

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

مطالعه آسیب تابش یون‌های پراثری تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر مورفولوژی سطحی تنگستن

مقاله پژوهشی

میرمحمد رضا سید حبشی^{*}، احسان اله نوری، علیرضا اصل زعیم^۱

۱- پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

* m.seyedhabashy@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶	در این پژوهش، اثرات تابش یون‌های پراثری هلیوم و آرگون تولید شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی Mather، به‌صورت جداگانه و هم‌زمان، بر روی مورفولوژی سطحی و ساختار بلوری تنگستن مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، نمونه‌های تنگستن با ابعاد ۱۰×۱۰×۱ میلی‌متر به مدت ۲۰ تخلیه الکتریکی تحت تابش یون‌های هلیوم، آرگون و مخلوط هلیوم و آرگون با نسبت برابر قرار گرفتند. نتایج آنالیز SEM نشان داد که تابش یون‌های هلیوم موجب تشکیل تاول‌های سطحی به هم پیوسته در مقیاس نانو، با اندازه‌هایی در حدود ۱۰۰ نانومتر و بزرگ‌تر و ایجاد تنش فشاری در ساختار تنگستن شد. از سوی دیگر، تابش یون‌های آرگون باعث ایجاد ترک‌های سطحی متراکم با عمق ۷۰۰ نانومتر و تنش کششی در ساختار تنگستن گردید. در تابش هم‌زمان یون‌های هلیوم و آرگون، ترکیبی از ترک‌های عمیق و تاول‌های سطحی به وجود آمد که نشان‌دهنده اثرات هم‌افزایی این دو نوع تابش بود. علاوه بر این، نتایج XRD نشان داد که تابش یون‌های هلیوم باعث جابجایی قله‌ها به سمت زوایای بزرگ‌تر و کاهش شدت آن‌ها می‌شود، در حالی که تابش یون‌های آرگون باعث جابجایی قله‌ها به سمت زوایای کوچک‌تر و کاهش فاصله صفحات بلوری تنگستن شد. این پژوهش با بررسی اثرات ترکیبی تابش‌های یون‌های مختلف، نوآوری جدیدی را در درک رفتار تنگستن در شرایط مشابه با راکتورهای همجوشی هسته‌ای فراهم می‌آورد. این نتایج می‌توانند بهبود پیش‌بینی فرسایش و عملکرد مواد مواجهه‌شونده با پلازما در این نوع راکتورها کمک کنند.

Radiation Damage of High-Energy Ions Produced By Plasma Focus Device on Surface Morphology of Tungsten

Mir Mohammadreza Seyed Habashi^{*}, Ehsan Noori, Alireza Aslezaeem¹

1- Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), Tehran, Iran.

* m.seyedhabashy@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Doi: 10.71753/ma.2025.1187354

Keywords:

Tungsten

Plasma Focus Device

High-Energy Ions

Surface Morphology

Crystalline Structure

Simultaneous Irradiation.

Abstract

This study investigates the effects of high-energy helium and argon ion irradiation produced by a Mather-type plasma focus device, both separately and simultaneously, on the surface morphology and crystalline structure of tungsten. Tungsten samples with dimensions 10×10×1 mm were irradiated with 20 shots of helium, argon, and a helium-argon mixture with equal ratios. SEM analysis revealed that helium ion irradiation resulted in the formation of interconnected surface blisters in the nanometer scale, with sizes ranging from 100 nm and larger, inducing compressive stress in the tungsten structure. On the other hand, argon ion irradiation caused the formation of dense surface cracks with a depth of 700 nm and tensile stress in the tungsten structure. Simultaneous irradiation of helium and argon ions led to a combination of deep cracks and surface blisters, indicating the synergistic effects of these two irradiations. Furthermore, XRD results showed that helium ion irradiation caused a shift of peaks to larger angles and a decrease in peak intensity, while argon ion irradiation led to a shift of peaks to smaller angles and a decrease in interplanar spacing in the tungsten crystal structure. This study offers new insights into the synergistic effects of simultaneous ion irradiations, providing an innovative approach to understanding tungsten behavior under fusion-relevant conditions. These findings can aid in improving predictions of erosion and the performance of plasma-facing materials in fusion reactors.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mir Mohammadreza Seyed Habashi, Ehsan Noori, Alireza Aslezaeem, Radiation Damage of High-Energy Ions Produced By Plasma Focus Device on Surface Morphology of Tungsten, New Process in Material Engineering, 2025, 19(2), 50-59.

