

بررسی اثرات تخریبی تابش یون‌های هلیوم و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی تنگستن

میرمحمد رضا سیدحبشی^۱، بابک شیرانی بیدآبادی^{۲*}، محمد امیر حمزه تفرشی^۱، فریدالدین صدیقی^۱ و علی نصیری^۱

^۱ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۲ گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

* اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱

پست الکترونیکی: b.shirani@ast.ui.ac.ir

چکیده

در این تحقیق اثرات تخریبی یون‌های پراانرژی هلیوم و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی کم‌انرژی نوع مدر بر روی سطح تنگستن مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های تنگستن در ۲۰ پالس دستگاه پلاسمای کانونی به‌طور جداگانه با یون‌های آرگون و هلیوم مورد تابش قرار گرفتند. سطح نمونه‌های خام و تابش‌دهی شده تنگستن با میکروسکوپ الکترونی آنالیز شد. میکروگراف‌های SEM نشان می‌دهد که تاول‌های متراکم با اندازه تقریبی چند صد نانومتر در سطح تنگستن در اثر تابش یون‌های هلیوم ایجاد شده‌اند ولی در نمونه‌های تابش‌دهی شده با یون‌های پر انرژی آرگون ترک‌های منظم دیده می‌شود که در سطح تنگستن گسترش یافته‌اند. از آنالیز پراش اشعه ایکس برای بررسی تغییرات بلوری ایجاد شده در تنگستن ناشی از تابش استفاده شد. تابش یون‌های پر انرژی هیدروژن و آرگون باعث به‌وجود آمدن تغییراتی در مکان قله‌ها، شدت قله‌ها، پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه^۱ (FWHM) و فاصله صفحات تنگستن شده، که نشان می‌دهد تابش یون‌های پر انرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی ساختار بلوری تنگستن را نیز تحت تأثیر قرار داده است. با استفاده از کد لی [۱] مشخصات باریکه یونی هلیوم و آرگون حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی تعیین شد و با استفاده از کد SRIM^۲ [۲] مقدار Dpa/shot و پروفایل تراکم یون‌های هلیوم و آرگون در عمق‌های مختلف تنگستن محاسبه شد. نتایج کد لی نشان می‌دهد که در هر شات به‌ترتیب 7×10^{14} ion/cm^۲ و 0.25×10^{14} ion/cm^۲ یون هلیوم و آرگون تولید می‌شود. نتایج کد SRIM نشان می‌دهد که بیشترین تخریب ایجاد شده در تنگستن ناشی از یون‌های آرگون و هلیوم به‌ترتیب در عمق‌های ۷ و ۳۰ نانومتری و به اندازه $1/7$ و $0/17$ dpa/shot می‌باشد. هم‌چنین بیشترین تراکم یون‌های آرگون و هلیوم به‌ترتیب در عمق‌های ۲۰ و ۴۰ نانومتری رخ می‌دهد.

کلیدواژگان: مواد مجاور با پلاسما، پلاسمای کانونی، باریکه یونی، آسیب تابشی، کد SRIM.

^۱ Full width at half maximum

^۲ Stopping and Range of Ions in Matter

^۳ Displacement per atom/shot

۱. مقدمه

تنگستن یکی از مواد پیشنهادی برای ساخت دیواره اول توکامک‌های ایترا^۱ و دمو^۲ می‌باشد [۹-۳]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های تجربی و محاسباتی گسترده‌ای در حوزه بررسی اثرات تخریبی و سازوکارهای ایجاد تخریب در مواد مجاور با پلاسما^۳ ناشی از تابش یون‌های مختلف صورت گرفته است.

هلیوم یکی از محصولات واکنش گداخت است و همچنین در تمیزسازی محفظه داخل توکامک از پلاسمای تخلیه درخشان^۴ هلیوم و آرگون استفاده می‌شود [۱۰، ۱۱]. بنابراین برخورد این یون‌ها با مواد دیواره اول بسیار حائز اهمیت است و اندرکنش یون‌ها با مواد مجاور با پلاسما یکی از کلیدی‌ترین مسائل در ساخت دستگاه‌های هم‌جوشی است. اهمیت این مسئله هم از نظر کنترل پلاسما در زمان تخلیه^۵ و هم از نظر عمر مفید مواد مجاور با پلاسما می‌باشد. عواقب اندرکنش پلاسما با این مواد به چند گروه تقسیم می‌شود که عبارتند از:

- فرسایش مواد در اثر برخورد پلاسمای لبه با دیواره و لایه‌نشانی دوباره مواد دیواره اول.
- ایجاد آلودگی‌ها و انتقال این آلودگی‌ها به داخل پلاسما.
- کاشته‌شدن یون‌های پلاسما در درون مواد مجاور با پلاسما و سپس پخش در درون مواد.
- ایجاد تغییرات خواص ساختاری، شیمیایی، مکانیکی و گرمایی مواد مجاور با پلاسما.
- گرمایش (و احتمالاً ذوب‌شدگی و یا تبخیر)، ایجاد ترک و سایر انواع تخریب در مواد مجاور با پلاسما.

بررسی اثر تابش یون هلیوم بر سطح تنگستن به صورت محاسباتی و با استفاده از تکنیک دینامیک مولکولی نیز در مقالات مختلف منتشر شده است. لی^۶ و همکاران نشان دادند که تمایل اتم هلیوم برای اتصال به یک خوشه هلیوم زیاد است و با افزایش اندازه خوشه، افزایش می‌یابد [۱۲، ۱۳]. همچنین نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که وجود نقص‌ها و حفره‌ها در ساختار تنگستن به تشکیل خوشه‌های هلیوم کمک می‌کند.

بررسی تأثیرات پلاسمای داغ و باریکه یون‌های پرانرژی بر روی خواص سطحی و ساختاری مواد مختلفی که برای ساخت راکتورهای گداخت هسته‌ای پیشنهاد شده‌اند، با استفاده از دستگاه‌های مختلفی از جمله دستگاه‌های پلاسمای کانونی صورت گرفته است [۱۶-۱۴]. دستگاه پلاسمای کانونی چشمه‌ای قدرتمند از باریکه‌های پرانرژی یون است [۱، ۲۰-۱۷].

