



مقایسه تأثیر تابش پالس پروتون‌های پرنرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی فلزات سخت

میرمحمد رضا سیدحاشی*

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

*Email: m.seyedhabashi@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۲ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۶/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۶

چکیده

در این تحقیق اثرات تخریب پروتون‌های پرنرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی مورفولوژی سطحی و هم‌چنین پارامترهای ساختاری تنگستن و مولیبدن مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های تنگستن و مولیبدن که در فاصله ۶ سانتی‌متری از سر آند قرار داده شدند در ۲۰ تخلیه با یون‌های هیدروژن مورد تابش قرار گرفتند. نمونه‌ها قبل و بعد از تابش دهی با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که تابش پروتون‌های پرنرژی بر سطح تنگستن و مولیبدن باعث به وجود آمدن تاول، ترک و ذوب‌شدگی در سطح نمونه‌ها شده است. از کد لی به منظور مشخصه‌یابی باریکه یونی دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شد. نتایج کد لی نشان می‌دهد که در هر تخلیه تعداد 7.9×10^{14} یون از ستون پلازما ساطع می‌شود. از کد SRIM برای محاسبه تخریب ایجاد شده در تنگستن و مولیبدن و تراکم هیدروژن در عمق‌های مختلف تنگستن و مولیبدن استفاده شد. بر اساس نتایج کد SRIM بیشینه مقدار $dpa/shot$ برای نمونه‌های تنگستن و مولیبدن تابش داده شده با یون‌های هیدروژن به ترتیب در عمق‌های ۱۵۰ و ۲۵۰ نانومتر و برابر با ۰.۰۱۴ و ۰.۰۲۵ برآورد شد. بیشینه تراکم یون‌های هیدروژن در نمونه تابش داده شده تنگستن و مولیبدن در عمق‌های ۱۵۰، ۲۵۰ نانومتر به ترتیب ۰.۴ و ۰.۳۵ درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دستگاه پلاسمای کانونی، مواد مجاور با پلازما، تنگستن، مولیبدن، اثرات تخریبی

Comparison of the effect of high-energy proton pulse radiation produced in a plasma focus device on hard metals

M.M.R. SeyedHabashi*

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

Research Article

Received: 12.6.2023, Revised: 25.8.2023, Accepted: 28.8.2023

Abstract

In this research, the effects of high-energy proton bombardment produced by the plasma focus device on the surface morphology and structural parameters of tungsten and molybdenum were investigated. Tungsten and molybdenum samples, placed 6 cm from the anode head, were irradiated with hydrogen ions for 20 discharges. The samples were examined before and after irradiation using a scanning electron microscope (SEM). The SEM results revealed blisters, cracks, and surface melting on both tungsten and molybdenum samples due to high-energy proton irradiation. To characterize the ion beam of the plasma focus device, Lee's code was employed. Lee's code indicated approximately 7.9×10^{14} ions are emitted from the plasma column in each discharge. Additionally, the SRIM code was used to calculate damage caused by tungsten and molybdenum. In addition, it calculated the hydrogen density at various depths within the materials. According to the SRIM code results, the maximum value of displacements per atom (dpa) per shot for tungsten and molybdenum samples irradiated with hydrogen ions was estimated to be 0.025 and 0.014, respectively, at depths of 150 nm and 250 nm. Moreover, the maximum concentration of hydrogen ions in the irradiated samples of tungsten and molybdenum at depths of 150 nm and 250 nm was 0.4% and 0.035%, respectively.

Keywords: Plasma focus device, Plasma facing material, Tungsten, Molybdenum, Radiation damage



۱. مقدمه

مولیبدن و تنگستن دو ماده‌ای هستند که برای استفاده در ساخت اولین دیواره توکامک پیشنهاد می‌شوند. هر دو ماده دارای خواص منحصر به فردی هستند که آن‌ها را برای این کاربرد مناسب می‌کند [۱-۴]. در این جا تفاوت‌های مولیبدن و تنگستن به عنوان مواد پیشنهادی در ساخت اولین دیواره توکامک به همراه مزایا و معایب آن‌ها آورده شده است. مولیبدن یک فلز دیرگداز با نقطه ذوب بالا ۲۶۲۳ درجه سانتی‌گراد است که آن را برای استفاده در کاربردهای با دمای بالا مناسب می‌سازد. رسانایی حرارتی خوبی دارد و می‌تواند بارهای حرارتی بالایی را تحمل کند که این ویژگی برای دیوار اول توکامک بسیار حائز اهمیت است. مولیبدن هم‌چنین دارای خواص مکانیکی خوبی است که آن را در برابر تغییر شکل، قوی و مقاوم می‌کند [۵]. علاوه بر این، نقطه ذوب بالا رسانایی حرارتی خوب خواص مکانیکی خوب بازده کندو پاش پایینی دارد، به این معنی که در برابر فرسایش ناشی از برخورد ذرات پلاسما با سطح مقاومت می‌کند. مفهوم بازده کندو پاش این است که وقتی که ماده توسط ذرات پرنرژی مانند یون‌ها بمباران شود. چه کسری از ذرات فرودی می‌توانند اتم‌ها را از طریق کندو پاش از سطح ماده جدا کنند. بازده کندو پاش مولیبدن (Mo) را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مختلف تجربی یا محاسباتی محاسبه کرد. بازده کندو پاش را می‌توان با تابش یک نمونه مولیبدن با یون‌هایی با انرژی و شار شناخته شده و اندازه‌گیری تعداد اتم‌های پراکنده شده به صورت تجربی تعیین کرد. این اندازه‌گیری معمولاً با استفاده از تکنیک‌هایی مانند طیف‌سنجی پس‌پراکندگی رادرفورد^۱ انجام می‌شود. در شبیه‌سازی محاسباتی، بازده کندو پاش را می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تعیین کرد. معایب مولیبدن به عنوان یک ماده مجاور با پلاسما^۲ در رآکتورهای همجوشی هسته‌ای عمدتاً به عدد اتمی بالای آن مربوط می‌شود که آن را مستعد فعال شدن نوترونی می‌کند. هنگامی که مولیبدن توسط نوترون‌های پرنرژی بمباران می‌شود، تبدیل به هسته‌ی رادیواکتیو شده و ایزوتوپ‌هایی تولید می‌شود که می‌توانند برای دهه‌ها یا حتی قرن‌ها باقی بمانند و مشکلات احتمالی ایمنی و رادیواکتیو شدن مواد را به همراه داشته باشند [۶].

