

مقایسه اثرات تخریب تابش پالس‌های پرنرژی پروتون در دستگاه پلاسمای کانونی بر فلزات واسطه: مطالعه موردی مس و مولیبدن

عالیه چمنی^{۱*}، سید محمدمهدی ابطحی^۲، محمد امیرحمزه نفرشی^۳ و میرمحمدرضا سیدحبشی^۳

^۱گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، کدپستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران، ایران.

^۲گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

^۳پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه پیام نور، گروه فیزیک، کدپستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷

پست الکترونیکی: alieh_chamani@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق اثرات تخریب پروتون‌های پرنرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر مورفولوژی سطحی و هم‌چنین پارامترهای ساختاری مس و مولیبدن مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مس و مولیبدن که در فاصله ۶ سانتی‌متری از سر آند قرار داده شده و 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 مولیبدن و مس باعث به‌وجود آمدن تاول، ترک و ذوب‌شدگی در سطح نمونه‌ها شده است. از آنالیز پراش اشعه ایکس برای بررسی تغییرات ایجاد شده در ساختار نمونه‌ها در اثر تابش پروتون‌های پرنرژی استفاده شد. از کد لی به‌منظور مشخصه‌یابی باریکه یونی دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شد. نتایج کد لی نشان می‌دهد که در هر تخلیه تعداد $10^{14} \times 7/9$ یون از ستون پلازما ساطع می‌شود. از کد SRIM برای محاسبه تخریب ایجاد شده در مولیبدن و مس و تراکم هیدروژن در عمق‌های مختلف مولیبدن و مس استفاده شد. براساس نتایج کد SRIM بیشینه مقدار جابه‌جایی بر اتم برای نمونه‌های مولیبدن و مس تابش‌دهی شده با یون‌های هیدروژن در عمق‌های ۵۰۰ و ۵۸۰ نانومتر به‌ترتیب برابر با ۰/۰۲۴ و ۰/۰۰۹ برآورد شد. بیشینه تراکم یون‌های هیدروژن در نمونه تابش داده شده مولیبدن و مس در عمق‌های ۵۵۰، ۷۵۰ نانومتر به‌ترتیب ۰/۵ و ۰/۱۱ درصد می‌باشد.

کلیدواژگان: آسیب تابشی، مولیبدن، مس، مورفولوژی سطح، تجزیه تحلیل‌های ساختاری، پلاسمای کانونی.

۱. مقدمه

ساخت توکامک‌های قدرت آینده پیشنهاد شده‌اند، می‌توان به تنگستن، مولیبدن، برلیوم و گرافیت و آلیاژهای آن اشاره کرد. هر کدام از این مواد، دارای مزیت‌ها و معایبی می‌باشند [۱-۵]. مثلاً تنگستن دارای نقطه جوش بسیار زیاد، نرخ کندوپاش

در ساخت دیواره اول توکامک‌های کانونی از مواد مختلفی استفاده شده است. از جمله مواد مواجهه با پلازما^۱ که برای

^۱ Plasma Facing Material (PFM)

فیزیکی کم، هدایت گرمایی بالا و فعال شدن^۱ کم در میدان نوترون است. اما از مشکلات اساسی استفاده از آن در ساخت دیواره اول سخت بودن فرز کاری و خمش و برش آن می باشد [۳، ۴]. یکی از اصلی ترین معایب تنگستن این است که هیدروژن و دوتریم می تواند در ساختار آن به راحتی حرکت کرده و پخش گردند و با به دام افتادن در نقص های بلوری باعث به وجود آمدن حباب، تاول و خوشه شوند [۶-۸].

ترکیدن تاول ها باعث وارد شدن ذرات میکروسکوپی تنگستن در داخل پلاسما می شود. این عامل سبب اتلاف انرژی پلاسما در اثر تابش ترمزی و به دنبال آن باعث اختلال و فروپاشی می شود [۵، ۹]. با وجود این که تنگستن به عنوان اصلی ترین نامزد مورد توجه بوده است ولی به دلیل محدودیت هایی که ذکر شد، محققان آزمایشات و تحقیقات خود را بر سایر فلزات دیگر متوقف نکرده و به موازات تحقیقاتی که روی تنگستن انجام می شود، تحقیقات دیگر را روی سایر نامزدها از جمله مولیبدن انجام می دهند [۱]. بررسی تأثیرات پلاسما داغ و باریکه یون های پرنرژی بر خواص سطحی و ساختاری مواد مختلف که برای ساخت راکتورهای گداخت هسته ای پیشنهاد شده اند، با استفاده از دستگاه های مختلف از جمله شتاب دهنده ها، دستگاه پرتو یونی با شار بالا، دستگاه پلاسما خطی [۳] و دستگاه پلاسما کانونی صورت گرفته است [۱۰-۱۲].

دستگاه پلاسما کانونی، چشمه ای قدرتمند از باریکه های پرنرژی یون، الکترون نسبی، تابش های ایکس و نوترون ها است. گستره انرژی باریکه های یون در دستگاه پلاسما کانونی که با انرژی ذخیره شده در محدوده چند کیلوژول تا مگاژول عمل می کنند در محدوده ده ها کیلو الکترون ولت تا چندین مگا الکترون ولت اندازه گیری شده است [۱۲]. دستگاه پلاسما کانونی از لحاظ ایجاد شرایط مشابه در توکامک های

آینده که در اثر ناپایداری های از هم گسیخته و حالت موضعی لبه^۲ باعث برخورد یون های پرنرژی، جریان پلاسما و موج ضربه به دیواره اول توکامک ها می شوند بسیار مناسب است [۱۳]. بنابراین دستگاه پلاسما کانونی ابزاری مناسب برای آزمایش مواجهه پلاسما با ماده در برابر تابش است [۱۴، ۱۵]. در ادامه نتایج مربوط به تحقیقاتی که در آن اثرات تخریبی یون های پرنرژی در آزمایش مواجهه پلاسما با ماده با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی روی مواد مختلف انجام گرفت، به طور خلاصه بیان شده است. دامیده^۳ و همکارانش اثرات تخریبی یون های پرنرژی دوتریم را با تخلیه خازن هایی با انرژی های مختلف دستگاه پلاسما کانونی ۲/۲ کیلوژول در فواصل مختلف مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در این آزمایش انرژی متوسط و شار یون های دوتریم به ترتیب ۵۶ کیلو الکترون ولت و $10^{26} \text{ ions m}^{-2}\text{s}^{-1}$ است. نتیجه این تابش تشکیل ترک های ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتری و حفره هایی تا ۵ میکرومتر بسته به فاصله آن از سر آند است [۱۶]. دوتا^۴ و همکارانش اثرات تخریبی یون های هلیوم تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی ۲/۲ کیلوژول را بر روی تنگستن مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. آن ها نمونه های تنگستن را در زوایای مختلف نسبت به محور آند قرار داده و تحت تابش ۱۰ تخلیه خازنی قرار دادند. نتیجه مشاهده شده ترک های یکنواختی بود که بر روی تنگستن به عرض ۱ الی ۴ میکرومتر ایجاد شد. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس^۵ نیز نشان داد که در نمونه های تابش داده شده با هلیوم قله ها به سمت زوایای بزرگتر جابه جا شدند [۱۶].