ساو^۷ و همکاران اثرات تخریبی یون‌های دوتریم را در فواصل مختلف و در تخلیه‌های مختلف یک دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۲ کیلوژول مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های تنگستن با یون‌های دوتریم با انرژی متوسط ۵۶ keV و با شار $10^{26} \text{ ions.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ مورد تابش قرار گرفتند که در اثر تابش دهی، در فواصل مختلف ترک‌های با عرض ۳۰۰-۵۰۰ نانومتر و حفره‌های تا ۵ میکرومتر (بسته به فاصله نمونه‌های تنگستن از سر آند) ایجاد شده است [۲۱]. دوتا^۸ اثرات تخریبی یون‌های هلیوم تولیدشده در یک دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۲ کیلوژول را بر روی تنگستن مورد بررسی قرار داد. آن‌ها نمونه‌های تنگستن را در زوایای مختلف نسبت به محور آند قرار داده و در ۱۰ تخلیه مورد تابش قرار دادند و مشاهده کردند که ترک‌های یکنواخت روی تنگستن به عرض

¹ ITER international nuclear fusion research

² DEMOnstration Power Station

³ Plasma facing material

⁴ Glow discharge plasma

⁵ Discharges

⁶ Lee

⁷ Saw

⁸ Dutta

پلاسمای کانونی به‌عنوان چشمه یونی استفاده شده و در بخش دوم، شرح مختصری از دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شده در این مطالعه ارائه شده است. در این پژوهش با استفاده از کد لی مشخصات باریکه یونی برای یون‌های هلیوم و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی گزارش شده است. همچنین علاوه بر بررسی سطح مواد با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی و خواص ساختاری با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس، با استفاده از کد لی و SRIM پروفایل عمقی نفوذ یون‌های هلیوم و آرگون در تنگستن محاسبه شد. همچنین تخریب ناشی از یون‌های هلیوم و آرگون در عمق‌های مختلف نیز توسط کد SRIM محاسبه شد.

نتایج آنالیزهای انجام شده روی نمونه‌های تنگستن قبل و بعد از پرتودهی شامل آنالیز SEM و XRD و همچنین نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با کدهای Lee و SRIM در بخش سوم مقاله ارائه شده‌اند. در بخش چهارم مقاله نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی از پژوهش انجام شده پرداخته شده است.

۲. ابزار و روش‌ها

۲.۱. دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول MTPF-2 از نوع مدر با بانک خازنی به ظرفیت ۱۳/۵ میکروفاراد، حداکثر ولتاژ شارژ ۲۰ kV، اندوکتانس ۱۵۸ nH و جریان تخلیه ۱۰۰ kA به‌عنوان منبع تولید یون‌های هلیوم و آرگون برای پرتودهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ساختار الکترودهای این دستگاه پلاسمای کانونی در شکل ۱ نشان داده شده است. طول آند و کاتد ۱۴۵ mm، شعاع آند ۱۴/۵ mm، شعاع کاتد ۵ mm، طول مؤثر آند ۹۵ mm، طول عایق ۵۰ mm و تعداد ۱۲ عدد کاتد به‌صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته‌اند. در نوک آند یک حفره به شعاع ۱۰ mm و عمق ۱۰ mm به

الی ۴ میکرومتر ایجاد شد. نتایج آنالیز XRD نیز نشان داد که در نمونه‌های تابش‌دهی شده با هلیوم، قله‌ها به سمت زوایای بالا جابه‌جا شده‌اند [۱۴]. موهانتی^۱ در تحقیقی مشابه، نمونه‌های تنگستن را در ۲۰ تخلیه هیدروژن در زوایای مختلف نسبت به محور آند مورد تابش قرار دادند [۲۲]. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در اثر تابش پروتون‌های پرانرژی بر روی سطح تنگستن ترک‌ها، تاول‌ها و ذوب‌شدگی در اثر انتقال گرمای پروتون‌های پرانرژی به وجود آمد. نتایج آنالیز سختی‌سنجی روی نمونه‌ها نشان داد که سختی نمونه‌ها بعد از تابش با یون‌های پرانرژی هیدروژن کمی کاهش پیدا کرد. همچنین نتایج XRD نشان داد که در اثر تابش یون‌های پرانرژی هیدروژن محل قله‌ها در نمونه تابش‌دهی شده به سمت زوایای بیشتر جابه‌جا شده است.

در مورد فیزیک اندرکنش یون پرانرژی با سطح مواد سه سازوکار را می‌توان مطرح نمود. الف: انتقال انرژی توسط موج ضربه و باریکه یونی به سطح مواد، افزایش دمای سطح، ذوب شدن و سپس پراکندگی مذاب بر اثر برخورد باریکه یون، ب: افزایش دمای سطح مواد و تصعید آن، ج: کندوپاش^۲ فیزیکی توسط یون‌ها. این‌که کدام یک از این سازوکارها در دستگاه پلاسمای کانونی غالب هستند، به جنس ماده، انرژی یون‌ها و میزان تغییر دمای سطح ماده وابسته است.

عملکرد سازوکارهای الف و ب به دماهای ذوب و جوش مواد مورد بررسی بستگی دارد. سازوکار سوم، ضربه فیزیکی حاصل از بمباران یون پرانرژی و کنده شدن ذرات ماده می‌باشد که تبخیر فیزیکی یا کندوپاش نامیده می‌شود. این سازوکار باعث تغییر شکل ظاهری سطح تنگستن می‌شود.

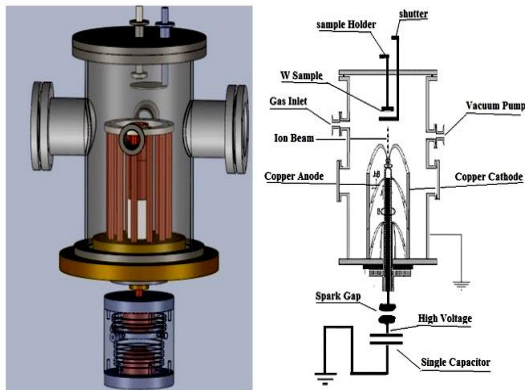
در این مقاله به‌طور جداگانه اثر تابش یون‌های هلیوم و آرگون بر تنگستن مطالعه آزمایشگاهی شده است. از دستگاه

^۱ Mohanty

^۲ Sputtering

۲.۲. چیدمان تجربی

نمونه‌های تنگستن در فاصله ۶ سانتی متری از سر آند و در ۲۰ تخلیه تحت تابش یون‌های هلیوم و آرگون به صورت جداگانه قرار گرفتند. چیدمان قرارگیری نمونه‌های تنگستن در داخل محفظه دستگاه و در مقابل آند در شکل ۱ نشان داده شده است. در اکثر تحقیقاتی که توسط پلاسمای کانونی انجام شده، تعداد شات ثابت (معمولاً ۱۰ یا حداکثر ۲۰ شات) انتخاب شده است. در تحقیق حاضر نیز تعداد ۲۰ شات انتخاب شد که شرایط پرتودهی در همه آزمایش‌ها ثابت باشد و همچنین امکان مقایسه نتایج با سایر کارهای انجام شده نیز فراهم باشد. از پیچ‌های روگوفسکی برای ثبت سیگنال آهنگ تغییرات جریان^۱ استفاده شد. نمونه‌ای از سیگنال‌های جریان و آهنگ تغییرات جریان دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل (۱): شماتیک ساختار دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 و چیدمان قرارگیری نمونه‌ها داخل دستگاه به صورت عمود بر محور الکترودها.

منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است. ابتدا برای دستیابی به محدوده‌ی مناسب فشار گاز، در فشارهای مختلف گاز هلیوم و آرگون هم‌چنین ولتاژهای ۱۰-۱۳ kV آزمایش‌های مختلفی انجام شد و نتایج نشان داد که ولتاژ شارژ خازن و فشار مناسب گاز هلیوم برای دستیابی به شرایط بهینه و پینچ‌های متوالی با عمق پینچ خوب به ترتیب ۰/۷ mbar در ولتاژ ۱۲ kV می‌باشد و در مورد گاز آرگون فشار مناسب ۰/۴ mbar و ولتاژ ۱۲ kV تعیین شد. نمونه‌های تنگستن به ابعاد $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ تهیه شدند و سطح نمونه‌ها قبل از تابش‌دهی با استفاده از سمباده صیقل داده شد.

سازوکار شتاب‌گیری یون‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی به این صورت است که در اثر تخلیه بانک خازنی روی آند و ایجاد اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند، 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 آند حرکت می‌کند و زمانی که به بالای سر آند می‌رسد، توسط نیروی بین رشته‌های جریان هم جهت، به سمت محور مرکزی آند جمع می‌شود و تشکیل پینچ می‌دهد. پینچ تشکیل شده دارای چگالی بسیار بالا، دمای خیلی زیاد و عمر بسیار کوتاه بوده و ناپایدار است. در اثر ناپایداری $m=0$ پینچ فروپاشی می‌کند و الکترون‌های به دام افتاده در فضای پینچ با انرژی‌های زیاد به سطح آند برخورد کرده و باعث تولید اشعه ایکس سخت و همچنین موجب تجمع بخار ذرات در بالای سر آند می‌شود [۱، ۲۳-۲۵]. پس از فروپاشی پلاسمای یون‌ها نیز با انرژی‌های نسبتاً زیاد به جهت مخالف الکترون‌ها گسیل می‌شوند. گستره انرژی باریکه‌های یون در دستگاه پلاسمای کانونی که با انرژی ذخیره شده در محدوده چند کیلوژول تا چندین مگاژول عمل می‌کنند، در محدوده ده‌ها کیلوالکترون‌ولت اندازه‌گیری شده است [۱، ۱۹، ۲۶-۲۸].

^۱ current derivative

در این رابطه، Φ تعداد یون‌های برخوردی به واحد سطح تنگستن در هر شات دستگاه و N چگالی اتمی را نشان می‌دهند. پارامتر displacement که توسط کد SRIM محاسبه می‌شود نشان‌دهنده‌ی تعداد جابه‌جایی ایجاد شده توسط یون در واحد طول است.

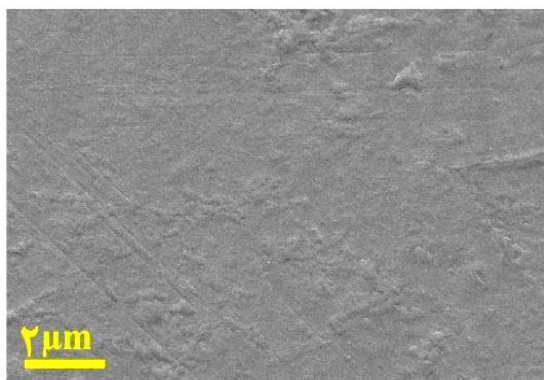
۳. نتایج پژوهش

۱.۳. آنالیز SEM

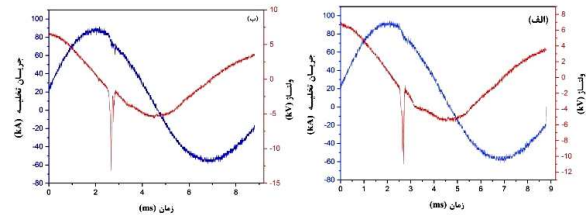
یون‌های پراورژی هلیوم و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی برای تابش‌دهی سطح تنگستن مورد استفاده قرار گرفتند. بعد از تابش‌دهی نمونه‌های تنگستن در ۲۰ تخلیه با گازهای هلیوم و آرگون از براقی سطح نمونه‌ها کاسته شد و تغییرات ایجاد شده در سطح نمونه‌ها با چشم غیر مسلح نیز قابل رؤیت بود.

تصویر SEM از سطح نمونه تنگستن قبل از تابش‌دهی (شکل ۳) نشان‌دهنده‌ی سطح صاف و هموار نمونه است. بعد از تابش‌دهی تنگستن با ۲۰ شات هلیوم و آرگون از سطح نمونه تصاویر SEM به‌صورت عمودی با بزرگنمایی‌های مختلف گرفته شد.

هم‌چنین تصاویر SEM از زاویه ۲۰ درجه نسبت به سطح نیز گرفته شد که این تصاویر، مورفولوژی سطح را بهتر از تصاویر عمودی نشان می‌دهند.



شکل (۳): تصویر SEM از سطح نمونه تنگستن قبل از پرتو‌دهی.



شکل (۲): نمونه سیگنال‌های جریان تخلیه و آهنگ تغییرات جریان تخلیه در آزمایش با گاز (الف) هلیوم (ب) آرگون.

۳.۲. شبیه‌سازی

از کد لی محاسبه تعداد یون‌های هلیوم ساطع شده از پینچ دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شد. به‌منظور محاسبه پارامترهای آسیب تابش و تخریب ایجاد شده در اثر بمباران سطح تنگستن با یون‌های هلیوم و آرگون از کد SRIM^۱ استفاده شد.

