

بررسی اثرات پالس پروتون‌های پرنرژژی بر خواص سطحی و ساختاری مس و تنگستن توسط دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2

محمد امیر حمزه تفرشی^{۱*}، میرمحمد رضا سید حبشی^۱، بابک شیرانی بیدآبادی^۲، اکبر عبدی سرای^۳، سپیده شفیعی^۴، علی نصیری^۱

۱. پژوهشکده‌ی پلاسمای و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، کد پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان، ایران

۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی: ۱۶۵، ارومیه، ایران

۴. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۶

چکیده

در این مقاله نتایج به کارگیری دستگاه پلاسمای کانونی کم‌انرژی MTPF-2 در بررسی اثرات تخریبی یون‌های پرنرژژی و موج ضربه بر سطوح تنگستن و مس ارایه شده است. تنگستن به عنوان یک فلز نسبتاً سخت و مس به عنوان یک فلز نسبتاً نرم انتخاب شده‌اند. نمونه‌های تنگستن و مس در فاصله ۸ سانتی‌متری از سطح آند و در زاویه صفر درجه نسبت به محور تقارن قرار داده شده و هم‌زمان با یون‌ها و موج ضربه حاصل از ۲۰ تخلیه الکتریکی، مورد تابش قرار گرفتند. تخلیه‌ها ۱۲ کیلوولتی و در هیدروژن با فشار ۱ mbar انجام شده‌اند. با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌نگاری پاشندگی انرژی ایکس و نیز آنالیز پراش پرتو ایکس، اقدام به آنالیز نمونه‌های مرجع و پرتودهی شده گردید. نتایج، علاوه بر تأیید کارایی دستگاه MTPF-2 برای انجام پژوهش‌هایی از این دست، نشان دادند که برخورد یون‌ها و موج ضربه، باعث ایجاد ترک و تاول در تنگستن و مس، ذوب شدگی مس، تغییر پارامترهای بلوری از قبیل زوایای براگ، شدت قله‌های طیف پراش، و نیز فاصله صفحات بلوری خواهند شد. محاسباتی که با استفاده از رابطه شرر انجام شد نیز تغییر میانگین اندازه بلورک‌های هر دو فلز را نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: دستگاه پلاسمای کانونی، پروتون‌های پرنرژژی، مواد مواجهه با پلاسمای، خواص سطحی و ساختاری

Investigating the effects of high-energy pulsed protons on the surface and structural properties of copper and tungsten by MTPF-2 plasma focus device

M.A. Tafreshi^{1*}, M.R. Habashi¹, B.S. Bidabadi², A. Abdisaray³, S. Shafiei⁴, A. Nasiri¹

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

2. Faculty of Physics, University of Isfahan, Postalcode: 81746-73441, Isfahan, Iran

3. Physics Department, Faculty of Sciences, Urmia University, P.O. Box: 165, Urmia, Iran

4. Research School of Physics and Accelerators, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

Research Article

Received 2.7.2019, Accepted 26.1.2020

Abstract

In the present work, the results of using a low energy plasma focus device MTPF-2, in order to investigate the destructive effects of shockwave and high-energy ions on tungsten and copper surfaces, are presented. Tungsten and copper were selected as a relatively hard and soft metals, respectively. The samples were placed at a distance of 8 cm from the upper anode surface at zero degrees relative to the symmetry axis and were exposed to ions and a shockwave from 20 electrical discharges. The discharge voltages were 12 kV and carried out in hydrogen gas at a pressure of 1mbar. By using the optical microscopy images, scanning electron microscopy images, x-ray diffraction spectroscopy, and x-ray diffraction analysis, the reference and irradiated samples were analyzed. The results, in addition to confirming the performance of the MTPF-2 device to be used in such studies, showed that the collision of ions and the shockwave creates, cracks and blister at the surface of the tungsten, lead to the creation of cracks, blisters, and melting of the copper surface, and changing the crystalline parameters such as the Bragg angles, the intensity of the peaks of the diffraction spectrum, and the distance between the crystalline plates. The calculations, which were performed by using the Scherrer's formula also show a change in the average grain size of both metal surfaces.