موهانتی^۶ و همکارانش در کاری مشابه نمونه های تنگستن را در ۲۰ تخلیه خازنی با هیدروژن در زوایای مختلف نسبت به

² Edge-localized mode (ELMS)

³ Damideh

⁴ Dutta

⁵ X-Ray Diffraction (XRD)

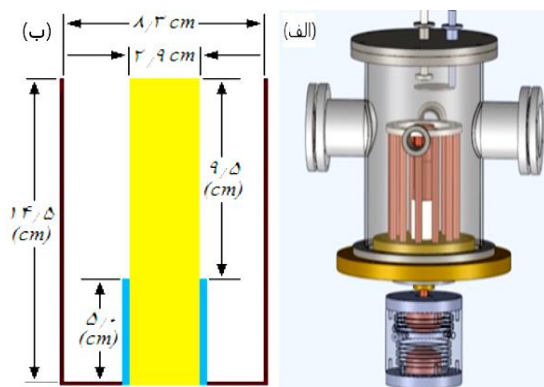
⁶ Mohanty

¹ Active

عمق نفوذ یون‌های هیدروژن در هر دو ماده و پروفایل چگالی هیدروژن در هر دو ماده برآورد شد.

۲. چیدمان آزمایش

در شکل ۱ دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول MTPF-2 از نوع مدر و حداکثر ولتاژ شارژ ۲۰ کیلوولت، بانک خازنی به ظرفیت ۱۳/۵ میکروفاراد، جریان تخلیه ۱۰۰ کیلوآمپر و اندوکتانس ۱۵۸ نانوهرنری به‌عنوان منبع تولید یون‌های هیدروژن پرنرژی برای پرتودهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ساختار الکترودهای این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): (الف) شماتیک دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2.

(ب) آرایه آند و کاتدهای دستگاه پلاسمای کانونی.

۱۲ عدد کاتد به‌صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته‌اند. در نوک آند یک حفره به شعاع ۱۰ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر به‌منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است. در ابتدا برای به‌دست 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 میلی‌بار ولتاژ کاری ۱۲ کیلوالکترون‌ولت انجام شدند. نمونه‌ها در فاصله ۶ سانتی‌متری از سر آند و در ۲۰ تخلیه خازنی تحت تابش یون‌های هیدروژن قرار گرفتند.

محور آند مورد تابش قرار دادند [۳]. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که در اثر تابش پروتون‌های پرنرژی ترک‌ها، تاول‌ها و ذوب‌شدگی در اثر انتقال گرمای پروتون‌های پرنرژی بر سطح تنگستن به‌وجود آمد. نتایج سختی‌سنجی 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، به‌سمت زوایای بزرگ‌تر جابه‌جا شده است [۲، ۱۳].

نیرانجان^۱ و همکارانش تغییرات سطحی ایجاد شده روی مواد مواجه با پلاسمای (تنگستن، نیکل، استیل^۲، مولیبدنیم و مس) را با استفاده از پلاسمای هم‌جوشی ایجاد شده در دستگاه پلاسمای کانونی مورد بررسی قرار دادند. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ که در شرایط برهم‌کنش جریان یون‌های پرنرژی دوتریم با پلاسمای داغ تولید شده در دستگاه‌های پلاسمای کانونی PF-6 و PF-1000 مشاهده شد، نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه خازنی ترک‌های ایجاد شده باریک به ترک‌های عمیق و بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند [۱۷]. اما در تحقیقات انجام شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی بر روی مواد مواجه با پلاسمای، گزارش‌های بسیار کم و به‌صورت کیفی در رابطه با تابش‌دهی سایر مواد پیشنهادی از جمله مولیبدن وجود دارد. بنابراین در این مقاله علاوه‌بر بررسی نتایج به‌دست آمده از میزان تخریب ایجاد شده با یک سیستم پلاسمای کانونی نوعی بر روی مولیبدن و مس که با استفاده از کد لی^۴ [۱۸] انجام شد، میزان تخریب ایجاد شده در مولیبدن و مس با استفاده از کد SRIM^۵ نیز به‌دست آمد. علاوه‌بر این

¹ Niranjana

² Stainless Steel

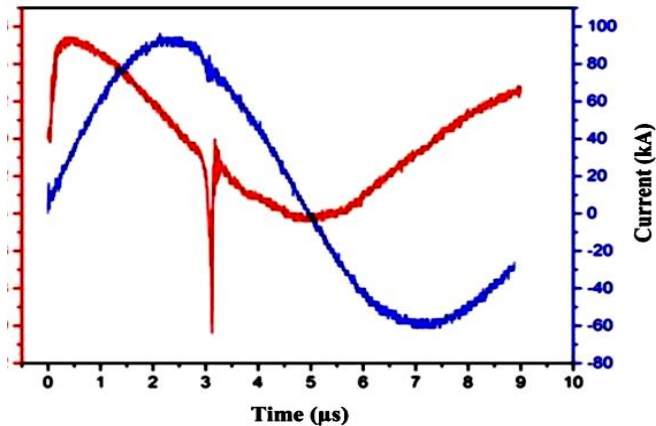
³ Scanning Electron Microscope (SEM)

⁴ Lee Code (Lee Model)

⁵ The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM)

$$\frac{dN}{dE} = CE^{-2.8} \quad (1)$$

که در آن N تعداد یون‌ها و C عددی ثابت است و مقدار آن از انتگرال‌گیری طرفین معادله ۱ به دست می‌آید.



شکل (۲): جریان تخلیه و مشتق جریان حاصل از پیچه روگوفسکی [۹].

از کد لی برای محاسبه مشخصات باریکه‌های یونی تولید شده و تعداد یون‌های ساطع شده از ستون پلاسما در هنگام تنگش استفاده شده است [۱۹]. پارامترهای استخراج شده از کد لی برای یون‌های هیدروژن در جدول ۱ آورده شده است. زمان پایداری تنگش با $30/7$ نانوثانیه می‌تواند به‌طور مستقیم بر میزان تخریب نمونه‌های مولیبدن و مس تابش‌دهی شده تأثیرگذار باشد. از این پارامترها در محاسبه جابه‌جایی بر اتم^۱ و محاسبه تراکم اتم‌های هیدروژن در مولیبدن و مس استفاده خواهد شد.

برای محاسبه کمی آسیب تابش و تخریب ایجاد شده از شبیه‌سازی کد SRIM استفاده شد.