تنگستن: تنگستن یکی دیگر از فلزات دیرگداز با نقطه ذوب ۳۴۲۲ درجه سانتی‌گراد است که این ویژگی آن را برای استفاده در محیط‌های با دماهای بالا مناسب می‌کند. بالاترین نقطه ذوب را در بین فلزات دارد و بسیار قوی و بادوام است. تنگستن

1. Rutherford Backscatterin
2. Plasma Facing Material

هم‌چنین در برابر فرسایش ذرات پلاسما بسیار مقاوم است و نرخ کندوپاش پایینی دارد. تنگستن نسبت به مولیبدن دارای مقاومت بالاتر در برابر تابش نوترون است و سطح مقطع فعال شدگی آن در اثر تابش نوترون بسیار کم است. استفاده از تنگستن به عنوان یک ماده مجاور با پلاسما نیز دارای معایبی است. تنگستن به دلیل سختی و شکنندگی می‌تواند دچار ترک‌خوردگی و فرسایش سطحی تحت شارهای حرارتی بالا و بمباران ذرات پلاسما شود [۷-۱۱].

برهم‌کنش یون‌های پرنرژی با مواد دیوار توکامک شامل مکانیسم‌های مختلفی از جمله کندوپاش، کاشت و آسیب تابش است. کندوپاش زمانی رخ می‌دهد که یون‌های پرنرژی با سطح مواد دیوار توکامک برخورد می‌کنند، در این صورت یون‌های برخوردکننده می‌توانند تکانه و انرژی خود را به اتم‌های موجود در ماده منتقل کنند. این انتقال تکانه می‌تواند باعث شود اتم‌های موجود در ماده از سطح خارج شوند. کندوپاش منجر به فرسایش مواد و آزاد شدن اتم‌ها یا خوشه‌های کوچک اتم از سطح مواد می‌شود. مورد بعدی کاشت یون‌های پرنرژی در مواد است، در این مورد یون‌های پرنرژی به سطح مواد دیوار توکامک نفوذ کرده و در داخل ماده حبس می‌شوند. یون‌های کاشته شده می‌توانند باعث تغییرات ساختاری در مواد شوند، مانند نقص شبکه یا تغییر در ترکیب شیمیایی. کاشت یونی می‌تواند بر خواص مواد و توانایی آن در مقاومت در برابر بمباران یونی تأثیر بگذارد. آخرین مورد آسیب تابش است، هنگامی که یون‌های پرنرژی با مواد دیوار توکامک برهم‌کنش می‌کنند، مقدار قابل‌توجهی انرژی به مواد منتقل می‌کنند. این انرژی می‌تواند منجر به جابه‌جایی اتم‌ها از موقعیت شبکه آن‌ها شود که منجر به تشکیل نقص‌های ناشی از تشعشع می‌شود. این عیوب می‌تواند شامل جاهای خالی (محل‌های شبکه خالی)، بینایی (اتم‌های اضافی در شبکه) و انواع مختلف عیوب نقطه‌ای باشد. با گذشت زمان، تجمع این عیوب می‌تواند خواص مکانیکی و حرارتی مواد را تحت تأثیر قرار دهد [۴، ۷-۱۵]. آزمایش مواد مجاور با پلاسما بسیار مهم است زیرا این مواد در رآکتورهای همجوشی در معرض شرایط شدید تابشی و گرمایی مانند ذرات پلاسما پرنرژی و تشعشعات نوترونی قرار می‌گیرند. مواد مجاور با پلاسما باید قادر به تحمل این شرایط با کم‌ترین آسیب یا تخریب قابل توجه باشند تا از عملکرد ایمن و کارآمد رآکتور اطمینان حاصل شود. علاوه بر این، مواد مجاور با پلاسما نقش مهمی در عملکرد و کارایی یک رآکتور همجوشی ایفا می‌کنند، زیرا آن‌ها مسئول جذب انرژی آزاد شده در طی واکنش‌های همجوشی و انتقال گرما از رآکتور هستند. بنابراین، رفتار و خواص مواد مجاور با پلاسما به طور قابل توجهی بر عملکرد کلی



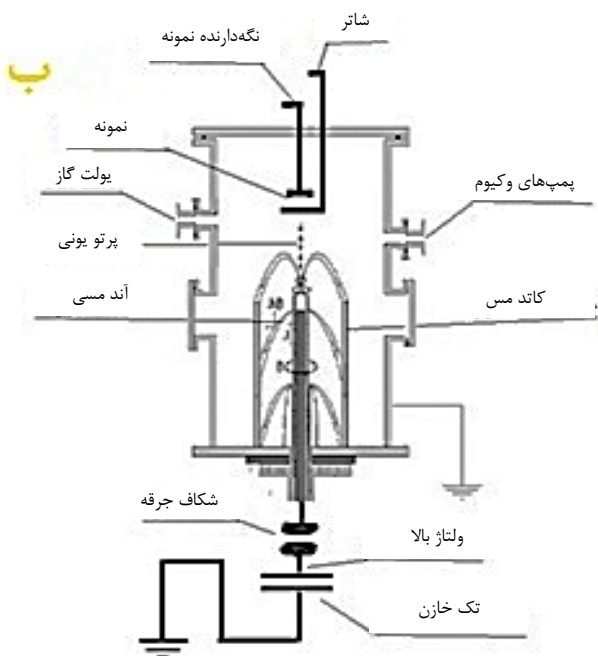
بزرگ‌تر جابه‌جا شدند [۲، ۴، ۱۵، ۱۷]. موهانتی و همکاران در کاری مشابه نمونه‌های تنگستن را در ۲۰ تخلیه خازنی با هیدروژن در زوایای مختلف نسبت به محور آند مورد تابش قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که در اثر تابش پروتون‌های پرنرژی ترک‌ها، تاول‌ها و ذوب شدگی در اثر انتقال گرمای پروتون‌های پرنرژی بر سطح تنگستن به وجود آمد. نتایج سختی‌سنجی در آن‌ها نشان داد که سختی نمونه‌ها بعد از تابش با یون‌های پرنرژی هیدروژن کمی کاهش پیدا کرد. همچنین نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که در اثر تابش یون‌های پرنرژی هیدروژن محل قله نمونه تابش داده شده به سمت زوایای بزرگ‌تر جابه‌جا شده است [۱۸]. نیرانجان و همکاران تغییرات سطحی ایجاد شده روی مواد مواجه با پلاسما (تنگستن، نیکل، فولاد ضدزنگ^۳، مولیبدن و مس) را با استفاده از پلاسما همجوشی ایجاد شده در دستگاه پلاسما کانونی مورد بررسی قرار دادند. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ که در شرایط برهم‌کنش جریان یون‌های پرنرژی دوتریوم با پلاسما داغ تولید شده در دستگاه های پلاسما کانونی PF-۱۰۰۰ و PF-۶ مشاهده شد نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه خازنی ترک‌های ایجاد شده باریک به ترک‌های عمیق و بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند [۱۹]. اما در تحقیقات انجام شده توسط دستگاه پلاسما کانونی بر روی مواد مواجه با پلاسما گزارش‌های بسیار کم و به صورت کیفی در رابطه با تابش‌دهی سایر مواد پیشنهادی از جمله مولیبدن وجود دارد. مقایسه آسیب تشعشع بر روی مولیبدن و تنگستن ضروری است زیرا این دو فلز معمولاً به عنوان مواد رو به پلاسما در راکتورهای همجوشی هسته‌ای استفاده می‌شوند. این مواد در معرض شرایط شدید از جمله دماهای بالا، تشعشعات شدید و ذرات پرنرژی هستند. بنابراین، درک نحوه عملکرد این مواد در چنین شرایطی برای طراحی و عملکرد راکتورهای همجوشی بسیار مهم است. در حالی که تنگستن و مولیبدن هر دو خواص فیزیکی و مکانیکی مشابهی دارند، رفتارهای مقاومت در برابر تشعشع متفاوتی دارند. مقایسه آسیب تشعشع بر روی مولیبدن و تنگستن می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را در مورد عملکرد این مواد در شرایط شدید ارائه دهد. این می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف آن‌ها کمک کند و به توسعه مواد جدید با مقاومت در برابر تشعشع بهبود یافته برای استفاده در راکتورهای همجوشی کمک کند. از این‌رو بررسی آسیب تشعشع بر مولیبدن و تنگستن موضوعی مناسب و مهم برای پژوهش‌ها در حیطه مواد مجاور با پلاسما می‌باشد.