برای شبیه‌سازی با کد SRIM، ابتدا طیف یونی آرگون و هلیوم تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی به‌صورت فایل TRIM.DAT ورودی به کد SRIM داده شد. طیف انرژی یون‌های تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی توزیعی به‌صورت $\frac{dN}{dE} = cE^{-2.8}$ دارد، که باحل معادله فوق تعداد یون‌ها در هر بازه انرژی محاسبه می‌شود [۳۰، ۳۱].

در دستگاه پلاسمای کانونی، به فرآیند تخلیه الکتریکی بانک خازنی بر روی الکترودهای دستگاه "شات" گفته می‌شود. هر پالس تخلیه دستگاه یک شات نام دارد. در آزمایش‌های بررسی آسیب تابشی، معمولاً نمونه تحت تابش تعداد زیادی شات قرار می‌گیرد. بنابراین مقدار پارامتر dpa، به‌صورت dpa/shot یعنی به‌ازای هر شات محاسبه و گزارش می‌شود. dpa مقدار جابه‌جایی ایجاد شده به‌ازای هر اتم ماده هدف را نشان می‌دهد. مقدار dpa/shot با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

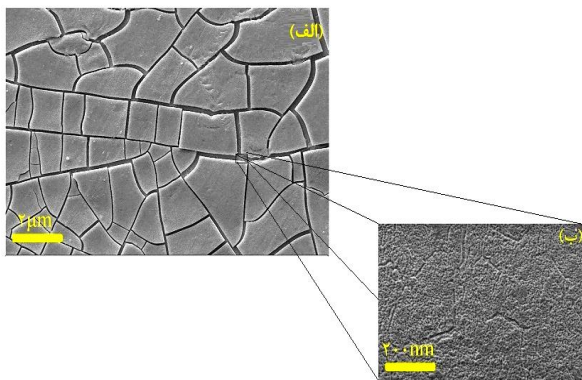
$$Damage\ rate \left[\frac{DPA}{shot} \right] = \frac{\Phi \left[\frac{ion}{shot - cm^2} \right] \times Displacement \left[\frac{1}{ion - cm} \right]}{N \left[\frac{atoms}{cm^3} \right]}$$

^۱ Stopping and Range of Ions in Matter

ماده دارد که این نقص‌ها در اثر تابش یون‌های پرانرژی هلیوم بر تنگستن در ساختار بلوری آن به وجود آمده است [۱۲، ۲۹].

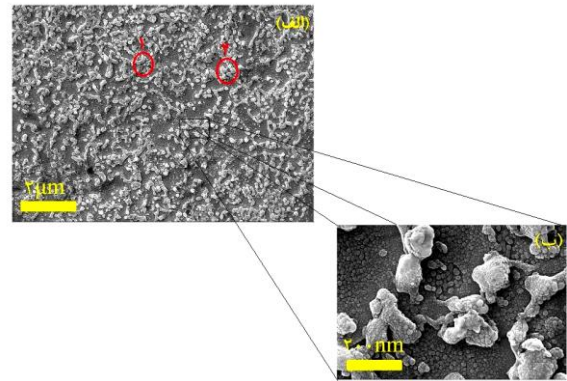
هر چقدر تعداد و اندازه نقص‌های شبکه‌ای در ماده بیشتر تر بشود، به دنبال آن اتم‌های هلیوم بیش‌تری می‌توانند در این نقص‌های شبکه به دام افتند و در نتیجه باعث افزایش اندازه و تراکم تاول‌ها می‌شود. از سوی دیگر اتم‌های هلیوم توسط خوشه‌های هلیوم دیگر نیز به دام می‌افتند و در نتیجه تاول‌های به‌وجود آمده به هم می‌پیوندند. در شکل ۴ دایره‌های قرمز رنگ ۱ و ۲ نمونه‌هایی از تاول‌های به هم پیوسته را نشان می‌دهند. با افزایش تراکم هلیوم به اندازه خوشه افزوده شده که باعث متورم شدن تنگستن و در نهایت ترکیدن تاول بر سطح تنگستن می‌شود.

تصویر SEM از سطح تنگستن تابش‌دهی شده با ۲۰ شات آرگون در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): تصویر SEM از سطح نمونه تنگستن تابش‌دهی شده در ۲۰ شات آرگون.

همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود تابش یون‌های آرگون باعث به‌وجود آمدن ترک‌ها^۷ و ناهمواری‌هایی در سطح تنگستن شده است که ناشی از بار گرمایی^۸ و تنش^۹ وارد شده بر سطح می‌باشد. در مقایسه با ایجاد تاول‌ها بر



شکل (۴): (الف) تصویر SEM از سطح تنگستن تابش‌دهی شده در ۲۰ شات هلیوم (ب) تصویر بزرگنمایی شده.

در میکروگراف شکل ۴-الف در سطح تنگستن تاول‌های^۱ متراکم دیده می‌شود. این تاول‌ها که در اثر تجمع یون‌های هلیوم و تشکیل خوشه‌های هلیوم به‌وجود آمده‌اند، در سطح تنگستن به هم متصل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴-ب دیده می‌شود، تاول‌ها در حال به هم پیوستن هستند. تاول‌های بسیار کوچک‌تر با ابعاد چند ده نانومتر به هم متصل می‌شوند و تاول‌های چند صد نانومتری را تشکیل می‌دهند. تاول‌های بزرگ نیز با پیوستن به هم، تشکیل رشته تاول نموده‌اند. این مشاهدات نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی لی را تایید می‌کنند [۱۲، ۲۹].

علت به‌وجود آمدن حباب و تاول در سطح تنگستن ناشی از تجمع اتم‌های هلیوم در نقص‌های شبکه‌ای^۲ مانند نقص بین‌نشینی^۳، جابه‌جایی شبکه^۴ و جاهای خالی در شبکه^۵ است. در اثر تابش‌دهی تنگستن دمای سطح تنگستن تا چند هزار درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند. دمای نمونه تحت تابش، نقش اساسی در تغییر نقص‌های شبکه از جمله چگالی دمایی، به هم پیوستن جاهای خالی^۶ و جابه‌جایی نقص‌های بین‌نشینی در شبکه بلوری ماده و هم‌چنین پخش اتم‌های هلیوم در ساختار

- ¹ bubble
- ² crystalline defects
- ³ interstitials
- ⁴ lattice dislocations
- ⁵ vacancies
- ⁶ Vacancies coalescence

⁷ Cracks

⁸ Thermal load

⁹ Stress

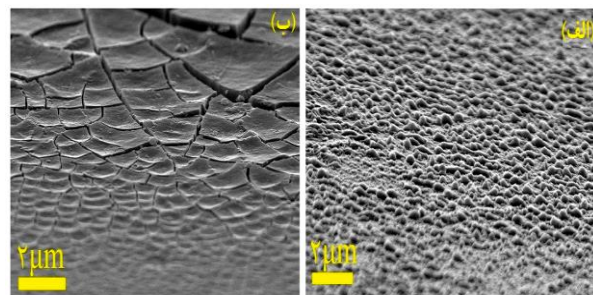
و تابش دهی شده با یون‌های آرگون و یون‌های هلیوم در شکل ۷ نشان داده شده است. هم‌چنین نتایج حاصل از آنالیز XRD سطح نمونه‌ها، قبل و بعد از پرتو دهی، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): نتایج آنالیز XRD نمونه‌های تنگستن قبل و بعد از پرتو دهی.