۳. نتایج پژوهش

۳.۱. آنالیز SEM

نمونه‌های صیقل داده شده مولیبدن در اندازه 1×1 سانتی‌متر مربع با ضخامت ۱ میلی‌متر قبل از تابش آماده شد. نمونه‌های مولیبدن در فاصله ۶ سانتی‌متری از نوک آند توخالی

در دستگاه MTPF-2 (نوع مدر)، بعد از پیدا کردن فشار و ولتاژ بهینه، بیش از ۹۰٪ مواقع در تخلیه اول تا تخلیه هفتم تنگش‌های قوی تشکیل می‌شود، ولی برای اطمینان و حفظ کارایی دستگاه، فشار گاز بعد از حداکثر پنج تخلیه تا 10^{-3} میلی‌بار کاهش داده شد تا ناخالصی‌هایی که از سطح الکترودها و محفظه وارد گاز شده بود، تخلیه و سپس گاز جدید جایگزین شد.

سازوکار شتاب‌گیری یون‌ها در دستگاه پلاسما کانونی در اثر تخلیه بانک خازنی بر روی آند و ایجاد اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند شکل می‌گیرد. گاز داخل محفظه دستگاه پلاسما 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. 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 می‌دهد. تنگش تشکیل شده دارای چگالی بسیار بالا و دمای خیلی زیاد است. عمر تنگش بسیار کوتاه بوده و ناپایدار است. در اثر ناپایداری $m=0$ تنگش فروپاشی می‌کند و الکترون‌های به دام افتاده در فضای تنگش با انرژی‌های زیاد به سطح آند برخورد کرده و باعث تولید اشعه ایکس سخت می‌شوند. این برخورد باعث تجمع بخار ذرات در بالای سر آند می‌شود [۹، ۱۵، ۱۶].

پس از فروپاشی پلاسما یون‌ها نیز با انرژی‌های نسبتاً زیاد، در جهت مخالف الکترون‌ها گسیل می‌شوند. گستره انرژی باریکه‌های یون در دستگاه پلاسما کانونی که با انرژی ذخیره‌شده در محدوده چند کیلوژول تا چند مگاژول عمل می‌کنند در محدوده ده‌ها کیلوالکترون‌ولت اندازه‌گیری شد. یک پیچه روگوفسکی با شعاع ۱۴ سانتی‌متر، تعداد دور ۴۰ و ضریب کالیبراسیون $1/39 \times 10^{10}$ A/V برای ثبت جریان تخلیه و مشتق جریان تخلیه استفاده شد (شکل ۱). معادله ۱ طیف انرژی یون‌های هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی را نشان می‌دهد.

^۱ Displacement Per Atom (DPA)

نمونه‌ها با چشم غیرمسلح نیز قابل رؤیت بود. تصویر SEM از سطح نمونه مولیبدن و مس قبل از تابش دهی 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 تابش دهی 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.

و در راستای محور آن قرار داده شد. یون‌های پرنرژی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 برای تابش دهی سطوح مولیبدن و مس 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 [۱۹]. بعد از تابش دهی نمونه‌ها با گاز هیدروژن از براقی سطح نمونه‌ها کاسته شد. تغییرات ایجاد شده در سطح

جدول (۱): مشخصات باریکه یونی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی [۹].

پارامترهای یونی	واحد	باریکه یونی هیدرون	پارامترهای یونی	واحد	باریکه یونی هیدرون
جریان قله ^۱	kA	۹۵	شار انرژی ^۲	$\times 10^{12} \text{ W m}^{-2}$	۵.۶
جریان تنگش ^۳	kA	۴۵	مدت زمان تنگش ^۴	ns	۳۰.۷
حداکثر سرعت محوری ^۵	cm/ μ s	۳.۷	جریان یون ^۶	kA	۸.۲
حداکثر سرعت شوک ^۷	cm/ μ s	۱۴.۴	شار انرژی ^۸	$\times 10^{12} \text{ W m}^{-2}$	۵.۶
حداکثر سرعت شعاعی ^۹	cm/ μ s	۱۰.۲	جریان چگالی ^{۱۰}	$\times 10^8 \text{ A m}^{-2}$	۵.۴
انرژی پروتون ^{۱۱}	J	۳	سرعت در خروج تنگش ^{۱۲}	cm/ μ s	۱۸
شار پروتون پر انرژی ^{۱۳}	$\times 10^{11} \text{ W m}^{-2}$	۵.۶	انرژی داخلی پلاسما ^{۱۴}	% of E_0	۰.۳
ضریب تخریب شار پروتون پر انرژی ^{۱۵}	$\times 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{0.5}$	۹.۸	کار صرف شده بر پلاسما ^{۱۶}	J	۵۰
انرژی جریان پلاسما ^{۱۷}	J	۴۴	تعداد یون در هر تخلیه ^{۱۸}	$\times 10^{14}$	۷.۹
شار پروتون تولید شده در ستون تنگش ^{۱۹}	$\times 10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	۱.۷	جریان چگالی ^{۲۰}	$\times 10^8 \text{ A m}^{-2}$	۵.۴
جریان پروتون تولید شده در ستون تنگش ^{۲۱}	$\times 10^{19} \text{ m}^{-2}$	۵.۲	سرعت در خروج تنگش ^{۲۲}	cm/ μ s	۱۸
جریان انرژی ^{۲۳}	$\times 10^9 \text{ J m}^{-2}$	۱.۷			