دوام انرژی همجوشی به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار تأثیر می‌گذارد. آزمایش مواد مجاور با پلاسما به محققان امکان می‌دهد دوام، پایداری و مقاومت آن‌ها در برابر تشعشع و فرسایش پلاسمایی را ارزیابی کنند و اطلاعات ارزشمندی را برای طراحی و توسعه راکتورهای همجوشی ارائه دهند. همچنین امکان آزمایش مواد جدید و نوآورانه را فراهم می‌کند که منجر به کشف مواد کارآمدتر و مقرون به صرفه برای استفاده در راکتورهای همجوشی می‌شود. به طور خلاصه، آزمایش مواد مجاور با پلاسما برای عملکرد ایمن و کارآمد راکتورهای همجوشی و برای توسعه و بهبود مستمر فن‌آوری انرژی همجوشی ضروری است.

دستگاه‌های پلاسما کانونی با استفاده از منبع تغذیه پالسی با یونیزه کردن یک گاز کم‌فشار، پلاسما با چگالی و انرژی بالا (پلاسما همجوشی) تولید می‌کنند. سپس از این پلاسما می‌تواند برای مطالعه مواد مختلف، استفاده کرد، دستگاه پلاسما کانونی از لحاظ ایجاد شرایط مشابه که در توکامک‌های آینده در اثر ناپایداری‌های گسیختگی و ELM^۱ که باعث برخورد یون‌های پرنرژی، جریان پلاسما و موج ضربه به دیواره اول توکامک‌ها می‌شود بسیار مناسب است. در نتیجه دستگاه پلاسما کانونی ابزاری مناسب برای آزمایش مواد مجاور با پلاسما در برابر تابش است. در ادامه نتایج مربوط به تحقیقاتی که در آن اثرات تخریبی یون‌های پرنرژی در آزمایش مواجهه پلاسما با ماده با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی بر روی مواد مختلف انجام گرفت به طور خلاصه بیان شده است. دامپده و همکاران اثرات تخریبی یون‌های پرنرژی دوتریوم بر روی تنگستن را با تخلیه‌های با انرژی‌های مختلف دستگاه پلاسما کانونی ۲/۲ کیلوژول در فواصل مختلف مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در این آزمایش انرژی متوسط و شار یون‌های دوتریوم به ترتیب ۵۶ کیلو الکترون ولت و $10^{26} \text{ ions m}^{-2}\text{s}^{-1}$ است. نتیجه این تابش تشکیل ترک‌های ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتری و حفره‌هایی تا ۵ میکرومتر بسته به فاصله آن از سر آند است [۱۶]. دوتا و همکاران اثرات تخریبی یون‌های هلیوم تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی ۲/۲ کیلو ژول را بر روی تنگستن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نمونه‌های تنگستن را در زوایای مختلف نسبت به محور آند قرار داده و تحت تابش ۱۰ تخلیه خازنی قرار دادند. نتیجه مشاهده شده ترک‌های یکنواختی بود که بر روی تنگستن به عرض ۱ الی ۴ میکرومتر ایجاد شد. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس^۲ نیز نشان داد که در نمونه‌های تابش داده شده با هلیوم قله‌ها به سمت زوایای



آند حرکت می‌کند. لایه جریان زمانی که به بالای سر آند می‌رسد توسط نیروی بین رشته‌های جریان هم‌جهت به سمت محور مرکزی آند جمع شده و تشکیل تنگش^۱ می‌دهد. تنگش تشکیل شده دارای چگالی بسیار بالا و دمای خیلی زیاد است. عمر تنگش بسیار کوتاه بوده (در حدود ۳۰ نانو ثانیه) و ناپایدار است. در اثر ناپایداری $m=0$ تنگش پلاسمایی فروپاشی می‌کند و الکترون‌های به دام افتاده در فضای تنگش با انرژی‌های زیاد به سطح آند برخورد کرده و باعث تولید اشعه ایکس سخت می‌شود. این برخورد باعث تجمع بخار ذرات در بالای سر آند می‌شود [۸، ۹، ۱۱].



شکل ۱. الف) طرح‌واره دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2، ب) آرایه آند و کاتدهای دستگاه پلاسمای کانونی.