۱- مقدمه

با توجه به شدت بالای تابش ذرات پرنرژی و تشعشعات نوترونی حاصل از واکنش همجوشی هسته‌ای، تحلیل تخریب ناشی از تابش‌های اتمی و هسته‌ای در مواد مواجهه شونده با پلازما (PFM)^۱ در راکتورهای همجوشی هسته‌ای از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به‌طور کلی، با توجه به اینکه مواد مواجهه شونده با پلازما مسئول جذب انرژی آزاد شده در طی واکنش‌های گداخت و همچنین حذف گرمای اضافی از راکتورهای گداخت هستند، باید قادر به تحمل شرایط شدت بالای تشعشع و تابش با کمترین تخریب باشند تا از عملکرد ایمن و کارآمد راکتور همجوشی اطمینان حاصل شود [۱]. به‌طور کلی، تنگستن و ترکیبات آن مانند اکسید تنگستن دارای کاربردهای بسیار متنوعی از جمله استفاده به‌عنوان الکتروکاتالیست، فوتوکاتالیست، تولید سنسورهای گازی و همچنین استفاده در صنایع فولاد دارند [۲-۳]. علاوه بر کاربردهای ذکر شده، تنگستن دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که برای استفاده جهت برهمکنش با پلازما در راکتورهای گداخت هسته‌ای بسیار مناسب می‌باشد از جمله این ویژگی‌ها داشتن نقطه ذوب بالا در حدود ۳۴۲۲ درجه سانتی‌گراد و همچنین پایداری و استحکام حرارتی قابل قبول در دماهای بالا می‌باشند که برای حفظ ساختار راکتور همجوشی ضروری است [۱-۳]. علاوه بر آن، تنگستن بازده کندوپاش پایینی دارد، به این معنی که اتم‌ها به راحتی از سطح آن در هنگام بمباران شدن توسط ذرات با انرژی بالا در محیط پلاسمای همجوشی کنده نمی‌شوند. این خاصیت برای کاهش آلودگی پلازما یا همان گاز یونیزه با دمای بالا که سوخت واکنش‌های همجوشی است بسیار ضروری است [۴-۵]. به‌طور کلی، موادی مانند تنگستن که پوشش داخلی راکتور همجوشی هسته‌ای را تشکیل می‌دهند در معرض بمباران شدید یون‌ها قرار دارند [۶-۷]. این اندرکنش می‌تواند منجر به

فرسایش مواد از طریق فرآیندهایی مانند کندوپاش فیزیکی و تاول زدن شود. درک اینکه چگونه یون‌های مختلف با تنگستن اندرکنش دارند، به پیش‌بینی نرخ‌های فرسایش و در نتیجه طول عمر این اجزا کمک می‌کند. زمانی که یون‌های پرنرژی با سطح تنگستن برخورد می‌کنند، ممکن است اتم‌های تنگستن را از سطح تنگستن به بیرون از ساختار شبکه پرتاب کنند و در نهایت وارد این اتم‌ها کنده شده از سطح وارد پلازما می‌شوند. حضور اتم‌های فلزات سنگین در پلازما می‌تواند به‌طور قابل توجهی آن را خنک کند، فرآیند اتلاف انرژی از طریق تابش به این صورت است که الکترون‌ها و یون‌های موجود در محیط پلازما در نزدیکی این اتم‌ها سنگین از خود تابش ترمزی گسیل می‌کنند که با افزایش ناخالصی در پلازما به میزان تابش ترمزی افزوده شده و باعث فرار انرژی از طریق تابش الکترومغناطیس از داخل پلازما می‌شود [۸]. دستگاه پلاسمای کانونی^۲ یک دستگاه پالسی است که می‌تواند در جهت انجام تحقیقات آزمایشگاهی گداخت هسته‌ای، برای یونیزه کردن یک گاز کم‌فشار، پلاسمای با چگالی و انرژی بالا تولید کند. پلاسمای تولید شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی می‌تواند برای تابش مواد مختلف، از جمله PFM، به منظور ایجاد شبیه‌سازی شرایط تجربی یک راکتور گداخت هسته‌ای، مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین، با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی محققان می‌توانند اثرات تشعشعات پلازما بر PFM‌ها مانند فرسایش، اصلاح سطح و آسیب تشعشع را مانند آنچه که در راکتورهای همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی اتفاق می‌افتد، بررسی کنند [۸].

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی در رابطه با مطالعه آسیب تابش‌های اتمی در تنگستن با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی انجام شده است. در پژوهشی آسیب وارد شده به تنگستن ناشی از تابش یون‌های دوتریوم تولید شده در دستگاه پلازما کانونی با انرژی ۲/۲ کیلوژول بررسی شد [۹]. در تحقیقی دیگر جوادی و همکارانش نمونه‌های تنگستن را با یون‌های دوتریوم مورد تابش

مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱-۲۲]. سایر مشخصات این دستگاه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی MTPF

پارامتر	مقدار
ظرفیت خازنی	۱۳/۵ μF
ولتاژ کاری عملیاتی	۱۶-۱۲ kV
محدوده انرژی دستگاه	۱-۱/۷ kJ
جریان تخلیه	۱۵۰-۱۱۰ kA
اندوکتانس مداری	۱۵۲ nH
طول آند	۱۴/۵ cm
شعاع آند	۱/۴۵ cm
شعاع کاتد	۳/۹۵ cm
دوره زمانی تخلیه	۹ μs

تعداد ۱۲ عدد کاتد به صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته-اند. در نوک آند یک حفره به شعاع ۱۰ mm و عمق ۱۰ mm به منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است. ابتدا برای دستیابی به محدوده‌ی مناسب فشار گاز، در فشارهای مختلف گاز هلیوم، آرگون و هم‌زمان هلیوم و آرگون و در 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 و ولتاژ ۱۲ kV می‌باشد و در مورد گاز آرگون فشار مناسب ۰/۴ mbar و ولتاژ ۱۲ kV و برای مخلوط هلیوم و آرگون فشار ۰/۶ و ولتاژ ۱۲ kV تعیین شد. از پیچ‌های روگوفسکی برای ثبت سیگنال مشتق جریان استفاده شد. نمونه‌ای از سیگنال‌های جریان و مشتق جریان دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