1 I_{peak}2 E_n flux3 I_{pinch}

4 Pinch Duration

5 V_a (peak axial speed)

6 Ion Current

7 V_s (peak radial shock speed)8 E_n flux9 V_p (peak radial piston speed)

10 Current Density

11 FIB beam energy

12 P_s 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

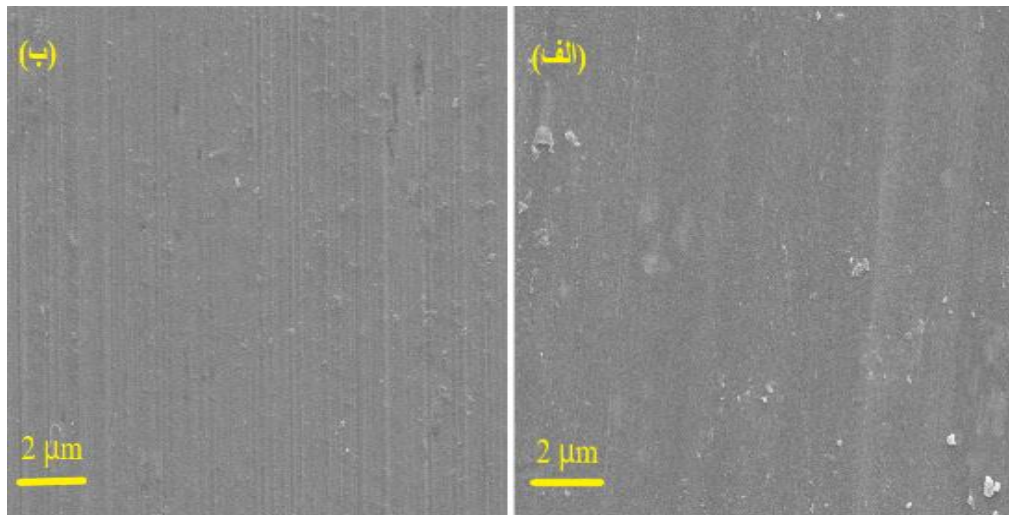
18 Number of ions per shot

19 J_b flux ions (ion beam generated by pinch column)

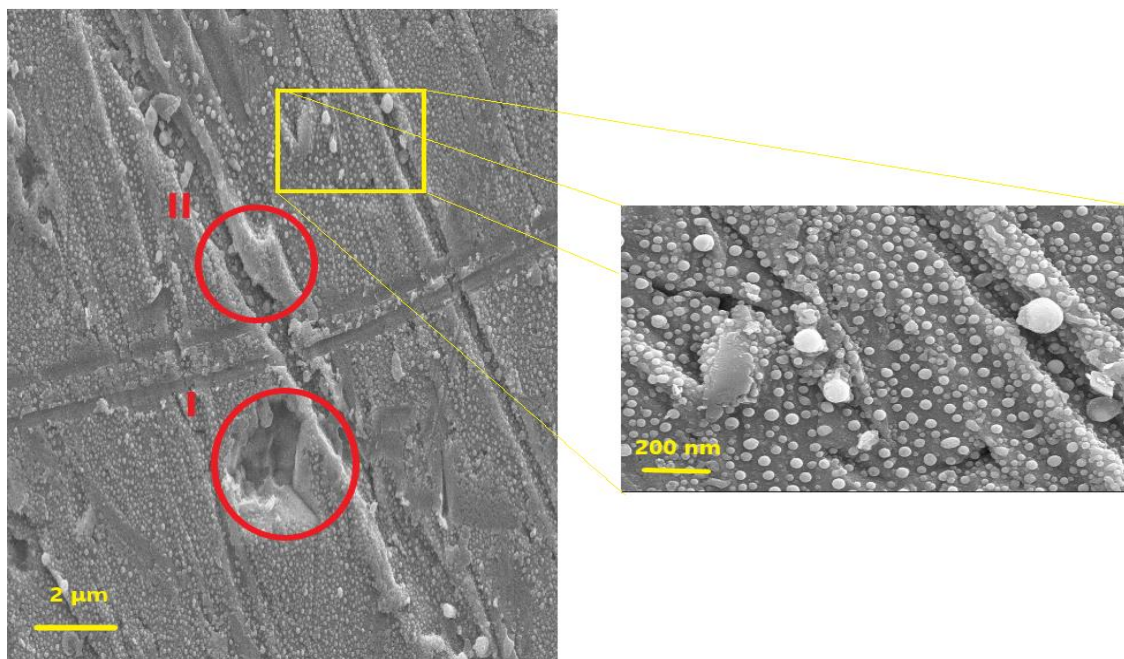
20 Current Density

21 Fluence ions (ion beam generated by pinch column)

22 P_s speed at pinch exit23 E_n fluence



شکل (۳): (الف) سطح نمونه مولیبدن، (ب) سطح نمونه مس قبل از پرتو دهی.

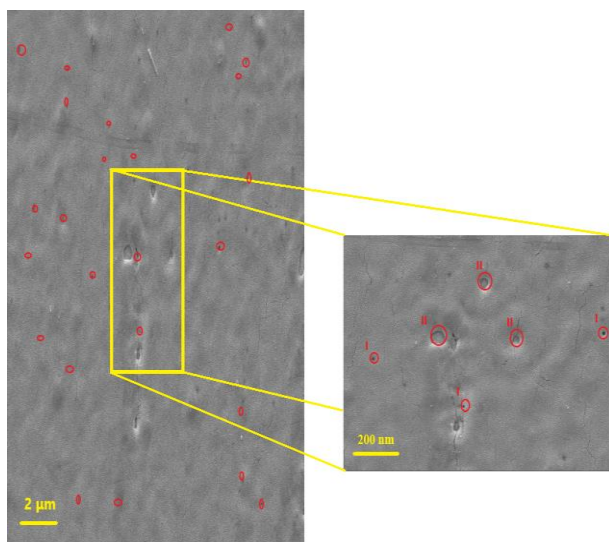


شکل (۴): سطح نمونه مس تابش داده شده.

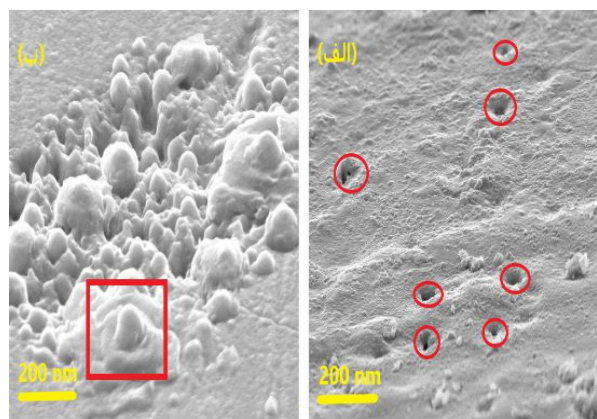
است. تشکیل حباب‌های بزرگ را می‌توان به کمک پدیده استوالد^۱ توضیح داد. این یک فرآیند ترمودینامیکی خودبه‌خودی است که در آن حباب‌های کوچک دور هم جمع می‌شوند و یک حباب با اندازه بزرگ‌تر تشکیل می‌دهند تا انرژی کل سطح به حداقل برسد [۲۰]. در شکل ۴ تاول‌های به هم پیوسته دیده می‌شود.

شکل ۴ سطح نمونه مس تابش داده شده با یون‌های هیدروژن را نشان می‌دهد. در سطح نمونه قسمت‌هایی که دچار کندوپاش (I) و ذوب‌شدگی شده است (II)، دیده می‌شود. در کل سطح نمونه نیز تاول‌های متراکم دیده می‌شود. اندازه قطر این تاول‌ها به چند ده نانومتر تا صد نانومتر می‌رسد. تاول‌های بزرگ از به هم پیوستن تاول‌های کوچک‌تر ایجاد شده

¹ Stovald



شکل (۵): سطح نمونه مولیبدن تابش داده شده با یون‌های هیدروژن.



شکل (۶): (الف) تصویر SEM گرفته شده با زاویه ۲۰ درجه از نمونه مولیبدن بعد از تابش، (ب) تصویر SEM گرفته شده با زاویه ۲۰ درجه از نمونه مس بعد از تابش.