در این پژوهش برای بررسی اثرات تخریبی تابش، از یون هیدروژن، به جای دوتریوم و تریتیوم استفاده شده است. دوتریوم و تریتیوم ایزوتوپ‌های هیدروژن هستند، به این معنی که تعداد پروتون‌های یکسانی دارند اما تعداد نوترون‌های متفاوتی دارند. این شباهت به محققان اجازه می‌دهد تا اثرات ایزوتوپ‌های هیدروژن را بر روی مواد به عنوان نماینده‌ای برای دوتریوم و تریتیوم بدون چالش‌های مربوط به تهیه دوتریوم و تریتیوم و ملاحظات ایمنی مرتبط با مدیریت ایزوتوپ‌های رادیواکتیو مطالعه کنند.

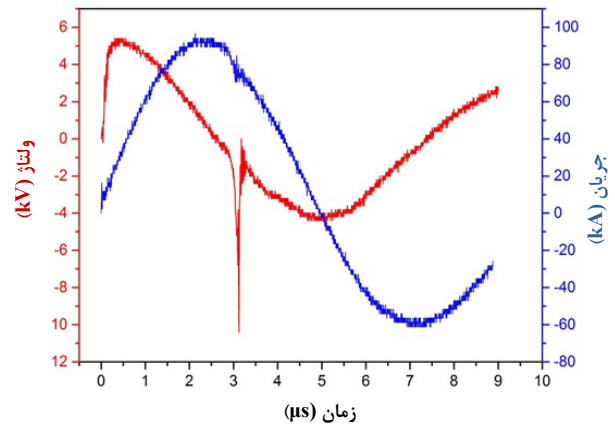
۲. چیدمان آزمایشگاهی

در شکل ۱ دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول MTPF-2 از نوع مدر و حداکثر ولتاژ شارژ ۲۰ کیلو ولت، بانک خازنی به ظرفیت ۱۳/۵ میکرو فاراد، جریان تخلیه ۱۰۰ کیلو آمپر و اندوکتانس ۱۵۸ نانو هانری به عنوان منبع تولید یون‌های هیدروژن پرنرژی برای پرتودهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. ساختار الکترودهای این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.

تعداد ۱۲ عدد کاتد به صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته‌اند. در نوک آند یک حفره به شعاع ۱۰ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر به منظور کاهش مقدار بخار مس ناشی از برخورد الکترون‌ها به سطح آند، ایجاد شده است. در ابتدا برای به دست آوردن فشار بهینه و ولتاژ بهینه، در فشارها و ولتاژهای مختلف، در غیاب نمونه‌ها تخلیه‌ها انجام شد. سپس تخلیه‌ها در تمام آزمایش‌ها برای گاز هیدروژن در فشار بهینه ۱ میلی بار ولتاژ کاری ۱۲ کیلو ولت انجام شدند. نمونه‌ها در فاصله ۶ سانتی‌متری از سر آند و در ۲۰ تخلیه خازنی تحت تابش یون‌های هیدروژن قرار گرفتند. در دستگاه MTPF-2 (نوع مدر)، بعد از پیدا کردن فشار و ولتاژ بهینه، بیش از ۹۰ درصد مواقع در تخلیه اول تا تخلیه ۷ ام، تنگش‌های قوی تشکیل می‌شود، ولی برای اطمینان و حفظ کارایی دستگاه، فشار گاز بعد از حداکثر ۵ تخلیه تا ۳-۱۰ میلی بار کاهش داده می‌شد تا ناخالصی‌های که از سطح الکترودها و محفظه وارد گاز می‌شود تخلیه و سپس گاز جدید جایگزین می‌شد. مکانیسم شتاب‌گیری یون‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی در اثر تخلیه بانک خازنی بر روی آند و ایجاد اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند شکل می‌گیرد. گاز داخل محفظه دستگاه پلاسمای کانونی دچار شکست الکتریکی می‌شود و رشته‌های جریان بین آند و کاتدها برقرار می‌شوند. این لایه جریان در اثر نیروی لورنتس به سمت انتهای



نمونه‌های صیقل داده شده مولیبدن و تنگستن در اندازه ۱ سانتی‌متر در ۱ سانتی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر قبل از تابش آماده شد. نمونه‌های مولیبدن و تنگستن در فاصله ۶ سانتی‌متری از نوک آند توخالی و در راستای محور آن قرار داده شد. یون‌های پرنرژی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-۲ برای تابش‌دهی سطوح مولیبدن و تنگستن در ۲۰ تخلیه مورد استفاده قرار گرفتند. در این تعداد تخلیه تمامی اثرهای تخریبی به وضوح قابل ارزیابی است. طبق تحقیقات انجام شده تاکنون این تعداد تخلیه امکان بررسی و مقایسه اثرات تخریبی در تخلیه‌های برابر با یون‌های یکسان برای مواد مختلف را فراهم می‌کند. بعد از تابش‌دهی نمونه‌ها با گاز هیدروژن از براقی سطح نمونه‌ها کاسته شد. تغییرات ایجاد شده در سطح نمونه‌ها با چشم غیرمسلح نیز قابل رؤیت بود. تصویر SEM از سطح نمونه تنگستن و مولیبدن قبل از تابش‌دهی به ترتیب در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهد سطح نمونه‌ها صاف و هموار است. از سطح نمونه‌ها بعد از تابش‌دهی با یون‌های هیدروژن تصاویر SEM به صورت عمودی با بزرگ‌نمایی‌های مختلف گرفته شد. از زاویه ۲۰ درجه نسبت به سطح نیز تصاویر SEM گرفته شد. این تصاویر مورفولوژی سطح را بهتر از تصاویر عمودی نشان می‌دهند.



شکل ۲. جریان تخلیه و مشتق جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی.

پس از فروپاشی پلاسما یون‌ها نیز با انرژی‌های نسبتاً زیاد در جهت مخالف الکترون‌ها گسیل می‌شوند. گستره انرژی باریکه‌های یون در دستگاه پلاسمای کانونی که با انرژی ذخیره‌شده در محدوده چند کیلو ژول تا چند مگا ژول عمل می‌کنند در محدوده ده‌ها کیلو الکترون‌ولت اندازه‌گیری شده است.