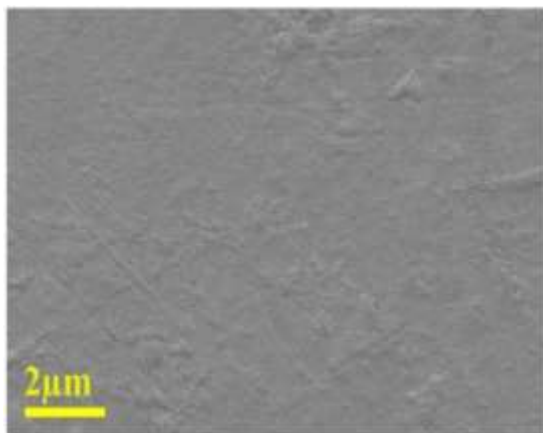
قرار دادند و نشان دادند که تغییرات ساختاری و فازی در ساختار تنگستن ایجاد می‌شود. آن‌ها همچنین تشکیل نقص‌های ناشی از تابش را نیز مشاهده کردند [۱۰]. در پژوهشی دیگر، نمونه‌های تنگستن با یون‌های هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی مورد تابش قرار داده شده‌اند. نتایج نشان داد که تابش پروتون‌ها منجر به توسعه استرس‌های فشاری در نمونه‌ها و تشکیل فازهای جدید در نمونه‌های تابش‌دهی شده است [۱۱]. یکی از چالش‌های اساسی در بررسی مواد مواجه با پلاسمای مطالعه تأثیر تابش یون‌های پرانرژی بر مورفولوژی و ساختار بلوری این مواد است. تاکنون، پژوهش‌های متعددی به بررسی اثرات تابش یون‌های هلیوم و آرگون به صورت جداگانه بر روی تنگستن پرداخته‌اند [۱۲]، در این پژوهش، علاوه بر بررسی تأثیر تابش جداگانه این یون‌ها، برای نخستین بار اثر تابش هم‌زمان یون‌های هلیوم و آرگون بر سطح تنگستن مورد مطالعه قرار گرفته است. این نوآوری، درک عمیق‌تری از اثرات هم‌افزایی دو یون مختلف بر ساختار و تنش‌های ایجاد شده در تنگستن فراهم می‌آورد. دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان تنها دستگاه آزمایشگاهی قادر به شتاب‌دهی هم‌زمان یون‌های مختلف، فرصت منحصربه‌فردی برای مطالعه اثرات ترکیبی تابش یون‌ها فراهم می‌کند. این ویژگی باعث شده تا بتوان شرایط مشابه با راکتورهای همجوشی هسته‌ای را شبیه‌سازی کرد و به بررسی جامع‌تر مواد مواجه با پلاسمای پرداخت. نوآوری این پژوهش در بهره‌گیری از این توانایی منحصربه‌فرد برای مطالعه اثرات تابش هم‌زمان دو نوع یون مختلف در شرایط آزمایشگاهی است که پیش‌تر کمتر به آن پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها تحقیق

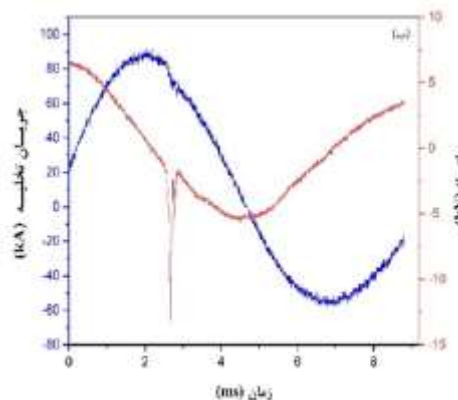
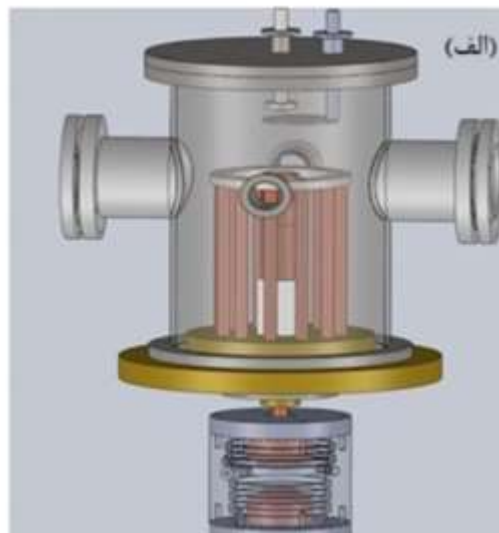
۲-۱- چیدمان آزمایشگاهی

دستگاه پلاسمای کانونی MTPF از نوع مدر^۳ (حداکثر انرژی ۱/۷ kJ) با خازنی به ظرفیت ۱۳/۵ μF ، حداکثر ولتاژ کاری ۱۶ kV، اندوکتانس ۱۵۲ nH و حداکثر جریان تخلیه ۱۵۰ kA به عنوان منبع تولید یون‌های پرانرژی برای پرتودهی نمونه‌ها

همان گونه که از میکروگراف شکل (۲) مشخص است، نمونه تنگستن پیش از تابش دهی دارای سطحی صاف می‌باشد. نمونه‌های تنگستن در فاصله ۶ سانتیمتری از سر آند و در ۲۰ تخلیه تحت تابش یون‌های هلیوم، آرگون و هم‌زمان هلیوم و آرگون به صورت جداگانه قرار گرفتند. نمونه‌های تنگستن در فاصله ۶ سانتیمتری از سر آند برای انجام ۲۰ تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی تحت تابش یون‌های هلیوم، آرگون و هم‌زمان هلیوم و آرگون به صورت جداگانه قرار گرفتند.