از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای بررسی تأثیر برخورد یون‌ها و موج ضربه بر خواص ساختار بلوری مولیبدن و مس استفاده شد. شکل ۷ نتایج آنالیز نمونه‌های مرجع و پرتودیده مس را نشان می‌دهد. در طیف پراش اشعه ایکس قله مربوط به صفحات (۱ ۱ ۱)، (۲ ۰ ۰)، (۲ ۲ ۰)، (۳ ۱ ۱) و (۲ ۲ ۲) دیده می‌شود که نشان می‌دهد ساختار بلوری مس به صورت پیکربندی^۲ (FCC) است.

شکل ۵ سطح نمونه مولیبدن را نشان می‌دهد که اثری از تاول در سطح مولیبدن دیده نمی‌شود. در سطح مولیبدن تابش داده شده ترک‌های باریک در طول چند صد نانومتر دیده می‌شود. تورم‌های سطحی نیز روی نمونه مولیبدن دیده می‌شود. این تورم‌ها در کل سطح وجود دارند. حفره‌هایی نیز در سطح مولیبدن دیده می‌شود. در اطراف این حفره‌ها تورم‌های سطح وجود دارد. اندازه قطر حفره‌ها در حدود چند نانومتر (I) تا چند ده نانومتر (II) است.

به دلیل کشش جانبی یک پارچه‌ای که شوک حرارتی ناشی از جریان سریع پلاسما روی سطح اعمال کرده و فرو می‌نشیند، ترک‌هایی بر سطح نمونه‌ها شکل می‌گیرد. چرخه‌های گرمایش-سرمایش باعث تضعیف پیوندها بین دانه‌ها شده و ترک‌های بین دانه‌ها نه تنها روی سطح بلکه در حجم نیز ایجاد می‌شوند.

برای درک بهتر فرایند ترک خوردگی، پینتسوک^۱ و همکاران خصوصیات شوک حرارتی تنگستن را با استفاده از پرتو الکترونی مطالعه کرده‌اند [۱۵]. آن‌ها توضیح دادند که دما و مدت زمان پالس بالاتر شرایطی را فراهم می‌کند تا نیروی کشش سطح بتواند برای مدت طولانی برای فائق آمدن بر آسیب‌های ناشی از تغییرپذیری شکل به طور مناسبی عمل کند. در نتیجه در سطح مولیبدن با وجود انباشت کشش سطحی، ساختاری تپه‌ای را ایجاد می‌کند. با توجه به این مفهوم مطابق شکل ۵ آرایش ساختارهای تپه‌ای قابل توجیه است.

همان‌طور که در شکل ۶-ب در داخل مستطیل قرمز دیده می‌شود در سطح نمونه مس تابش داده شده ذرات مس روی سطح مس ذوب شده و حالت پاشیدگی در سطح نمونه را دارند. در اثر تابش پروتون‌های پراثری سطح مس به دمای جوش رسیده است.

^۲ Face-Centered-Cubic configuration

^۱ Pintsuk

شده، شکل ۸-ب کاملاً مشهود است.

اندازه دانه‌های بلور با استفاده از معادله دبای - شرر و ویلیامسون - هال محاسبه شد. معادله ۲ که به رابطه شرر^۸ معروف است میانگین اندازه بلورکها^۹ را به دست می‌دهد [۱۶].

$$L_a = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2)$$

در رابطه فوق L_a میانگین اندازه بلورک‌های فلز، k ضریب شکل بلور که $k=0.94$ ، λ طول موج پرتو ایکس (برابر $1/0.054059$ آنگسترم)، θ زاویه براگ، $\beta_{2\theta}$ پهنای عرض پالس در میانه قله (برحسب رادیان) است. معادله ویلیامسون - هال به صورت زیر داده شده است [۹، ۲۱].

$$\beta \cos \theta = 4\sigma \sin \theta + \frac{0.94\lambda}{L_c} \quad (3)$$

در رابطه فوق β کل پهنای در نصف بیشینه (FWHM) قله براگ، σ پارامتر کشش، λ طول موج پراش سنج ($1/0.054059$ آنگستروم) است. L_c (اندازه بلورک‌ها) و σ را می‌توان با استفاده از شیب منحنی و درونیابی منحنی $\beta \cos \theta$ نسبت به $4\sigma \sin \theta$ به دست آورد. مقدار منفی کشش در نمونه‌های تابش داده شده مولیبدن و مس نشان‌دهنده‌ی تنش کششی^{۱۰} است که ناشی از گسل انباشت است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که در نمونه‌های پرتودیده مس، ارتفاع قله‌ها کاهش یافته و زوایای براگ نیز به سمت زوایای بزرگ‌تر جابه‌جا شده‌اند. در نتیجه فاصله‌ی صفحات نیز کاهش یافته است. بزرگنمایی که در شکل ۷-ب صورت گرفته است این مطلب را تأیید می‌کند. جدول ۲، مقادیر دقیق این آنالیز را نشان می‌دهد.

اطلاعات مربوط به قله‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌ای که با ۲۰ تخلیه هیدروژن مورد تابش قرار گرفته است. مکان قله صفحه (۲۰۰) که بیش‌ترین شدت را دارد تقریباً به اندازه 0.32 درجه به سمت زوایای بزرگ‌تر جابه‌جا شده است. در نمونه تابش داده شده جابه‌جایی مکان قله‌ها نسبت به مکان آن‌ها در طیف نمونه مرجع، به دلیل فشار^۱ ایجاد شده در نمونه‌ها و انتقال گرمای بسیار زیاد در زمان تابش به نمونه‌ها است. فشار ایجاد شده دلایل زیادی دارد. از جمله این دلایل: ذوب‌شدگی محلی، نابجایی‌ها^۲، تنش درونی^۳، انباشت شکستگی‌ها^۴، نقص‌های نقطه‌ای^۵ و میکروتنش‌ها^۶ است.