۳. نتایج

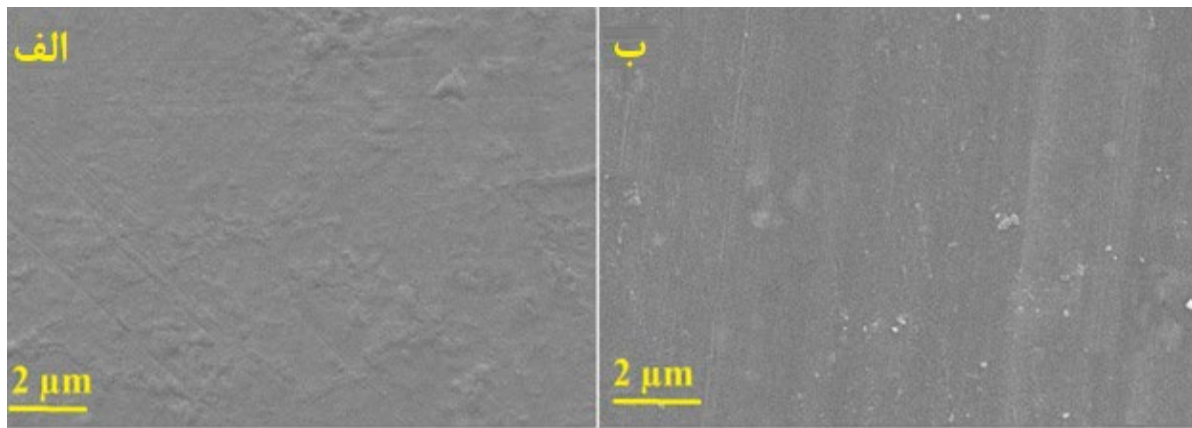
از کد لی برای محاسبه مشخصات باریکه‌های یونی تولید شده و تعداد یون‌های ساطع شده از ستون پلاسما در هنگام تنگش استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات باریکه یونی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی

پارامترهای یونی	واحد	باریکه یونی هیدروژن	واحد	پارامترهای یونی	واحد	باریکه یونی هیدروژن
جریان قله ^۱	kA	۹۵	شار انرژی ^۲	10^{12} W m^{-2}	۵۶	باریکه یونی هیدروژن
جریان تنگش ^۳	kA	۴۵	مدت زمان تنگش ^۴	Ns	۳۰٫۷	
حداکثر سرعت محوری ^۵	cm/μs	۳٫۷	جریان یون ^۶	kA	۸٫۲	
حداکثر سرعت شوک ^۷	cm/μs	۱۴٫۴	شار انرژی ^۸	10^{12} W m^{-2}	۵٫۶	
حداکثر سرعت شعاعی ^۹	cm/μs	۱۰٫۲	جریان چگالی ^{۱۰}	10^8 A m^{-2}	۵٫۴	
انرژی پرتو یون ^{۱۱}	J	۳	سرعت در خروج تنگش ^{۱۲}	cm/μs	۱۸	
شار پرتو یون پرنرژی ^{۱۳}	10^{12} W m^{-2}	۵٫۶	انرژی داخلی پلاسما ^{۱۴}	% of E_0	۰٫۳	
ضریب تخریب شار پرتو یون پرنرژی ^{۱۵}	$10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-15}$	۹٫۸	کار صرف شده بر پلاسما ^{۱۶}	J	۵۰	
انرژی جریان پلاسما ^{۱۷}	J	۴۴	تعداد یون در هر تخلیه ^{۱۸}	10^{14}	۷٫۹	
شار پرتو یون تولید شده در ستون تنگش ^{۱۹}	$10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	۱٫۷	جریان چگالی ^{۲۰}	10^8 A m^{-2}	۵٫۴	

1. Ipeak
2. En Flux
3. Ipinch
4. Pinch Duration
5. Va (Peak Axial Speed)
6. Ion Current
7. Vs (Peak Radial Shock Speed)
8. En Flux
9. Vp (Peak Radial Piston Speed)
10. Current Density
11. FIB Beam Energy
12. Ps Speed at Pinch Exit
13. FIB Energy Flux
14. Energy Into Plasma (EINP)
15. FIB Damage Factor
16. EINP Work Expended on the Pinch
17. Plasma Stream (ps) Energy
18. Number of Ions Per Shot
19. Jb Flux Ions (Ion Beam Generated by Pinch Column)
20. Current Density



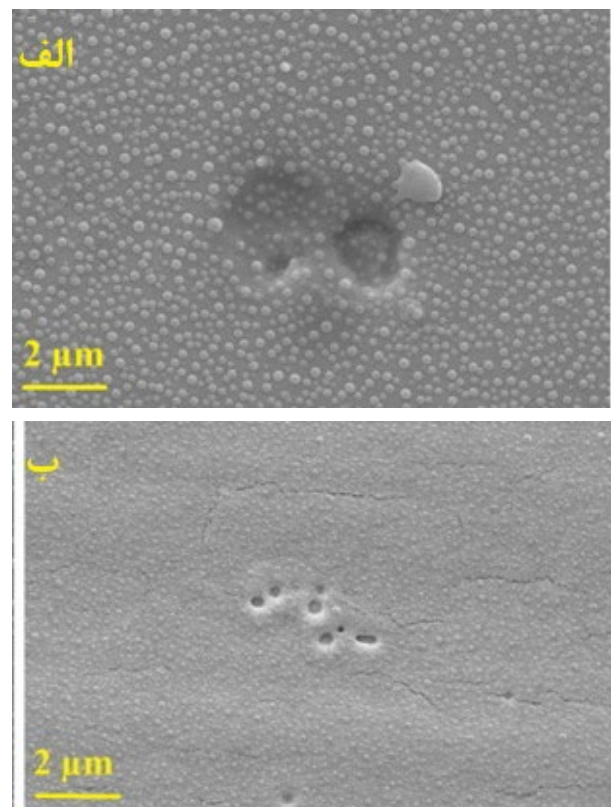


شکل ۳. الف) سطح تنگستن بدون تابش ب) سطح مولیبدن بدون تابش.

فرایندی که طی آن این حباب‌ها به وجود می‌آیند، «تردی هیدروژنی»^۱ نامیده می‌شود و پدیده‌ای شناخته شده در علم مواد است. اتم‌های هیدروژن به دام افتاده می‌توانند تنش‌های داخلی در شبکه ایجاد کنند و شکل‌پذیری و استحکام آن را کاهش دهند. علاوه بر این، هیدروژن به دام افتاده می‌تواند باعث ایجاد حفره‌ها یا ترک‌ها شود که می‌تواند منجر به تشکیل تاول یا سایر نقص‌های سطحی شود.