شکل (۲): تصویر SEM نمونه تنگستن قبل از تابش دهی



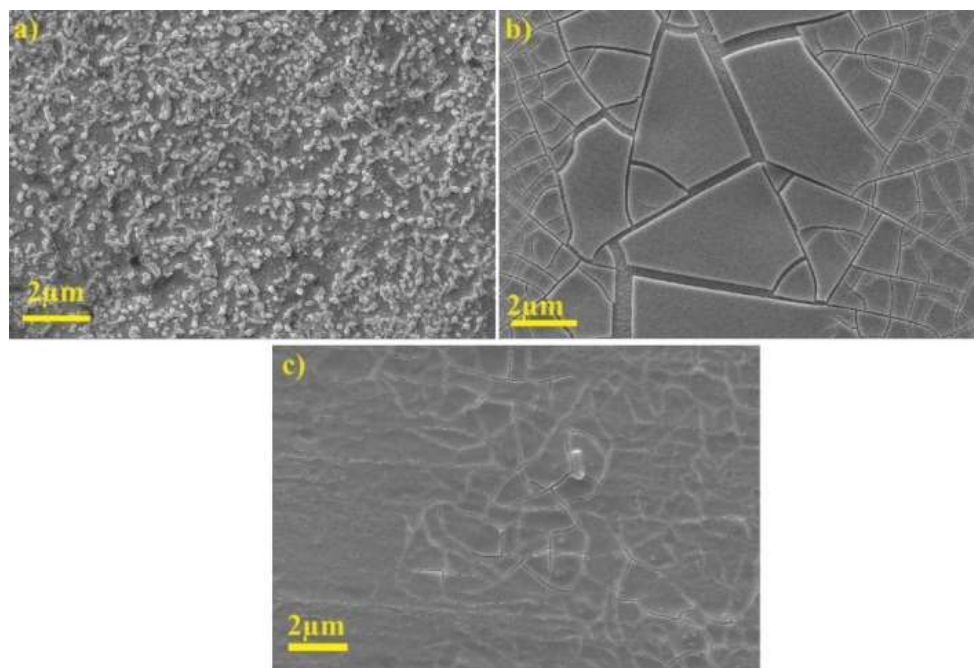
شکل (۱): (الف) نمای دستگاه پلاسمای کانونی و (ب) مشتق جریان و جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی [۱۲].

۳- نتایج و بحث

پس از تابش دهی تنگستن با ۲۰ شات از هر یک از یون‌های هلیوم، آرگون و ترکیب مساوی آن‌ها، تصاویر SEM به صورت عمود از سطح نمونه‌ها گرفته شد که نتایج آن در شکل (۳) ارائه شده است.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش

نمونه تنگستن به ابعاد $10 \times 10 \times 1$ mm تهیه شد و سطح نمونه‌ها قبل از تابش دهی با استفاده از سمباده صیقل داده شد. در شکل (۲) تصویر SEM نمونه‌های تنگستن قبل از تابش دهی نشان داده شده است.



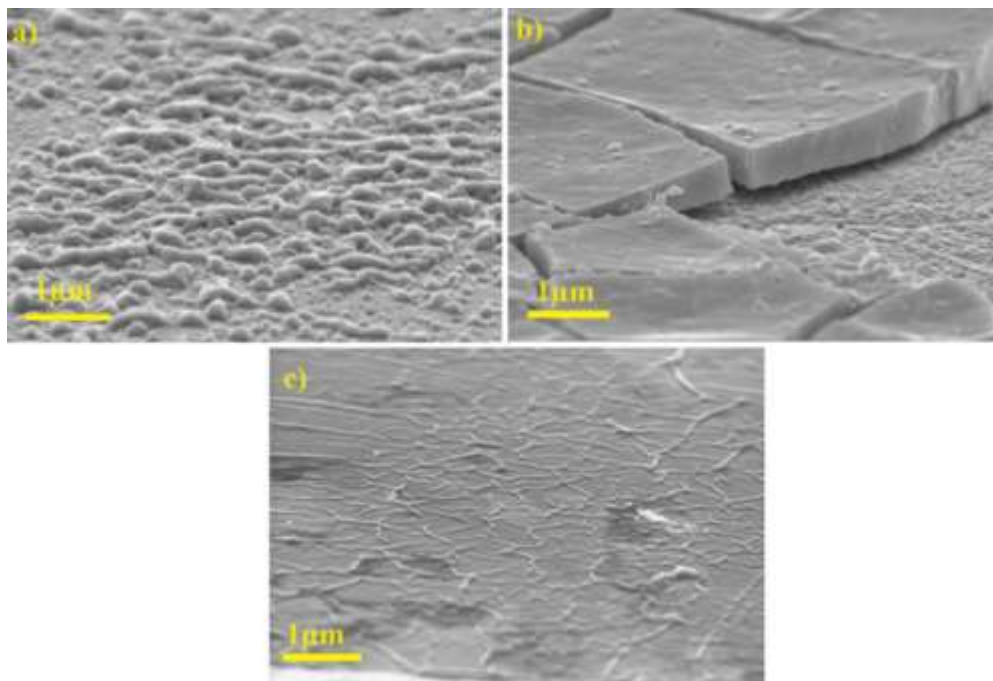
شکل (۳): سطح نمونه‌های تاب شده با ۲۰ شات دستگاه پلاسمای کانونی: (a) هلیوم، (b) آرگون و (c) مخلوط هلیوم و آرگون با نسبت برابر.