شکل ۸ طیف پراش اشعه ایکس نمونه مولیبدن قبل از تابش و بعد از تابش را نشان می‌دهد. جابه‌جایی مکان قله‌ها به سمت زوایای بزرگ‌تر در نمونه‌ی تابش داده شده نسبت به نمونه‌ی خام بسیار کمتر است. همچنین FWHM^۷ نمونه‌ی مولیبدن تابش داده شده نسبت به نمونه‌ی مس تابش داده شده تغییرات کمتری داشته است. این مطلب در حالت بزرگنمایی

¹ Stress/Strain

² Dislocations

³ Internal Stresses

⁴ Stacking faults

⁵ Point defects

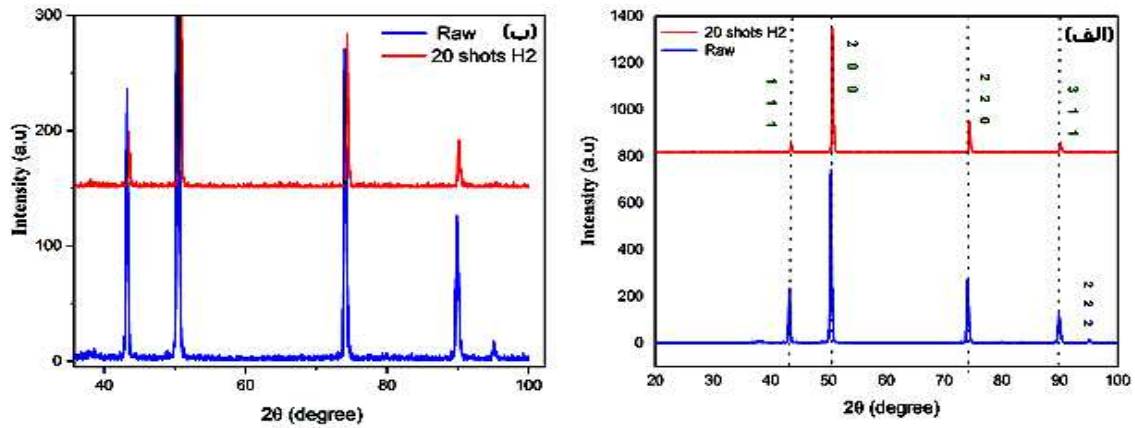
⁶ Micro-stresses

⁷ Full Width at Half Maximum, FWHM

⁸ Scherrer's formula

⁹ Grain

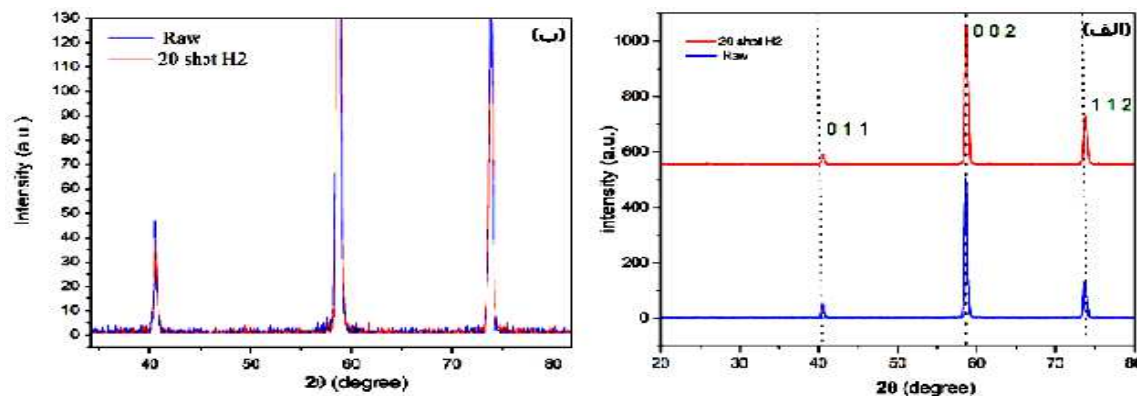
¹⁰ Compressive Strain



شکل (۷): طیف پراش اشعه ایکس نمونه مس قبل از تابش (خام) و بعد از تابش.

جدول (۲): پارامترهای طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های مس.

شماره صفحه	$2\theta^\circ$		شدت (سختی) (a.u.)		فاصله d - (انگستروم)	
	قبل از تابش	۲۰ تخلیه H ₂	قبل از تابش	۲۰ تخلیه H ₂	قبل از تابش	۲۰ تخلیه H ₂
۱۱۱	۴۳/۲۱۲	۴۳/۵۳۱	۲۲۵/۱۳	۳۶۷۴	۲/۰۹۳	۲/۰۷۰
۲۰۰	۵۰/۳۸۸	۵۰/۵۶۲	۷۱۵/۱۷	۴۹۶۷۳	۱/۸۱۱	۱/۸۰۳
۲۲۰	۷۳/۹۶۰	۷۴/۳۴۰	۲۵۲/۲۷	۱۲۷/۴۳	۱/۲۸۱	۱/۲۷۴
۳۱۱	۸۹/۸۷۰	۹۰/۱۰۴	۱۲۰/۸۲	۲۸۷۹۳	۱/۰۹۱	۱/۰۸۸
۲۲۲	۹۵/۱۴۱	-	۱۰/۰۳	-	۱/۰۴۴	-



شکل (۸): طیف پراش اشعه ایکس نمونه مولیبدن قبل از تابش (خام) و بعد از تابش.

جدول (۳): پارامترهای پراش اشعه ایکس نمونه خام و تابش داده شده مولیبدن.

شماره صفحه	$2\theta^\circ$		شدت (سختی) (a.u.)		فاصله d - (انگستروم)	
	قبل از تابش	۲۰ تخلیه H ₂	قبل از تابش	۲۰ تخلیه H ₂	قبل از تابش	۲۰ تخلیه H ₂
۰۱۱	۴۰/۵۳۶	۴۰/۵۹۶	۴۳/۸۴	۳۰/۲۸	۲/۲۲۵	۲/۲۲۲
۰۰۲	۵۸/۶۰۸	۵۸/۶۴۹	۴۴۱/۳۹	۴۶۵/۱۸	۱/۵۷۵	۱/۵۷۴
۱۱۲	۷۳/۷۲۹	۷۳/۷۴۲	۱۲۱/۰۳	۱۶۷/۸۱	۱/۲۸۵	۱/۲۸۴

جدول (۴): خلاصه‌ی تجزیه و تحلیل طیف پراش اشعه ایکس از ساختار میکروسکوپی مولیبدن و مس تابش داده شده و قبل از تابش.

نمونه	ابعاد بلوری		کشش ویلیامسون - هال (%)	حجم سلول (10 ^۶ pm ^۳)	فاصله اتمی (انگستروم)
	شعر	ویلیامسون - هال (WH)			
مس (قبل از تابش)	۲۸۰	۱۰/۳۶	۳۴,۴ × ۱۰ ^{-۴}	۴۸/۶۳	۳/۶۵۰
مس (تابش داده شده)	۳۷/۲	۱۵/۵۰	-۲۲ × ۱۰ ^{-۴}	۴۷/۲۰	۳/۶۱۴
مولیبدن (قبل از تابش)	۳۳/۱	۱۳/۲۰	۲۵ × ۱۰ ^{-۴}	۳۱/۰۲	۳/۱۴۲
مولیبدن (تابش داده شده)	۴۱/۴	۲۵/۹۰	[۱۵]-۱۱ × ۱۰ ^{-۴}	۳۰/۸۴	۳/۱۳۶

¹ Intensity

۲.۳. نتایج کد SRIM

برای محاسبه کمی آسیب تابش و تخریب ایجاد شده در اثر بمباران سطح مولیبدن و مس با یون‌های هیدروژن از کد SRIM استفاده شد [۲۱]. برد ذرات هیدروژن در مولیبدن و مس و جابه‌جایی ایجاد شده در ماده به صورت تابعی از عمق و جابه‌جایی بر اتم (DPA) ناشی از تابش یون‌های هیدروژن بر مولیبدن و مس برآورد شد.