تاول‌هایی که بر روی سطح مولیبدن و تنگستن تحت تابش یون‌های غنی از هیدروژن ایجاد می‌شوند، تصور می‌شود که نتیجه تجمع این حباب‌های هیدروژن در نزدیکی سطح باشد شکل ۵. همان‌طور که حباب‌ها رشد می‌کنند و به هم می‌پیوندند، می‌توانند بر فلز اطراف فشار وارد کنند و در نهایت باعث برآمدگی یا تاول زدن سطح شوند. مکانیسم دقیق تشکیل تاول به عوامل مختلفی از جمله نوع و انرژی یون‌های برخوردی، دما و فشار سیستم و خواص خود فلز بستگی دارد. مکانیسم به دام انداختن هیدروژن در ساختار تنگستن و مولیبدن شامل اشباع یک تهی‌جا^۲ با اتم‌های هیدروژن برای تشکیل یک "لایه غربال‌گری" است. این لایه غربال‌گری می‌تواند برهم‌کنش بین اتم‌های هیدروژن به دام افتاده بیش‌تر و اتم‌های فلزی اطراف آن را غربال کند و باعث می‌شود این اتم‌های هیدروژن به مراکز تهی‌جاها بروند. در نتیجه، یک مولکول هیدروژن می‌تواند در تهی‌جاها تشکیل شود که به عنوان مرحله مقدماتی هسته‌سازی حباب هیدروژن در نظر گرفته می‌شود. یک تهی‌جا می‌تواند به طور هم‌زمان ۱۲ اتم هیدروژن در تهی‌جاها^۳ تنگستن به دام بیندازد. به دام انداختن اتم‌های هیدروژن به طور کلی قانون "چگالی بار بهینه" در جای خالی را برآورده می‌کند. رفتار

هنگامی که مولیبدن و تنگستن در معرض یون‌های هیدروژن با انرژی بالا مانند پروتون‌ها یا دوترون‌ها قرار می‌گیرند، یون‌ها می‌توانند به سطح نفوذ کرده و در شبکه فلزی کاشته شوند. با گذشت زمان، این یون‌ها می‌توانند جمع شده و خوشه‌ها یا حباب‌هایی را تشکیل دهند که منجر به ایجاد تاول یا تغییر شکل سطحی می‌شود شکل ۴.



شکل ۴. الف) تنگستن تابش‌دهی شده در ۲۰ شات هیدروژن ب) مولیبدن تابش‌دهی شده در ۲۰ شات هیدروژن.

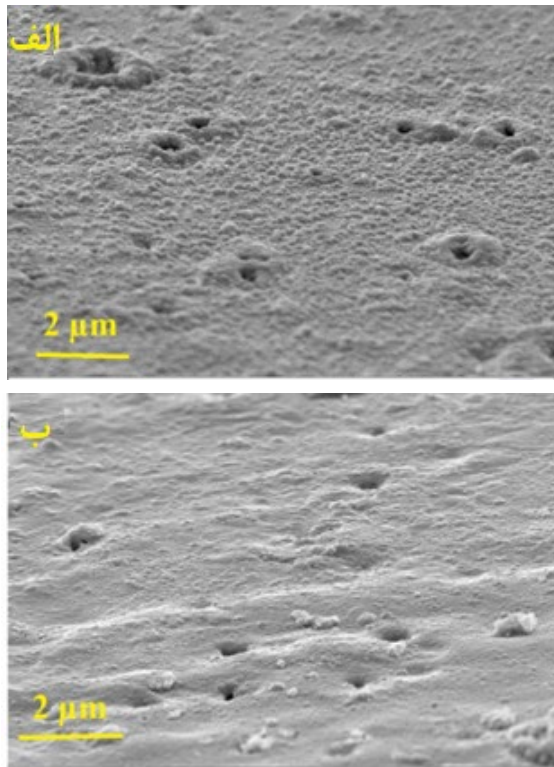
1. Hydrogen Embrittlement

2. Vacancy

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 45 (3), Serial Number 109, 2024, P 103-111





شکل ۵. الف) تنگستن تابش‌دهی شده در ۲۰ شات هیدروژن (ب) مولیبدن تابش‌دهی شده در ۲۰ شات هیدروژن.

۴. نتایج حاصل از کد SRIM

برای محاسبه کمی آسیب تابش و تخریب ایجاد شده در اثر بمباران سطح تنگستن و مولیبدن با یون‌های هیدروژن از کد SRIM استفاده شد. برد ذرات هیدروژن در تنگستن و مولیبدن و جابه‌جایی ایجاد شده در ماده به صورت تابعی از عمق و جابه‌جایی بر اتم (DPA) ناشی از تابش یون‌های هیدروژن بر تنگستن و مولیبدن برآورد شد. برای محاسبه اثرات تخریبی از گزینه محاسبه سریع استفاده شد. با استفاده از این پارامتر در معادله (۱)، میزان تخریب محاسبه می‌شود.

$$Damage\ Rate = \frac{Flux \left[\frac{ion}{shot - (A^{\circ})^2} \right] \times Displacement \left[\frac{1}{ion - (A^{\circ})} \right]}{Atomic\ Density \left[\frac{atoms}{(A^{\circ})^2} \right]} \left[\frac{DPA}{shot} \right] \quad (1)$$

برای شبیه‌سازی با کد SRIM طیف یونی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی به صورت فایل ورودی TRIM.DAT به کد SRIM داده شد.

نتایج کد SRIM در شکل ۶ نشان می‌دهد که بیش‌ترین تخریب ایجاد شده در مولیبدن ناشی از یون‌های هیدروژن در عمق ۱۵۰ نانومتری و به اندازه ۰٫۱۴ dpa/shot است.