در میکروگراف شکل ۳-ا در سطح تنگستن تاول^۴ متراکم دیده می‌شود که در اثر تجمع یون‌های هلیوم و تشکیل خوشه‌های هلیوم وجود آمده است. این تاول‌های در سطح تنگستن به هم پیوسته‌اند و اندازه آن‌ها به چند صد نانومتر می‌رسد. تاول‌های به وجود آمده با پیوستن به یکدیگر تشکیل رشته تاول یا تاول‌های بزرگ‌تری در ابعاد ۱ میکرومتر تشکیل داده‌اند. به‌طور کلی، علت به وجود آمدن تاول در سطح تنگستن ناشی از تجمع اتم‌های هلیوم در نقص‌های شبکه‌ای^۵ مانند نقص بین نشینی^۶، جابه‌جایی شبکه^۷، جاهای خالی از شبکه^۹ است. در اثر برخورد یون‌های پرانرژی با سطح 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، بین نشین/ تهی جای جا، به هم پیوستن جاهای خالی^۹ و جابه‌جایی نقص‌های بینایی در شبکه بلوری ماده و همچنین پخش و نفوذ اتم‌های هلیوم در ساختار ماده دارد که این نقص در اثر تابش یون‌های پرانرژی و همچنین تحمیل بار گرمایی بر تنگستن در ساختار کریستالی آن به وجود آمده است [۱۳-۱۴]. هر چقدر تعداد و اندازه نقص‌های شبکه‌ای در ماده بیشتر شود،

به دنبال آن اتم‌های هلیوم بیشتری می‌تواند در این نقص‌های شبکه به دام افتد و در نتیجه باعث افزایش اندازه و تراکم تاول‌ها می‌شود. با به هم پیوستن این تاول‌ها و یا در مرحله اول به هم پیوستن نقص‌های شبکه‌ای در ماده اندازه تاول‌ها بزرگ‌تر شده است. فلونس یونی در دستگاه پلاسمای کانونی 10^{23} ion/m^2 است. گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین عامل مؤثر در ایجاد تاول‌ها، اندازه و تعداد آنها مربوط به فلونس اتم‌های هلیوم است، نتایج تحقیقات وانگ و همکاران^{۱۰} نشان داد که در تابش دهی تنگستن با یون‌های دوتریم با شار 10^{23} ion/m^2 با انرژی ۱۰۰ الکترون‌ولت نیز تاول مشاهده شده است و یکدیگر از نتایج مهم دیگر تحقیقات آنها این بود که با افزایش فلونس یونی از 10^{19} ion/m^2 به 10^{21} با انرژی ۱ کیلو الکترون‌ولت، اندازه تاول‌ها افزایش پیدا کرده و تعداد آن در سطح تنگستن کاهش یافته است. همان‌گونه که از شکل ۳-ب مشخص است، در اثر تابش یون‌های آرگون، ترک‌هایی در سطح تنگستن به وجود می‌آید. دلیل اصلی به وجود آمدن این ترک‌ها، گسترش تنش گرمایی در سطح تنگستن به دلیل تابش با جریان پلاسمایی آرگون می‌باشد [۱۵].

اطلاعات بیشتری از مورفولوژی سطح نمونه‌ها نشان می‌دهند.

شکل (۴) تصاویر SEM را نشان می‌دهد که با زاویه 20° از سطح تنگستن تابش دهی شده با هلیوم، آرگون و مخلوط هلیوم و آرگون گرفته شده‌اند. این تصاویر، به دلیل نمایش سه بعدی (در مقایسه با نمایش دوبعدی تصاویر عمودی در شکل ۳)



شکل (۴): تصاویر SEM با زاویه 20° از سطح نمونه تنگستن تابش دهی شده با ۲۰ شات دستگاه پلاسمای کانونی: (a) هلیوم، (b) آرگون و (c) مخلوط هلیوم و آرگون با نسبت برابر.

هستند: ترک‌ها عمدتاً به دلیل تابش یون‌های آرگون ایجاد شده‌اند، در حالی که تورم‌های موجود در این خطوط ناشی از تجمع یون‌های هلیوم در نواحی تهی‌جا‌های ایجاد شده توسط آرگون است.

نقش یون‌های آرگون در ایجاد عیوب شبکه‌ای:
یون‌های آرگون، به دلیل سنگینی تقریباً ده برابری نسبت به یون‌های هلیوم، در فرآیند برخورد با اتم‌های شبکه تنگستن تکانه و انرژی بیشتری منتقل می‌کنند. این انتقال انرژی باعث تشکیل تهی‌جا‌های عمیق‌تر در ساختار تنگستن می‌شود. در نتیجه، هنگام تابش هم‌زمان هلیوم و آرگون، یون‌های هلیوم قادر به نفوذ به عمق بیشتری از سطح شده و تجمع بیشتری در

در نمونه‌های تنگستن تابش دهی شده با یون‌های آرگون، عمق ترک‌ها به طور میانگین در حدود ۷۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شده است، در حالی که ارتفاع تاول‌ها از مقیاس نانومتری بسیار ریز تا حدود ۱۰۰ نانومتر متغیر است. همان‌طور که در تصاویر SEM مشاهده می‌شود، ترک‌ها به صورت گسترده در سطح تنگستن گسترش یافته‌اند و تاول‌ها نیز تقریباً تمامی سطح نمونه را پوشش داده‌اند.

تابش هم‌زمان یون‌های هلیوم و آرگون: در نمونه‌هایی که به طور هم‌زمان تحت تابش یون‌های هلیوم و آرگون قرار گرفته‌اند، خطوط ترک مانند متورم در سطح تنگستن مشاهده شده است. این خطوط ناشی از تأثیرات ترکیبی هر دو نوع یون

فشاری و کششی است که به دلیل اثرات هم‌افزایی دو یون رخ داده است.