شماره صفحه	۲۰۰	۲۱۱	
محل پیک (02)	مرجع	۵۸,۲۵۱	۷۳,۱۷۱
	هلیوم	۵۸,۶۸۹	۷۳,۲۱۴
شدت پیک	مرجع	۵۸,۲۱۳	۷۳,۱۶۶
	هلیوم	۲۴۷۳,۹۵	۹۱,۳۸
فاصله صفحات (آنگستروم)	مرجع	۴۶۵,۴۱	۱۹,۸
	هلیوم	۱۶۴۹,۹	۶۷,۳
فاصله صفحات (آنگستروم)	مرجع	۱,۵۸۳	۱,۲۹۲
	هلیوم	۱,۵۷۲	۱,۲۸
آرگون	۱,۵۸۴	۱,۲۹۴	

دو قله که مربوط به صفحات (۲۰۰) و (۲۱۱) است، در طیف تنگستن مرجع دیده می‌شود. تابش یون به سطح تنگستن باعث به وجود آمدن تغییراتی در مکان قله‌ها، شدت قله‌ها، FWHM و فاصله صفحات شده است که نشان می‌دهد تابش یون‌های دستگاه پلاسمای کانونی، ساختار بلوری تنگستن را تحت تأثیر قرار داده است. با تابش یون‌های هلیوم به تنگستن، مکان قله‌ها به سمت زوایای بزرگتر جابه‌جا شده‌اند که میزان این جابه‌جایی تقریباً ۰/۳ درجه می‌باشد. تابش یون‌های هلیوم بر تنگستن باعث کاهش ارتفاع قله‌ها شده است، به طوری که کاهشی که در اثر تابش یون‌های هلیوم اتفاق افتاده است، بیش‌تر از نمونه‌های تابش دهی شده با آرگون است. این امر می‌تواند ناشی از برد بیشتر هلیوم در داخل تنگستن نسبت به آرگون باشد. هلیوم به عمق‌های بیشتری نسبت به آرگون در ماده نفوذ می‌کند و بنابراین تخریبی که ایجاد می‌کند در عمق‌های بیشتر از ماده است و لسی تخریبی که آرگون ایجاد می‌کند به دلیل برد کم آن نسبت به هیدروژن سطحی است. تابش یون‌های پراورزی آرگون به تنگستن باعث جابه‌جایی ۰/۳۴ درجه‌ای مکان قله‌ها به سمت زوایای کوچک‌تر شده است و شدت قله‌ها نیز کاهش پیدا کرده است.

روی سطح نمونه تابش دهی شده با یون‌های هلیوم تفاوت قابل توجهی دیده می‌شود. در تابش دهی با یون آرگون، تاول و حباب در سطح تنگستن مشاهده نمی‌شود و فقط ترک‌های با عرض در حدود چند صد نانومتر در سطح تنگستن ایجاد شده است. در تصویر بزرگنمایی شده‌ی شکل ۵-ب مشاهده می‌شود که در سطح زیرین ترک‌ها، ترک‌های بسیار ریزتری ایجاد شده‌اند که در حال پیوستن به یکدیگر و ایجاد جزایر کوچک هستند. شکل ۶ تصاویر SEM را نشان می‌دهد که با زاویه ۲۰ درجه از سطح تنگستن تابش دهی شده با هلیوم و آرگون گرفته شده‌اند. این تصاویر، به دلیل نمایش سه بعدی (در مقایسه با نمایش دو بعدی که تصاویر عمودی ارائه می‌دهند) اطلاعات بیشتری از مورفولوژی سطح نمونه‌ها نشان می‌دهند. عمق ترک‌ها و ارتفاع تاول‌های ایجاد شده روی سطوح بسیار متفاوت است. عمق ترک‌های مشاهده شده در تصویر تا ۷۰ nm و بیشترین ارتفاع تاول‌های مشاهده شده، ۱۰۰ nm است. همان‌گونه که در تصاویر دیده می‌شود، ترک‌ها در تمامی سطح تنگستن گسترش یافته‌اند و تاول‌ها نیز تقریباً کل سطح تنگستن را پوشش داده‌اند.



شکل (۶): تصاویر SEM که با زاویه ۲۰ درجه از سطح نمونه‌های تنگستن تابش دهی شده با (الف) هلیوم و (ب) آرگون گرفته شده است.

۲.۳. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

از آنالیز پراش پرتو ایکس برای بررسی تأثیر برخورد یون‌های پراورزی هلیوم و آرگون بر خواص ساختاری و بلوری تنگستن استفاده شد. طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های مرجع

۳.۳. شبیه سازی

پارامترهای استخراج شده از کد لی در جدول ۲ آورده شده‌اند [۱، ۲۱، ۲۵]. از این پارامترها در محاسبه dpa^9 و هم‌چنین محاسبه تراکم اتم‌های هلیوم در تنگستن استفاده شد.

جدول ۲. پارامترهای باریکه یونی محاسبه شده توسط کد لی برای

دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول نوع مدر MTPF-2.