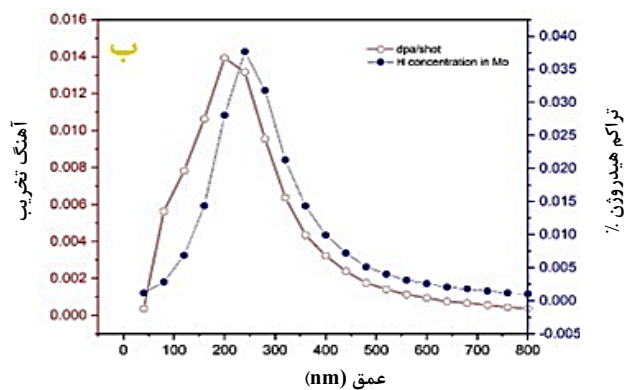
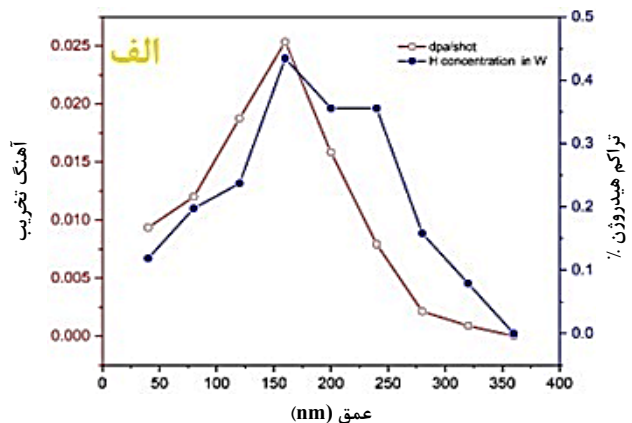
هیدروژن در داخل تنگستن و مولیبدن از نظر مکانیسم‌های به دام انداختن و تشکیل حباب‌های هیدروژن مشابه است. هر دو ماده قانون «جگالی بار بهینه» را در تهی‌جاها برآورده می‌کنند، و یک تهی‌جا می‌تواند به طور هم‌زمان چندین اتم هیدروژن یا مولکول هیدروژن را به دام بیندازد. با این حال، تفاوتی در تعداد اتم‌های هیدروژنی وجود دارد که می‌توانند توسط یک تهی‌جا در تنگستن و مولیبدن به دام بیفتند. در پژوهش انجام شده با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نشان داده شده است که ۱۲ اتم هیدروژن را در یک تهی‌جای تنگستن به دام می‌افتد، در مقابل، مولیبدن می‌تواند تنها ۸ اتم هیدروژن را بدون تشکیل مولکول هیدروژن به دام بیندازد که از این امر می‌توان توضیح داد که چرا تاول‌های ایجاد شده در سطح تنگستن نسبت به مولیبدن بزرگ‌تر است. لازم به ذکر است که تشکیل تاول بر روی تنگستن و مولیبدن به دلیل تابش یون‌های هیدروژن پراثری می‌تواند اثرات متعددی بر عملکرد توکامک داشته باشد. تاول‌ها می‌توانند یکپارچگی مکانیکی مواد را با ایجاد غلظت تنش و تضعیف ساختار مواد به خطر بیندازند. این پدیده می‌تواند حساسیت مواد را به شکست مکانیکی مانند ترک‌خوردگی یا لایه‌لایه شدن افزایش دهد. همچنین باعث ورود ذرات به داخل پلاسمای و در پی آن سرد شدن و ناپایداری پلاسمای شود. با توجه به این که ساختار تنگستن از لحاظ بلوره‌ای با مولیبدن متفاوت است، شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی نشان داده است که در تهی‌جاها موجود در تنگستن میزان اتم‌های هیدروژن محبوس شده نسبت به مولیبدن بیشتر است همچنین نتایج نشان داده است که ضریب پخش هیدروژن در داخل مولیبدن بیشتر از تنگستن است بنابراین هیدروژن در داخل مولیبدن در عمق‌های بیش‌تری نفوذ می‌کند این در حالی است که در تنگستن هیدروژن در یک لایه سطحی با عمق کم به صورت تجمعی و خوشه‌ای متوقف می‌گردد به همین دلیل تاول‌های ایجاد شده در سطح تنگستن بزرگ‌تر از مولیبدن است، لازم به ذکر است نتایج شبیه‌سازی‌های نشان داده است که ایجاد تاول در سطح فلزات ناشی از تجمع و تراکم یون‌های هیدروژن می‌باشد به این معنی که با افزایش تراکم یون‌های هیدروژن تاول‌های ایجاد شده در سطح نیز بزرگ‌تر خواهند شد [۵، ۶].



۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات تابش یون‌های پرنانژی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی ۲٫۷ کیلو ژول بر روی نمونه‌های تنگستن و مولیبدن مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق از آنالیزهای SEM، برای بررسی اثرات سطحی یون‌های هیدروژن بر روی نمونه‌های تنگستن و مولیبدن استفاده شد. بررسی تصاویر SEM نشان می‌دهد تغییرات سطحی ایجاد شده در سطح نمونه‌های تنگستن و مولیبدن در اثر تابش یون‌های هیدروژن با هم متفاوت‌اند. به گونه‌ای که در اثر تابش یون‌های پرنانژی بر سطح تنگستن تاول‌های مترکم و بزرگ‌تر نسبت به مولیبدن دیده می‌شود. در مورد نمونه‌ی مولیبدن تابش داده شده با یون‌های پرنانژی هیدروژن در سطح مولیبدن ناهمواری‌ها و همچنین ترک‌های باریک به همراه حفره‌هایی با قطر چند ده نانومتر در سطح ایجاد شده است. از کد لی به منظور مشخصه‌یابی باریکه یونی دستگاه پلاسما کانونی استفاده شد. نتایج کد لی نشان می‌دهد که در هر تخلیه تعداد 7.9×10^{14} یون از ستون پلاسما ساطع می‌شود. از کد SRIM برای محاسبه تخریب ایجاد شده در مولیبدن و مس و بررسی تراکم هیدروژن در عمق‌های مختلف تنگستن و مولیبدن استفاده شد. بر اساس نتایج کد SRIM بیشینه مقدار dpa/shot برای نمونه‌های تنگستن و مولیبدن تابش داده شده با یون‌های هیدروژن به ترتیب در عمق‌های ۱۵۰ و ۲۵۰ نانومتر و برابر با ۰٫۲۵ و ۰٫۱۴ برآورد شد. بیشینه تراکم یون‌های هیدروژن در نمونه تابش داده شده تنگستن و مولیبدن در عمق‌های ۱۵۰، ۲۵۰ نانومتر به ترتیب ۰٫۳۵ و ۰٫۴ درصد می‌باشد.