ب: تغییر در شدت و پهنای قله‌ها^{۱۱}

تابش یون‌های مختلف باعث کاهش شدت قله‌ها و افزایش پهنای آن‌ها شده است:

تابش هلیوم: کاهش قابل توجه در شدت قله‌ها نسبت به تابش آرگون مشاهده شده است که به دلیل نفوذ عمیق‌تر هلیوم و ایجاد نقص‌های بیشتر در عمق ماده است.

تابش آرگون: کاهش شدت قله‌ها کمتر از هلیوم است و این نشان می‌دهد که تأثیر تابش آرگون عمدتاً سطحی بوده و برد کوتاه‌تر آن به ایجاد تغییرات سطحی منجر شده است.

تابش هم‌زمان هلیوم و آرگون: شدت قله‌ها به میزان متوسط کاهش یافته و پهنای قله‌ها افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر توأمان تنش‌های سطحی و عمقی است.

نتایج XRD نشان می‌دهند که نفوذ یون‌های هلیوم به عمق بیشتر و تأثیر تابش آرگون به سطح محدود است. این تفاوت در نفوذ و تخریب ناشی از اختلاف در برد انرژی و جرم یون‌ها است؛ به‌ویژه اینکه یون‌های آرگون حدود ۱۰ برابر سنگین‌تر از یون‌های هلیوم هستند و انرژی بیشتری در برخورد با سطح منتقل می‌کنند، اما برد کمتری دارند.

این تغییرات ساختاری، ناشی از نفوذ یون‌ها و ایجاد نقص‌هایی همچون تهی‌جاها و تنش‌های بلوری، بر مقاومت مکانیکی و عملکرد تنگستن در محیط‌های پلازما اثر مستقیم دارد و نشان‌دهنده اهمیت بررسی تابش‌های هم‌زمان یون‌های مختلف در دمای پلاسمای راکتورهای همجوشی هسته‌ای است.

عمق ساختار دارند. در مقابل، تابش تنگستن با یون‌های هلیوم خالص، سبب به دام افتادن یون‌های هلیوم در تهی‌جاها سطحی و تشکیل تاول‌های سطحی می‌شود؛ بنابراین، اثرات سطحی در این شرایط برجسته‌تر است.

اثر تابش یون‌های آرگون خالص: تابش خالص یون‌های آرگون به دلیل انتقال انرژی زیاد و تحمیل بار گرمایی شدید به سطح تنگستن، باعث ایجاد ترک‌های عمیق و گسترده می‌شود. این ترک‌ها به دلیل اختلاف دمای بالا و تنش‌های حرارتی در ساختار بلوری تنگستن به وجود می‌آیند. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش کلیدی نوع و ترکیب یون‌ها در ایجاد عیوب سطحی و ساختاری تنگستن هستند و اطلاعات ارزشمندی برای طراحی مواد مقاوم در برابر تابش در شرایط پلازما فراهم می‌کنند. برای بررسی تأثیر تابش یون‌های پرانرژی هلیوم، آرگون و تابش هم‌زمان آن‌ها بر ساختار بلوری تنگستن، از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. طیف‌های XRD مربوط به نمونه‌های مرجع و تابش دهی شده در شکل ۵ ارائه شده‌اند. دو قله اصلی که مربوط به صفحات (۰۰۲) و (۱۱۲) هستند، در طیف نمونه مرجع تنگستن مشاهده می‌شوند.

الف: تغییر مکان قله‌ها

تابش یون‌ها باعث جابجایی قابل توجه قله‌ها در طیف XRD شده است که نشان‌دهنده تغییرات ساختاری در شبکه بلوری تنگستن است:

تابش هلیوم: قله‌ها به سمت زوایای بزرگ‌تر با جابجایی حدود 0.3° منتقل شده‌اند. این جابجایی ناشی از نفوذ عمیق یون‌های هلیوم در ساختار تنگستن و ایجاد تنش فشاری در لایه‌های بلوری است.

تابش آرگون: قله‌ها به سمت زوایای کوچک‌تر با جابجایی 0.04° جابجا شده‌اند. این جابجایی ناشی از تأثیر سطحی تابش یون‌های آرگون و ایجاد تنش کششی در سطح تنگستن است.

تابش هم‌زمان هلیوم و آرگون: جابجایی قله‌ها به میزان 0.23° به سمت زوایای بزرگ‌تر نشان‌دهنده ترکیب تنش‌های

$$\sigma = k \frac{\Delta d}{d} \quad (1)$$

که در آن k ثابت الاستیک ماده است که برای تنگستن برابر است با $3.45 \times 10^{11} N/m^2$. نسبت $\frac{\Delta d}{d}$ تغییرات فاصله صفحات به مقدار اولیه آن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{d(\text{observed}) - d(\text{expect})}{d(\text{expect})} \quad (2)$$

مقدار d برای نمونه خام تنگستن برای صفحه (۲۰۰) برابر با $1/583$ آنگسترم می‌باشد. مقادیر مربوط تنش فشاری و تنش کششی ناشی از تابش یون‌های هلیوم، آرگون و مخلوط هلیوم و آرگون در جدول (۳) آورده شده است.