پارامترهای یونی	واحد	باریکه یونی	
		هلیوم	آرگون
I_{peak}	kA	۹۵	۹۵
I_{pinch}	kA	۴۵	۷۰
FIB beam energy	J	۳	۵
FIB energy Flux	$\times 10^{12} Wm^{-2}$	۵,۶	۱۳۰
FIB damage factor	$\times 10^8 Wm^{-2} s^{0.5}$	۹,۸	۱۱۰
Ion flux	$\times 10^{27} m^{-2} s^{-1}$	۱,۷	۰,۵۹
Ion Fluence	$\times 10^{19} m^{-2}$	۵,۲	۰,۴۹
Pinch Duration	ns	۳۰,۷	۸,۳
Ion Current	kA	۸,۲	۷,۶
Current Density	$\times 10^8 A m^{-2}$	۵,۴	۱۵
Ions per shot	$\times 10^{14}$	۷,۹	۰,۲۵

توزیع عمقی ذرات هلیوم در تنگستن، توزیع عمقی

جابه‌جایی ایجاد شده در اتم‌های ماده و هم‌چنین dpa ناشی از تابش یون‌های هلیوم و آرگون بر تنگستن توسط کد SRIM برآورد شد و نمودارهای مربوطه در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

کد SRIM بر اساس روش مونت‌کارلو عمل می‌کند.

تعداد ذرات چشمه توسط کاربر تعیین می‌شود. خطای نسبی

نتایج، برابر $\frac{1}{\sqrt{N}}$ است که N تعداد ذرات شمارش شده

برای محاسبه کمیت مورد نظر است. با توجه به تعداد ذرات

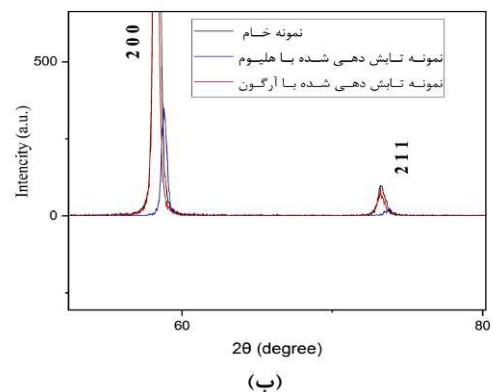
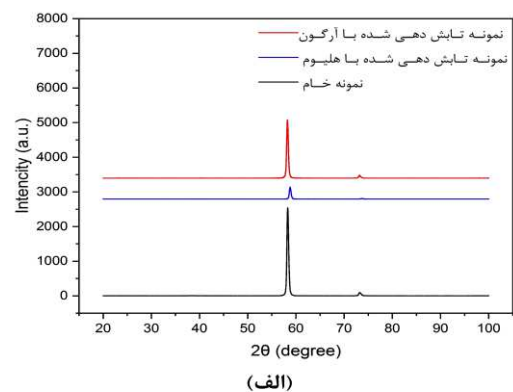
شمارش شده توسط کد SRIM، خطای نسبی نتایج

شبیه‌سازی‌های انجام شده کمتر از ۱۰ درصد بوده است. نتایج

کد SRIM نشان می‌دهد که بیشترین تخریب ایجاد شده در

تنگستن ناشی از یون‌های هلیوم و آرگون به ترتیب در

جابه‌جایی قله طیف پراش پرتو ایکس و کاهش شدت قله دلایل گوناگونی دارد. پهن‌شدگی قله یا همان افزایش FWHM قله زمانی اتفاق می‌افتد که شبکه بلور ماده دچار نقص شود و با افزایش این نقص‌ها در بلور، میزان پهن‌شدگی نیز افزایش خواهد یافت. جابه‌جایی مکان قله‌ها نسبت به مکان آن‌ها در طیف نمونه مرجع به دلیل تنش و کرنش^۱ ایجاد شده در نمونه‌ها به دلیل انتقال گرمایی بسیار زیاد به نمونه‌ها در زمان تابش یون‌های هیدروژن و آرگون بوده است. تنش و کرنش ایجاد شده می‌تواند ناشی از دلایل زیادی هم‌چون جابه‌جایی اتم‌ها در شبکه^۲، ترک‌های انباشته شده^۳، میکروتنش‌ها^۴، تنش‌های داخلی دوربرد^۵، مرزدانه^۶، تنش داخلی^۷ و نواقص نقطه‌ای^۸ باشد.



شکل (۷): (الف): طیف XRD سطح تنگستن خام و تابش دهی شده با یون‌های آرگون و هلیوم در ۲۰ شات دستگاه پلاسمای کانونی. (ب): بزرگنمایی طیف و نمایش جابه‌جایی قله‌ها.

- ¹ stress/stain
- ² dislocations
- ³ stacking faults
- ⁴ microstresses,
- ⁵ long-range internal stresses
- ⁶ grain boundaries
- ⁷ internal stresses
- ⁸ point defects

⁹ Displacement per atom

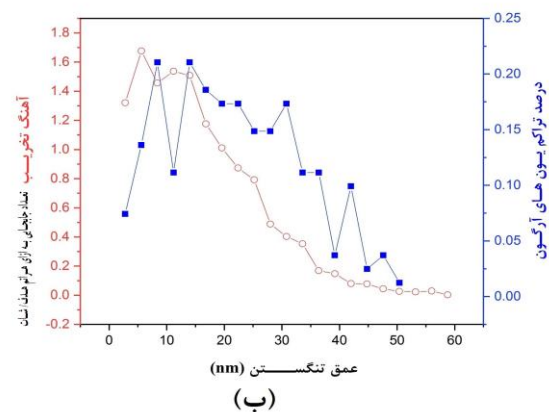
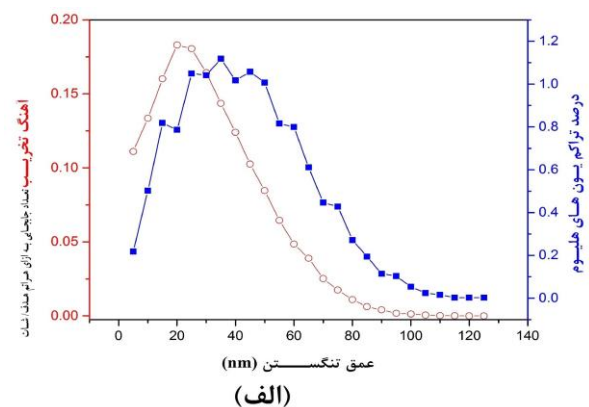
تاول‌های با ارتفاع حدود 100 nm بر روی سطح مشاهده می‌شود. تصاویر SEM پروفایل عمقی تخریب را نشان نمی‌دهند ولی بیشینه عمق تخریب ایجاد شده توسط یون‌ها که در SEM به صورت عمق ترک‌ها قابل مشاهده است، تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. پارامتر دیگری که توسط کد SRIM محاسبه شده است، یعنی توزیع عمقی تراکم یون‌ها در تنگستن را توسط هیچکدام از آنالیزهای SEM و XRD نمی‌توان به صورت تجربی مشاهده کرد. برای اندازه‌گیری این پارامتر باید از آنالیز ERD استفاده شود که در این پژوهش امکان انجام آن فراهم نبود.

