد. این ناحیه‌ی مخروطی ابری شکل می‌تواند ناشی از تولید بخار فلز بر روی سطح و تولید تابش ترمزی در اثر عبور الکترون‌ها از داخل این بخار باشد. قطعاً اگر بحث تبخیر فلز به هر صورتی مطرح باشد، به دلیل خصوصیات فیزیکی مواد، چگالی بخار روی یا آلومینیوم باید از تنگستن که فلز بسیار سخت و با دمای ذوب بالا است، بسیار بیشتر باشد و این در حالی است که شدت تابش ترمزی با چگالی اتمی ماده هدف ارتباط مستقیم دارد. ولی از سوی دیگر، شدت تابش ترمزی، و انرژی میانگین تابش ترمزی با افزایش عدد اتمی ماده هدف افزایش می‌یابند. ضمناً انرژی فوتون‌های خطوط ایکس مشخصه عناصر نیز با افزایش عدد اتمی افزایش می‌یابند. فوتون‌های پرنرژی‌تر با احتمال بیشتری به فیلم می‌رسند و دز بیشتری در فیلم به جا می‌گذارند. پرسشی که مطرح می‌شود این است که در هر کدام از فلزها، کدام یک از دو عامل فوق (چگالی اتمی بخار یا عدد اتمی) تعیین کننده شدت تابش ترمزی هستند. آزمایش‌های ما نشان می‌دهند که شدت تابش ترمزی در ناحیه بالای آند، برای تنگستن، سرب و قلع که اعداد اتمی بالاتری نسبت به سه فلز دیگر دارند، به صورت قابل توجهی بیشتر است. بنابراین تشکیل بخار فلزی، حتی در مورد تنگستن که دارای دمای ذوب و جوش بسیار بالایی است هم اتفاق افتاده است. برای درک بهتر این مشاهدات، لازم است تحلیل کاملی از مکانیزم‌های حاکم بر برخورد باریکه الکترون با سطح فلزات ارائه شود. در مورد اندرکنش بیم الکترون پرنرژی پلاسمای کانونی با سطح فلز و تبدیل فلز



آند از فاز جامد به فاز گازی، سه مکانیزم احتمالی را می‌توان مطرح نمود. (الف) انتقال انرژی توسط باریکه الکترون به سطح فلز، افزایش دمای سطح، ذوب شدن و سپس پراکندگی مذاب بر اثر ضربه فیزیکی باریکه الکترون (ب) افزایش دمای سطح فلز و تصعید آن (پ) کندوپاش الکترونی. کدام یک از این مکانیزم‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی غالب هستند؟ پاسخ این سؤال به جنس فلز، انرژی الکترون‌ها و میزان تغییر دمای سطح آند وابسته است. دمای جوش همه فلزات مورد مطالعه، حتی در پایین‌ترین فشار کاری هم از دمای ذوب آن‌ها در آن فشار بیشتر است. بنابراین قطعاً، ابتدا سطح فلز ذوب می‌شود. پس مکانیزم (ب) منتفی است. ذوب شدن سطح فلز باعث می‌شود که برخورد ادامه بیم الکترونی با سطح مذاب منجر به پراکندگی شدن و پخش شدن آن در فضای بالای آند و تشکیل ابری از ذرات ریز فلز در این ناحیه شود. این مکانیزم در مورد سرب و قلع که کمترین دمای ذوب را دارند از همه محتمل‌تر است. تونپادهای تنگستن، نقطه‌ی ذوب به مراتب بالاتری نسبت به سایر تونپادهای دارد و در نتیجه تغییرات ایجاد شده بر روی سطح این فلز، بسیار ناچیز است. اما هاله‌ی ایجاد شده برای فلز تنگستن، حجیم است. بنابراین مکانیزم محتمل دیگر که ضربه فیزیکی حاصل از بمباران الکترون بر انرژی و پراکندگی ذرات فلزی و تشکیل گاز فلز در بالای آند برای مدت کوتاه می‌باشد، را هم مورد توجه قرار می‌دهیم. این مکانیزم چندان باعث تغییر شکل سطح فلز نمی‌شود. می‌توان ثابت کرد که انرژی آستانه کندوپاش تنگستن در کمترین مقدار، 496 keV است که اطلاعات ارزشمندی مبنی بر اینکه بر انرژی‌ترین الکترون‌های پلاسمای کانونی، دارای انرژی‌های بیشتر از 496 keV هستند را در اختیار ما قرار می‌دهد [۵]. بنابراین مقدار انرژی آستانه کند و پاش مواد می‌تواند یک ابزار تشخیصی مناسب برای تعیین محدوده بالای انرژی بیم الکترونی باشد. ضمناً شار این الکترون‌ها به اندازه کافی زیاد هست که بخار تنگستن بتواند یک چشمه قوی ایکس در ناحیه بالای آند ایجاد کند. با توجه به مشاهدات این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که حتی اگر سه مکانیزم در نظر گرفته شده در تولید بخار گازی آند برای یک فلز نسبت به سایر فلزات غالب نباشد، بزرگی عدد اتمی آن فلز تأثیر بیشتری در تابش‌های ایکس گسیلی از این بخار گازی دارد. این نتیجه به وضوح در مقایسه‌ی ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس فلز تنگستن نسبت به دو تونپادهای آلومینیوم و روی مشاهده شد. در مورد آلومینیوم به دلیل داشتن کمترین عدد اتمی، تقریباً هیچ ناحیه گسیل ایکس در بالای آند مشاهده نمی‌شود. گسیل تابش ترمزی از سطح آند هم برای آلومینیوم بسیار ضعیف است.

مراجع :

- [1] W. L. Harries, J. H. Lee, and D. Mcfarland, "Trajectories of high energy electron in a plasma focus," *Plasma Physics*, vol. 20, pp. 95-106, 1978.
- [2] M. Favre, S. LeeS, S. P. Moo, and W. C. S., "X-ray emission in a small plasma focus operating with H-Ar mixtures," *Plasma Sources Sci. Technol*, vol. 1, pp. 122-125, 1992
- [3] S. Hussain, M. Zakaulaha, S. Ali, S. H. Bhatti, and A. Waheed, "X-ray enhancement from a plasma focus by inserting lead at the anode tip," *Physics Letters A* 319, pp. 181-187, 2003.



- [4] M. Shafiq, S. Hussain, A. Waheed, and M. Zakaullah, "X-ray emission from a plasma focus with high-Z inserts at the anode tip," *Plasma Sources Sci. Technol.* 12, pp. 199-204, 2003.
- [۵] میرعماد، سید میلاد، شیرانی بیدآبادی، بایک، "بررسی تجربی و تحلیل فیزیکی اثر باریکه الکترون پر انرژی دستگاه پلاسمای کانونی بر سطح آند"، پنجمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، اردیبهشت ۱۳۹۶.