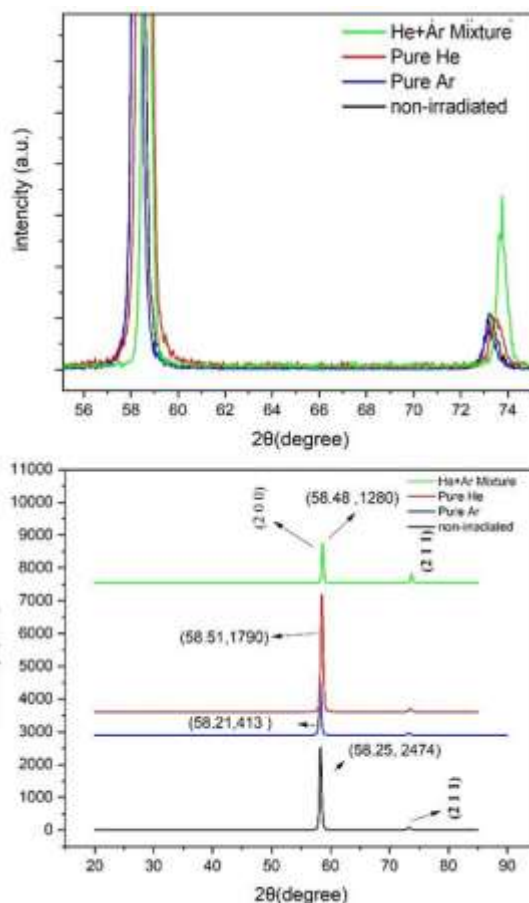
جدول (۳): نتایج تابش یون بر تنش‌های کششی و فشاری تنگستن.

نمونه	$\frac{\Delta d}{d}$	تنش (N/m^2)
آرگون (۲۰ شات)	۰/۰۰۱	کششی $3/45 \times 10^8$
هلیوم (۲۰ شات)	-۰/۰۰۶	فشاری $2/07 \times 10^9$
مخلوط آرگون و هلیوم (۲۰ شات)	-۰/۰۰۳	فشاری $1/03 \times 10^9$

جایجایی مکان قله‌ها نسبت به مکان آنها در طیف نمونه مرجع به دلیل تنش و کرنش^{۱۴} ایجاد شده در نمونه‌ها به دلیل انتقال گرمایی بسیار زیاد به نمونه‌ها در زمان تابش یون‌های پرنرژژی بوده است. تنش و کرنش ایجاد شده ناشی از عوامل متعددی از جمله جابه‌جایی اتم‌ها از شبکه^{۱۵}، ترک‌های انباشته شده^{۱۶}، میکرو تنش‌ها^{۱۷}، تنش‌های داخلی دوربرد^{۱۸}، مرز دانه^{۱۹}، تنش داخلی^{۲۰} و نواقص نقطه‌ای^{۲۱} می‌باشد [۱۶-۲۱].

۴- نتیجه‌گیری

اثر تابش یون‌های آرگون و هلیوم به صورت خالص و مخلوط هلیوم و آرگون با نسبت برابر، بر روی تنگستن مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام این پژوهش مشاهده و مقایسه اثر تجمعی تابش هم‌زمان دو یون آرگون و هلیوم نسبت به



شکل (۴): طیف پراش اشعه ایکس نمونه خام و تابش دهی شده تنگستن.

جدول (۲): نتایج آنالیز XRD نمونه‌های تنگستن.

فاصله صفحات ($\text{\AA}$)				شماره صفحه
Ar + He	He	Ar	مرجع	
1/580	1/577	1/584	1/583	(۲۰۰)
1/284	1/287	1/282	1/292	(۲۱۱)
2θ (درجه)				شماره صفحه
Ar + He	He	Ar	مرجع	
58/48	58/51	58/21	58/25	(۲۰۰)
73/21	73/51	73/81	73/17	(۲۱۱)

تابش یون‌های آرگون باعث به وجود آمدن تنش کششی^{۱۲} شده است (شیفت به زوایای کوچک‌تر و در نتیجه افزایش فاصله صفحاتی) ولی تابش هلیوم باعث ایجاد تنش فشاری^{۱۳} شده است (انتقال به زوایای بزرگ‌تر و در نتیجه کاهش فاصله صفحات). مقدار این تنش از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵].

[4] H. Bolt, V. Barabash, W. Krauss, J. Linke, R. Neu, S. Suzuki, N. Yoshida & A. U. Team, "Materials for the plasma-facing components of fusion reactors", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 329, pp. 66-73, 2004.

[5] H. Bolt, V. Barabash, G. Federici, J. Linke, A. Loarte, J. Roth & K. Sato, "Plasma facing and high heat flux materials-needs for ITER and beyond", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 307, pp. 43-52, 2002.

[6] S. Takamura, T. Miyamoto, Y. Tomida, T. Minagawa & N. Ohno, "Investigation on the effect of temperature excursion on the helium defects of tungsten surface by using compact plasma device", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 415, no. 1, pp.100-103, 2011.

[7] L. Pentecoste, P. Brault, A. L. Thomann, P. Desgardin, T. Lecas, T. Belhabib, M. F. Barthe & T. Sauvage, "Low Energy and low fluence helium implantations in tungsten: Molecular dynamics simulations and experiments", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 470, pp. 44-54, 2016.

[8] X. C. Li, Y. N. Liu, Y. Yu, G. N. Luo, X. Shu & G. H. Lu, "Helium defects interactions and mechanism of helium bubble growth in tungsten: A molecular dynamics simulation", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 451, no. 1-3, pp. 356-360, 2014.

[9] S. Saw, V. Damideh, J. Ali, R. Rawat, P. Lee & S. Lee, "Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus", *Vacuum*, vol. 144, pp.14-20, 2017.

[10] S. Javadi, M. Ghoranneviss, R. Rawat & 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*, vol. 313, pp. 73-81, 2017.