بیش‌ترین تراکم یون‌های هیدروژن نیز در عمق ۲۵۰ نانومتری و به میزان ۰٫۳۵ درصد است. بیش‌ترین تخریب ناشی از یون‌های هیدروژن در تنگستن در عمق ۱۵۰ نانومتری و به میزان ۰٫۲۵ dpa/shot است. بیش‌ترین تراکم یون‌های هیدروژن در عمق ۱۵۰ نانومتری و به میزان ۰٫۴ درصد می‌باشد. تفاوت بارزی که در نتایج شبیه‌سازی اثرات تخریبی یون‌های هیدروژن در تنگستن و مولیبدن دیده می‌شود جابه‌جایی مکان بیشینه تخریب و مکان بیشینه تراکم یون‌های هیدروژن در مولیبدن می‌باشد. علت این موضوع ناشی از این است که ضریب نفوذ هیدروژن در داخل مولیبدن بیش‌تر از تنگستن است. هم‌چنین تراکم هیدروژن در سطح تنگستن بیش از ۱۰ برابر مولیبدن است نتایج فوق تطابق خوبی با نتایج حاصل از میکروگراف‌های SEM دارد همان‌گونه که در میکروگراف‌ها دیده می‌شود اندازه تاول‌های ایجاد شده در سطح تنگستن بسیار بزرگ‌تر از مولیبدن است شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی بیان می‌کند که رابطه مستقیمی بین اندازه تاول‌ها با تراکم هیدروژن در ناحیه زیرتاول‌ها وجود دارد به این ترتیب با افزایش تراکم هیدروژن در نمونه اندازه تاول‌ها نیز افزایش می‌یابد و این امر نشان می‌دهد که مابین نتایج حاصل از شبیه‌سازی SRIM با میکروگراف‌های SEM رابطه‌ای منطقی برقرار است.



شکل ۶. الف) نمودار کمی آسیب تابش برحسب شات و تراکم هیدروژن برحسب عمق تنگستن، ب) نمودار کمی آسیب تابش برحسب شات و تراکم هیدروژن برحسب عمق مولیبدن.

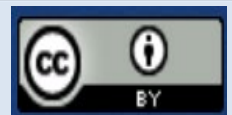


مراجع

1. Takamura S, Miyamoto T, Tomida Y, Minagawa T, Ohno N. Investigation on the effect of temperature excursion on the helium defects of tungsten surface by using compact plasma device. *Journal of Nuclear Materials*. 2011;415:S100-S103.
2. Dutta N, Buzarbaruah N, Mohanty S, Damage studies on tungsten due to helium ion irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 2014;452:51-56.
3. Bolt H, Barabash V, Krauss W, Linke J, Neu R, Suzuki S, Yoshida N, Team A.U. Materials for the plasma-facing components of fusion reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 2004;329:66-73.
4. Asgarian M.A, Seyedhabashi M.M.R, Bidabadi B.S, Rasouli C, Sedighi F. Radiation damage of tungsten surface irradiated with high-energy hydrogen and helium beams of plasma focus device. *Fusion Engineering and Design*. 2020;160:112007.
5. Sun L, Jin S, Li X.-C, Zhang Y, Lu G.-H. Hydrogen behaviors in molybdenum and tungsten and a generic vacancy trapping mechanism for H bubble formation. *Journal of Nuclear Materials*. 2013;434:395-401.
6. Cui Y, Lu N, Niu C, Lv J, Liu W, Chen C, Ni W, Mei X, Lei G, Song J. The evolution of hydrogen bubbles during ion irradiation and annealing in molybdenum for neutral beam injection inductively coupled plasma source. *Nuclear Materials and Energy*. 2022;33:101298.
7. Sedighi F, Rasouli C, Iraj D, Kouhi A, Rafi-Kheiri H, Rasouli H, Seyedhabashi M. Investigation of hydrogen glow discharge cleaning side effects on tungsten. *Plasma Physics Reports*. 2021;47:128-138.
8. Seyedhabashi M.M.R, Asgarian M.A, Rasouli C, Sedighi F. Radiation Damage of Graphite Surface, Used in First-Wall and Divertor of Tokamaks, Irradiated by Hydrogen and Argon in Plasma Focus Device. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2022;50:1814-1822.
9. Seyedhabashi M, Shafiei S, Tafreshi M, Bidabadi B.S. Study of surface damage and hydrogen distribution in irradiated tungsten by protons in plasma focus device. *Vacuum*. 2020;175:109249.
10. Sedighi F, Kouhi A, Iraj D, Rasouli C, Bidabadi B.S, Seyedhabashi M.M, Rasouli H. Damage study and comparison the effects of high-energy pulsed-protons of plasma focus device with low-energy protons of glow discharge plasma of tokamak. *Plasma Research Express*. 2020;2:035001.
11. Seyedhabashi M.M.R, Tafreshi M.A, Shafiei S, Abdisaray A. Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device. *Applied Radiation and Isotopes*. 2019;154:108875.
12. Seyedhabashi M.M.R, Tafreshi M.A, Shafiei S, Nasiri A. Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020;52:827-834.
13. Chamani A, Abtahi S.M.M, Tafreshi M.A.H, Seyedhabashi M.M.R. The comparison of the destructive effects of high energy protons produced in a plasma focus device on copper and molybdenum. *Radiation Safety and Measurement*. 2021;10:19-30.
14. Seyedhabashi M.M.R, Shirani Bidabadi B, Tafreshi M.A.H, Sedighi F, Nasiri A. Damage studies on irradiated tungsten by helium and argon ions in a plasma focus device. *Radiation Safety and Measurement*. 2020;9:1-12.
15. Tafreshi M, Habashi M, Bidabadi B, Abdisaray A, Shafiei S, Nasiri A. Investigating the effects of high-energy pulsed protons on the surface and structural properties of copper and tungsten by MTPF-2 plasma focus device. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2020;41:100-109.
16. Saw S.H, Damideh V, Ali J, Rawat R.S, Lee P, Lee S. Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus. *Vacuum*. 2017;144:14-20. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.002>.
17. Saw S, Damideh V, Ali J, Rawat R, Lee P, Lee S. Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2 kJ plasma focus. *Vacuum*. 2017;144:14-20.
18. Bhuyan M, Mohanty S, Rao C, Rayjada P, Raole P. Plasma focus assisted damage studies on tungsten. *Applied Surface Science*. 2013;264:674-680.
19. Niranjana R, Rout R, Srivastava R, Chakravarthy Y, Mishra P, Kaushik T, Gupta S.C. Surface modifications of fusion reactor relevant materials on exposure to fusion grade plasma in plasma focus device. *Applied Surface Science*. 2015;355:989-998.

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

سیدحبشی، میرمحمد رضا. (۱۴۰۳)، مقایسه تأثیر تابش پالس پروتون‌های پراورزی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی فلزات سخت. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹ (۳)، ۱۱۱-۱۰۳. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1594>. URL: https://jonsat.nstri.ir/article_1594.html.