نتایج شبیه‌سازی هم‌چنین نشان می‌دهند در حالتی که نمونه تنگستن با یون‌های آرگون پرتودهی شده است، تهی‌جاها در عمق‌های بیشتر نیز به مقدار قابل توجهی تولید شده‌اند که می‌تواند مؤید این واقعیت باشد که اتم‌های پس‌زده تنگستن در حرکتشان به جلو این تهی‌جاها را ایجاد کرده باشند. در مقایسه برخورد یون آرگون و هلیوم با تنگستن می‌توان گفت که به دلیل جرم بیشتر یون آرگون تکانه وارد شده به اتم‌های تنگستن بیش‌تر بوده و خود اتم‌های تنگستن پس‌زده دوباره ایجاد تخریب می‌کنند.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق سطح تنگستن با استفاده از یون‌های هلیوم و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی مورد تابش قرار گرفت. نتایج میکروگراف‌های SEM نشان می‌دهد که در سطح تنگستن تاول‌های متراکم در اثر تجمع خوشه‌های هلیوم ایجاد شده است. در تصاویر دیده می‌شود که حباب‌ها در حال به هم پیوستن و بزرگ شدن هستند. تابش یون‌های پرانرژی آرگون بر سطح تنگستن باعث به وجود آمدن ترک‌هایی در سطح تنگستن شده است. با بزرگنمایی تصاویر سطح تنگستن، به نظر می‌رسد ترک‌ها به هم می‌پیوندند و جزایر کوچکتری را

عمق‌های 30 و 7 نانومتری و به اندازه 0.17 و $1/7$ dpa/shot می‌باشد. هم‌چنین بیشترین تراکم یون‌های هلیوم و آرگون به ترتیب در عمق‌های 40 و 15 نانومتری است. شکل ۸ ب نشان می‌دهد که یون‌های آرگون تا عمق‌های بالای 50 nm و تخریب ناشی از یون‌های آرگون تا عمق 60 nm گسترش یافته است. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که یون‌های هلیوم تا عمق‌های بیش‌تر از 100 nm به داخل سطح تنگستن نفوذ کرده‌اند.



شکل (۸): توزیع عمقی یون‌ها و توزیع عمقی آهنگ تخریب (dpa/shot) در تنگستن تحت پرتودهی با (الف) هلیوم و (ب) آرگون.

این مقادیر با نتیجه مشاهده شده از تصاویر SEM در مورد عمق آسیب‌های ایجاد شده بر سطح تنگستن (ترک‌ها و حباب‌ها) هم‌خوانی دارد. تصاویر SEM نشان دادند که عمق ترک‌ها در بیشتر نواحی در حدود 70 nm است ولی ارتفاع تاول‌ها بسیار متفاوت بوده و از تاول‌های بسیار ریز تا

در سطح زیرین ترک‌های اصلی به وجود می‌آورند. ترک‌ها ناشی از بار گرمایی و تنش وارد شده بر سطح می‌باشند. آنالیز XRD نشان داد که تابش یون‌های پرانرژی هلیوم و آرگون باعث به وجود آمدن تغییراتی در مکان قله‌ها، شدت قله‌ها، پهنای قله‌ها و فاصله صفحات بلوری شده است. این آنالیز نشان می‌دهد تابش یون‌های پرانرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی ساختار بلوری تنگستن را نیز تحت تأثیر قرار داده است. با تابش یون‌های هلیوم به تنگستن مکان قله‌ها به سمت زوایای بزرگتر جابه‌جا شده‌اند که میزان این جابه‌جایی تقریباً ۰/۳ درجه می‌باشد. تابش یون‌های هلیوم بر تنگستن باعث کاهش ارتفاع قله‌ها شده است به طوری که کاهشی که در اثر تابش یون‌های هلیوم اتفاق افتاده است،

بیشتر از نمونه‌های تابش‌دهی شده با آرگون است. با استفاده از کد لی مشخصات باریکه یونی هلیوم و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی شبیه‌سازی شد و از نتایج آن برای به دست آوردن محاسبات تخریب و هم‌چنین تراکم این یون‌ها در عمق‌های مختلف تنگستن استفاده شد. برای محاسبات تخریب، طیف انرژی یونی دستگاه پلاسمای کانونی به صورت فایل TRIM.DAT به SRIM داده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بیشینه تراکم هلیوم و آرگون در تنگستن به ترتیب در عمق‌های ۴۰ و ۲۰ نانومتر از سطح تنگستن می‌باشد. بیش‌ترین تخریب در تنگستن، ناشی از یون‌های هلیوم و آرگون به ترتیب در عمق‌های ۳۰ و ۷ نانومتری و به اندازه ۰/۱۷ و ۱/۷ dpa/shot ایجاد شده است.