[11] M. Bhuyan, S. R. Mohanty, C. V. S. Rao, P. A. Rayjada & P. M. Raole, "Plasma focus assisted damage studies on tungsten", *Applied Surface Science*, vol. 264, pp. 674-680, 2013.

[12] M. M. Seyedhabashi, B. Shirani Bidabadi, M. Amirhamzeh Tafreshi, F. Seddighi & A. Nasiri, "Damage studies on irradiated tungsten by helium and argon ions in a plasma focus device", *Journal of Radiation Safety and Measurement*, vol. 9, no. 5, pp.1-12, 2020.

پرتودهی تنگستن با هر کدام از یون‌ها به صورت مجزا می‌باشد. نتایج آنالیز SEM نمونه‌ها نشان داد که تابش یون‌های هلیوم باعث به وجود آمدن رشته تاول‌های به هم پیوسته در کل سطح تنگستن می‌شود. تاول‌های متراکم در سطح تنگستن با به هم پیوستن تاول‌های بزرگ‌تر را به وجود آوردند. سطح نمونه تابش‌دهی شده به صورت هم‌زمان آرگون و هلیوم خطوط ترک مانند و متورم، دیده می‌شود خطوط ترک مانند، ناشی از تابش یون‌های آرگون است و تورم ایجاد شده در این خطوط ناشی از تجمع یون‌های هلیوم در این نواحی می‌باشد. آنالیز پراش پرتوایکس نمونه‌ها نیز نشان داد که تابش یون‌های پرنرژي می‌تواند باعث به وجود آمدن تغییرات در ساختار تنگستن شود. همچنین مشخص شد که تابش یون‌های آرگون و هلیوم به ترتیب تنش‌های کششی و فشاری را در تنگستن به وجود می‌آورند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های پژوهشکده پلاσμα و گداخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به دلیل فراهم آوردن امکانات لازم جهت انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۵- منابع

[1] B. Cipiti & G. Kulcinski, "Helium and deuterium implantation in tungsten at elevated temperatures", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 347, no. 3, pp. 298-306, 2005.

[2] N. Dutta, N. Buzarbaruah & S. Mohanty, "Damage studies on tungsten due to helium ion irradiation", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 452, no. 1-3, pp. 51-56, 2014.

[3] V. Pimenov, E. Dyomina, L. Ivanov, S. Maslyaev, V. Gribkov, R. Miklaszewski, M. Scholz, A. Dubrovsky, I. Volobuev & Y. E. Ugaste, "Damage of structural materials for fusion devices under pulsed ion and high temperature plasma beams", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 307, pp. 95-99, 2002.

"Damage studies on irradiated tungsten by helium and argon ions in a plasma focus device", Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement, vol. 9, no. 5, pp.1-12, 2020

[20] M. M. R. Seyedhabashi, M. A. Asgarian, C. Rasouli & F. Sedighi, "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, vol. 50, no. 6, pp.1814-1822, 2022.

[21] M. Tafreshi, M. Habashi, B. Bidabadi, A. Abdisaray, S. Shafiei & A. Nasiri, "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 (JONSAT), vol. 41, no. 2, pp.100-109, 2020.

[13] Y. N. Liu, T. Wu, Y. Yu, X. C. Li, X. Shu & G. H. Lu, "Hydrogen diffusion in tungsten: A molecular dynamics study", Journal of Nuclear Materials, vol. 455, no. 1-3, pp. 676-680, 2014.

[14] L. Sun, S. Jin, X. C. Li, Y. Zhang & G. H. Lu, "Hydrogen behaviors in molybdenum and tungsten and a generic vacancy trapping mechanism for H bubble formation", Journal of Nuclear Materials, vol. 434, no. 1-3, pp. 395-401, 2013.

[15] Wang, Wenmin, J Roth, S Lindig, and CH Wu. "Blister Formation of Tungsten Due to Ion Bombardment." *Journal of nuclear materials* 299, no. 2 (2001): 124-31.

[16] S. Al-Hawat, M. Soukieh, M. Abou Kharoub & W. Al-Sadat, "Using Mather-type plasma focus device for surface modification of AISI304 Steel", Vacuum, vol. 84, no. 7, pp. 907-912, 2010.

[17] M. Seyedhabashi, M. Ebrahimi, D. Rostamifard, S. Goudarzi, E. Noori & A. Nasiri, "Experimental investigation and simulation of penetration depth of nitrogen ions emitted by plasma focus device inside titanium samples", Results in Physics, vol. 52, pp.106897, 2023.

[18] M. Seyedhabashi, S. Shafiei, M. Tafreshi & B. S. Bidabadi, "Study of surface damage and hydrogen distribution in irradiated tungsten by protons in plasma focus device", Vacuum, vol. 175, pp.109249, 2020.

[19] M. M. Seyedhabashi, B. Shirani Bidabadi, M. Amirhamzeh Tafreshi, F. Seddighi & A. Nasiri,

۶- پی‌نوشت

- [1] Plasma-Facing Materials (PFM)
- [2] Plasma Focus Device
- [3] Mather-Type Plasma Focus
- [4] Compact Blisters
- [5] Crystalline Defects
- [6] Interstitials
- [7] Lattice Dislocations
- [8] Vacancies
- [9] Vacancies Coalescence
- [10] Wang et al
- [11] FWHM
- [12] Tensile Stress
- [13] Compressive Stress
- [14] Stress/Stain
- [15] Dislocations
- [16] Stacking Faults
- [17] Micro-Stresses
- [18] Long-Range Internal Stresses
- [19] Grain Boundaries
- [20] Internal Stresses
- [21] Point Defects