برای محاسبه اثرات تخریبی از گزینه محاسبه سریع^۱ استفاده شد. با استفاده از این پارامتر در معادله ۴، میزان تخریب محاسبه می‌شود [۱۰].

$$\text{Damage Rate} = \left(\text{Flux} \left[\frac{\text{ion}}{\text{shot} - (A^0)^2} \right] \right) \times \text{Displacement} \left[\frac{1}{\text{ion} - (A^0)} \right] \times \left(\frac{1}{\text{Atomic Density} \left[\frac{\text{atoms}}{(A^0)^3} \right]} \right) \left[\frac{\text{DPA}}{\text{shot}} \right] \quad (4)$$

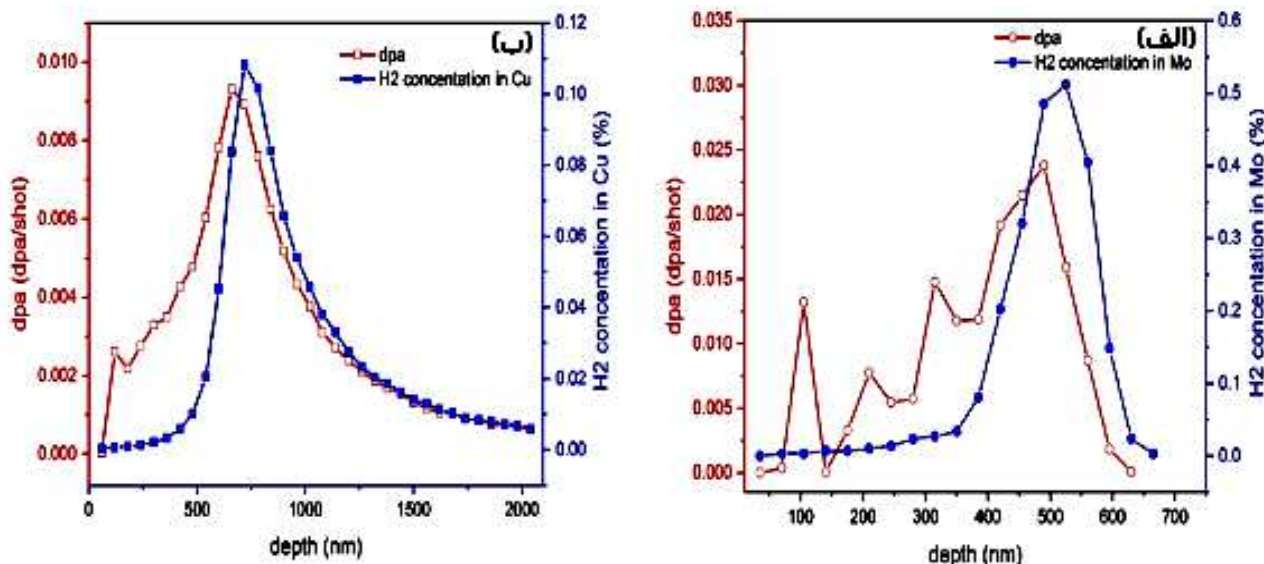
برای شبیه‌سازی با کد SRIM [۲۲] طیف یونی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از C⁺⁺ تولید شد و به صورت فایل ورودی TRIM.DAT به کد SRIM داده شد. توزیع طیف انرژی یون‌های تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی به صورت معادله ۱ در نظر گرفته شد.

با حل معادله ۴ تعداد یون‌ها را در بازه‌های انرژی به دست آوردیم. انرژی یون‌های هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی در حدود ۱۲۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۱ مگا الکترون‌ولت می‌باشد.

نتایج کد SRIM در شکل ۹ نشان می‌دهد که بیش‌ترین تخریب ایجاد شده در مولیبدن ناشی از یون‌های هیدروژن در عمق ۵۰۰ نانومتری و به اندازه ۰/۰۲۴ dpa/shot است. بیش‌ترین تراکم یون‌های هیدروژن نیز در عمق ۵۵۰ نانومتری و به میزان ۰/۵ درصد است. بیش‌ترین تخریب ناشی از یون‌های هیدروژن در مس در عمق ۵۸۰ نانومتری و به میزان ۰/۰۰۹ dpa/shot است. بیش‌ترین تراکم یون‌های هیدروژن در مس در عمق ۷۵۰ نانومتری و به میزان ۰/۱۱ درصد می‌باشد.

تفاوت بارزی که در نتایج شبیه‌سازی اثرات تخریبی یون‌های هیدروژن در مس و مولیبدن دیده می‌شود، جابه‌جایی مکان بیشینه تخریب و مکان بیشینه تراکم یون‌های هیدروژن در مس می‌باشد. علت این موضوع ناشی از این است که ضریب نفوذ هیدروژن در داخل مس نسبت به مولیبدن بیشتر است. از طرفی به دلیل عدد اتمی بالای مولیبدن نسبت به مس بیشینه آهنگ تخریب یون‌های هیدروژن در مولیبدن بیش‌تر از مس است [۲۳].

^۱ - Quike calculation



شکل (۹): پروفایل عمقی تخریب ناشی از تابش یون‌های هیدروژن و پروفایل عمقی تراکم یون‌های هیدروژن در (الف) مولیبدن و (ب) مس.

۴. نتیجه‌گیری

می‌دهد که تابش یون‌های هیدروژن باعث به‌وجود آمدن تنش فشاری به نمونه‌های مولیبدن و مس می‌شود. از کد لی به‌منظور مشخصه‌یابی باریکه یونی دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شد. نتایج کد لی نشان می‌دهد که در هر تخلیه تعداد $7/9 \times 10^{14}$ یون از ستون پلاسمای ساطع می‌شود. از کد SRIM برای محاسبه تخریب ایجاد شده در مولیبدن و مس و بررسی تراکم هیدروژن در عمق‌های مختلف مولیبدن و مس استفاده شد. براساس نتایج کد SRIM بیشینه مقدار DPA برای نمونه‌های مولیبدن و مس تابش داده شده با یون‌های هیدروژن در عمق‌های ۵۰۰ و ۵۸۰ نانومتر به‌ترتیب برابر با ۰/۰۲۴ و ۰/۰۰۹ برآورد شد. بیشینه تراکم یون‌های هیدروژن در نمونه تابش داده شده مولیبدن و مس در عمق‌های ۵۵۰، ۷۵۰ نانومتر به‌ترتیب ۰/۵ و ۰/۱۱ درصد می‌باشد.