۵. مراجع

- [1] N. Dutta, S. Mohanty and N. Buzarbaruah. Modification on graphite due to helium ion irradiation, *Physics Letters A*, 380 (2016) 2525–2530.
- [2] M. Sadowski, J. Zebrowski, E. Rydygier and J. Kucinski. Ion emission from plasma-focus facilities, *Plasma physics and controlled fusion*, 30 (1988) 763.
- [3] M.M. Jakas and D.E. Harrison Jr. Dependence of atom ejection on electronic energy loss, *Physical Review B*, 32 (1985) 2752.
- [4] S. Lee and S. Saw. Plasma focus ion beam fluence and flux For various gases, *Physics of Plasmas*, 20 (2013) 062702.
- [5] Y. Wang, Z. Pan, Y. Ho, Y. Xu and A. Du, The structural and dynamical properties of Al clusters adsorbed on Ni surface, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 180 (2001) 251–256.
- [6] V. Philipps. Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices, *Journal of nuclear materials*, 415 (2011) S2–S9.
- [7] Y. Ueda, J. Coenen, G. De Temmerman, R. Doerner, J. Linke, V. Philipps and E. Tsitrone. Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond, *Fusion engineering and design*, 89 (2014) 901–906.
- [8] M. Roedig, W. Kuehnlein, J. Linke, M. Merola, E. Rigal, B. Schedler and E. Visca. Investigation of tungsten alloys as plasma facing materials for the ITER divertor, *Fusion Engineering and Design*, 61 (2002) 135–140.
- [9] D. Hwangbo, S. Kajita, N. Ohno, P. McCarthy, J.W. Bradley and H. Tanaka. Growth of nano-tendrils bundles on tungsten with impurity-rich He plasmas, *Nuclear Fusion*, 58 (2018) 096022.
- [10] B.H. Sencer, G.S. Was, M. Sagisaka, Y. Isobe, G.M. Bond and F.A. Garner. Proton irradiation emulation of PWR neutron damage microstructures in solution annealed 304 and cold-worked 316 stainless steels, *Journal of nuclear materials*, 323 (2003) 18–28.
- [11] V.N. Pimenov, E.V. Dyomina, L.I. Ivanov, S.A. Maslyaev, V.A. Gribkov, R. Miklaszewski, M. Scholz, A.V. Dubrovsky, I.V. Volobuev, Y.E. Ugaste, F. Mezzetti, P. De Chiara, L. Pizzo, B. Kolman and A. Szydowski. Damage of structural materials for fusion devices under pulsed ion and high temperature plasma beams, *Journal of Nuclear Materials*, 307–311 (2002) 95–99.
- [12] M. mohammadreza Seyedhabashi, M.A. Tafreshi, B. Shirani, S. Shafiei and A. Abdisaray. Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device, *Applied Radiation and Isotopes*, 154 (2019) 108875.
- [13] S. Masuzaki, N. Ashikawa, K. Nishimura, M. Tokitani, T. Hino, Y. Yamauchi, Y. Nobuta, N. Yoshida, M. Miyamoto and A. Sagara. Wall Conditioning in LHD, *Fusion Science and Technology*, 58 (2010) 297–304.
- [14] Y. Yamauchi, K. Takeda, Y. Nobuta and T. Hino. Hydrogen and helium removal retained in stainless steel by neon glow discharge, *Journal of nuclear materials*, 390 (2009) 1048–1050.
- [15] X.-C. Li, X. Shu, P. Tao, Y. Yu, G.-J. Niu, Y. Xu, F. Gao and G.N. Luo. Molecular dynamics simulation of helium cluster diffusion and bubble formation in bulk tungsten, *Journal of Nuclear Materials*, 455 (2014) 544–548.
- [16] L. Pentecoste, P. Brault, A.L. Thomann, P. Desgardin, T. Lecas, T. Belhabib, M.-F. Barthe and T. Sauvage. Low Energy and low fluence helium implantations in tungsten: Molecular dynamics simulations and experiments, *Journal of Nuclear Materials*, 470 (2016) 44–54.
- [17] N. Dutta, N. Buzarbaruah and S. Mohanty, Damage studies on tungsten due to helium ion irradiation, *Journal of Nuclear Materials*, 452 (2014) 51–56.
- [18] S. Javadi, M. Ghoranneviss, R. Rawat and A.S. Elahi. Topographical, structural and hardness changes in surface layer of stainless steel-AISI 304 irradiated by fusion-relevant high energy deuterium ions and neutrons in a low energy plasma focus device, *Surface and Coatings Technology*, 313 (2017) 73–81.
- [19] F.W. Meyer, P.S. Krstic, H. Hijazi, M.E. Bannister, J. Dadras, C.M. Parish and H. Meyer. Surface-morphology changes and damage in hot tungsten by impact of 80 eV–12 keV He-ions and keV-energy self-atoms, *Journal of Physics: Conference Series of IOP Publishing*, (2014) 012036.
- [20] R. Niranjana, R. Rout, R. Srivastava, Y. Chakravarthy, P. Mishra, T. Kaushik and S.C. Gupta. Surface modifications of fusion reactor relevant materials on exposure to fusion grade plasma in plasma focus device, *Applied Surface Science*, 355 (2015) 989–998.
- [21] B. Nayak, B. Acharya, S. Mohanty, T. Borthakur and H. Bhuyan. Surface nitriding of graphite substrate by plasma focus device towards synthesis of carbon nitride coating, *Surface and Coatings Technology*, 145 (2001) 8–15.
- [22] J. Davies, J. McIntyre and G. Sims. Isotope effect in heavy ion range studies, *Canadian Journal of Chemistry*, 39 (1961) 611–615.
- [23] S.M. Miremad and B.S. Bidabadi. Measurement of the effective energy of pulsed X-rays emitted from a Mather-type plasma focus device, *Applied radiation and isotopes*, 125 (2017) 169–175.
- [24] S. Saw, V. Damideh, J. Ali, R. Rawat, P. Lee and S. Lee. Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus, *Vacuum*, 144 (2017) 14–20.
- [25] M. Bhuyan, S. Mohanty, C. Rao, P. Rayjada and P. Raole. Plasma focus assisted damage studies on

- tungsten, Applied surface science, 264 (2013) 674–680.
- [26] M. Scholz, R. Miklaszewski, V. Gribkov and F. Mezzetti. PF-1000 device, Nukleonika, 45 (2000) 155–158.
- [27] V. Gribkov, A. Banaszak, B. Bienkowska, A. Dubrovsky, I. Ivanova-Stanik, L. Jakubowski, L. Karpinski, R. Miklaszewski, M. Paduch and M. Sadowski. Plasma dynamics in the PF-1000 device under full-scale energy storage: II. Fast electron and ion characteristics versus neutron emission parameters and gun optimization perspectives, Journal of Physics D: Applied Physics, 40 (2007) 3592.
- [28] M. Akel, S.A. Salo, S.H. Saw and S. Lee. Characterization of oxygen ion beams emitted from plasma focus, Vacuum, 110 (2014) 54–57.
- [29] M. Chernyshova, V.A. Gribkov, E. Kowalska-Strzeciwilk, M. Kubkowska, R. Miklaszewski, M. Paduch, T. Pisarczyk, E. Zielinska, E.V. Demina, V.N. Pimenov, S.A. Maslyaev, G.G. Bondarenko, M. Vilemova and J. Matejcek. Interaction of powerful hot plasma and fast ion streams with materials in dense plasma focus devices, Fusion Engineering and Design, 113 (2016) 109–118.
- [30] D. Donovan, D. Buchenauer, J. Whaley and R. Friddle. Characterization of a compact ECR plasma source and its applications to studies of helium ion damage to tungsten, Physica Scripta, 2016 (2016) 014040.
- [31] M. Habibi, Angular distribution of ion beam emitted from a 3.5 kJ plasma focus device using different shapes of anodes, Physics Letters A, 380 (2016) 439–443.