در این مقاله اثرات تابش یون‌های پرنرژی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول بر روی نمونه‌های مولیبدن و مس مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق از آنالیزهای XRD، SEM برای بررسی اثرات سطحی و اثرات ساختاری یون‌های هیدروژن بر روی نمونه‌های مس و مولیبدن استفاده شد. بررسی تصاویر SEM نشان می‌دهد تغییرات سطحی ایجاد شده در سطح نمونه‌های مس و مولیبدن در اثر تابش یون‌های هیدروژن با هم متفاوت‌اند. به‌گونه‌ای که در اثر تابش یون‌های پرنرژی بر سطح مس تاول‌های متراکم و ناحیه‌هایی که دچار ذوب‌شدگی و کندوپاش فیزیکی شده دیده می‌شود. در مورد نمونه‌ی مولیبدن تابش داده شده با یون‌های پرنرژی هیدروژن در سطح مولیبدن ناهمواری‌ها و هم‌چنین ترک‌های باریک به‌همراه حفره‌هایی با قطر چند ده نانومتر در سطح ایجاد شده است. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نشان

۵. مراجع

- [1] J. Brooks, L. El-Guebaly, A. Hassanein and T.J. Sizyuk. Plasma-facing material alternatives to tungsten, *Nuclear Fusion*, 55(2015) 043002 (7pp).
- [2] M.M. Seyedhabashi, B. shirani bidabadi, M. Amirhamzeh Tafreshi, F. Seddighi and A. Nasiri. Damage studies on irradiated tungsten by helium and argon ions in a plasma focus device, *IJRSM*, 8(2020) 1-12.
- [3] S. Javadi, B. Ouyang, Z. Zhang, M. Ghoranneviss, A.S. Elahi and R.S. Rawat. Effects of fusion relevant transient energetic radiation, plasma and thermal load on PLANSEE double forged tungsten samples in a low-energy plasma focus device, *Applied Surface Science*, 443 (2018) 311-320.
- [4] D. Nishijima, M. Ye, N. Ohno and S. Takamura. Formation of Nanostructured Tungsten with Arborescent Shape due to Helium Plasma Irradiation, *Journal of Nuclear Materials*, 97 (2003) 313-316.
- [5] V. Barabash, The ITER International Team, A. Peacock, S. Fabritsiev, G. Kalinin, S. Zinkle, A. Rowcliffe, J.W. Rensman, A.A. Tavassoli, P.Marmy, P.J. Karditsas, F. Gillemot and M.Akiba. Materials challenges for ITER-Current status and future activities, *Journal of Nuclear Materials*, 367 (2007) 21-32.
- [6] X. Yang and A. Hassanein. Molecular dynamics simulation of deuterium trapping and bubble formation in tungsten, *Journal of Nuclear Materials*, 434 (2013) 1-6.
- [7] Q. Xu, T. Yoshiie and H. Huang. Nuclear Instruments and Methods in physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Molecular dynamics simulation of vacancy diffusion in tungsten induced by irradiation, 206 (2003) 123-126.
- [8] N.-Y. Park, Y.C. Kim, H.K. Seok, S.H. Han and S. Cho. Nuclear Instruments and Methods in physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Molecular dynamics simulation of irradiation damage in tungsten, 265 (2007) 547-552.
- [9] G. Janeschitz and I. Jct. Plasma-Wall interaction issue in ITER *Journal of Nuclear Materials*, 290 (2001) 1-11.
- [10] M.M. Seyedhabashi, M. A. Tafreshi, S. Shafiei and A. Abdisaray. Damage study irradiation tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device, *Applied radiation and Isotopes*, 154 (2019) 108875.
- [11] F. Sedighi, A. Kouhi, D. Iraj and C. Rasouli. Damage study of 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*, 2 (2020) 035001.
- [12] M. Seyedhabashi, S. Shafiei, M. Tafreshi and B.S. Bidabadi. Study of surface damage and hydrogen distribution in irradiated tungsten by protons in plasma focus device, *Vacuum*, 175 (2020) 109249.
- [13] V. Gribkov, V.A. Gribkov, V.N. Pimenov, L.I. Ivanov, E.V. Dyomina, S.A. Maslyaev, R. Miklaszewski, M. Scholz, U.E. Ugaste, A.V. Dubrovsky and V.C. Kulikauskas. Interaction of high temperature deuterium plasma streams and fast ion beams with stainless steels in dense plasma focus device, *Journal of Physics D:Applied Physics*, 36 (2003) 1817.
- [14] M.J. Inestrosa-Izurrieta, E. Ramos-Moore and L. Soto. Morphological and structural effects on tungsten targets produced by fusion plasma pulses from a table top plasma focus, *Nuclear Fusion*, 55 (2015) 093011.
- [15] V. Gribkov, V.A. Gribkov, V.N. Pimenov, L.I. Ivanov, E.V. Dyomina, S.A. Maslyaev, R. Miklaszewski, M. Scholz, U.E. Ugaste, A.V. Dubrovsky and V.C. Kulikauskas. Interaction of high temperature deuterium plasma streams and fast ion beams with stainless steels in dense plasma focus device, *Journal of Physics D:Applied Physics*, 36 (2003) 1817.
- [16] S.H. Saw, V. Damideh, J. Ali, R. S. Rawat and S. Lee. Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus, *Vacuum*, 144 (2017) 14-20.
- [17] R. Niranjana, R.K. Rout, R. Srivastava, Y. Chakravarthy, P. Mishra, T.C. Kaushik and Satish 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.
- [18] S.M. Miremad and B.S. Bidabadi. Investigation the effect of anode's insert material on spatial distribution of X-ray source in plasma focus device, *Journal of Fusion Energy*. 33 (2014) 319-335.
- [19] M.M. Seyedhabashy, M.A. Tafreshi, S. Shafiei and A. Nasiri. Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device, *Nuclear Engineering and Technology*, 52 (2020) 827-834.
- [20] S. Saw, V. Damideh, O.H. Chin, J. Ali, P.C.K. Lee, R.S. Rawat and S. Lee. Comparative numerical study of the dynamics, ion beam and flow energetics of fast and slow focus modes in a 2 kJ plasma focus operated in various gases, *Vacuum*, 165 (2019) 337-342.
- [21] Q. Gong, T. Gao, T. Hu and G. Zhou. Synthesis and Electrochemical Energy Storage Applications of Micro/Nanostructured Spherical Materials, *Nanomaterials*, 9 (2019) 1207.
- [22] R.E. Stoller, M.B. Toloczko, G.S. Was, A.G. Certain, S. Dwaraknath and F.A. Garner. On the use of SRIM for computing radiation damage exposure, *Nuclear instruments and methods in physics research section B: beam interactions with materials and atoms*, 310 (2013) 75-80.
- [23] E.A. Uehling. Penetration of Heavy Charged Particles in Matter, *Annual review of nuclear science*, 4 (1954) 315-350.