Keywords: Plasma focus device, High-energy protons, Plasma facing material, Surface and structural properties

*Email: mtafreshi@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

اصطلاح به پلاسمای تنگیده^۵ موسوم است، تشکیل می‌شود. دمای پلاسمای تنگیده در حدود ۲ keV، چگالی آن در حدود 10^{19} cm^{-3} و محل قرارگیری آن در حدود ۱ cm بالاتر از مرکز سطح فوقانی آند است [۱۳].

بر اثر ناپایداری‌های پلازما، پس از حدود ۱۰۰ ns، پلازما دچار گسیختگی^۶ می‌شود. گسیختگی پلازما از یک طرف باعث شتاب‌گیری الکترون‌ها به سمت پایین (سمت آند) و در نتیجه تبخیر سطح آند می‌شود [۱۱] و از طرف دیگر، باعث گسیل موج ضربه^۷ و یون‌هایی با انرژی در محدوده ۱۰۰ keV تا ۱ MeV به سمت بالا (سمت کاتد) و در نتیجه برخورد با سطوح فوقانی می‌شود [۱۴-۱۶]. با توجه به این‌که این‌گونه برخوردها توانایی تغییر حالت سطح را دارد، می‌توان از این پدیده جهت آزمایش مقاومت مواد استفاده کرد. سادگی نسبی طراحی و ساخت و اپراتوری دستگاه‌های پلاسمای کانونی، قابلیت شتاب‌دهی و تولید یون‌های پرانرژی، تمیزی زیست محیطی، قابلیت ساخت دستگاه‌های کوچک و بالاخره ارزانی قیمت، نمونه‌هایی از ویژگی‌هایی هستند که باعث برتری دستگاه‌های پلاسمای کانونی در آزمایش مواد می‌شوند که باید در شرایط خاص نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای، کار کنند [۱۳، ۱۷-۲۰].

در توکامک‌های^۸ موجود، حداکثر چگالی توان بار حرارتی (در هنگام گسیختگی پلازما^۹) بر روی دیواره اول در حدود 1 MW/m^2 و در منحرف‌کننده‌ها^{۱۰} در حدود 10 MW/m^2 است. ضمن آن‌که پیش‌بینی می‌شود که در راکتورهای گداخت آینده، بار حرارتی قابل انتظار در حدود 10^3 MW/m^2 تا 10^4 خواهد شد [۲، ۸، ۱۷ و ۲۱]. گسیختگی پلازما در دستگاه پلاسمای کانونی، می‌تواند بار حرارتی در حدود 10^8 MW/m^2 را تولید کند که با افزایش فاصله هدف از سر آند، میزان آن کاهش می‌یابد [۸ و ۲۲]. مسئله قابل توجه دیگر آن است که با توجه به برابر بودن جرم نوترون و پروتون، در سال‌های اخیر برای شبیه‌سازی تجربی اثرات تخریبی نوترون‌های پرانرژی، از پروتون‌های پرانرژی نیز استفاده شده است [۲۳-۲۵].

تنگستن یکی از مواد پیشنهادی برای ساخت دیواره اول توکامک‌های ایترا^۱ و دمو^۲ است [۱-۴]. به‌طور کلی، این فلز به علت دارا بودن خواصی هم‌چون نقطه ذوب بالا، مقاومت زیاد در برابر کند و پاش^۳، فعال‌شدن^۴ کم هنگامی که در معرض شار نوترونی قرار می‌گیرد و خواص ترمودینامیکی مناسب همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد جهت استفاده در دیواره اول دستگاه‌های گداخت هسته‌ای مورد توجه بوده است [۵-۷]. طی سال‌های اخیر، در رابطه با اثر یون‌های پرانرژی بر روی خواص سطحی و ساختاری مواد قابل استفاده در راکتورهای گداخت، پژوهش‌های نسبتاً گسترده‌ای با استفاده دستگاه‌هایی نظیر شتاب‌دهنده‌ها، دستگاه‌های پرتو یونی [۸-۹]، دستگاه‌های پلاسمای خطی [۱۰] و دستگاه‌های پلاسمای کانونی صورت گرفته است [۱۱-۱۲].

به‌صورت کلی، دستگاه‌های پلاسمای کانونی از یک محفظه بسته (برای ایجاد خلأ و سپس دمش گاز در آن) و یک بانک انرژی خازنی تشکیل شده‌اند. در داخل محفظه دستگاه، دو الکتروود هم‌محور (آند و کاتد) قرار دارند که توسط عایقی استوانه‌ای شکل از یکدیگر جدا شده‌اند. آند در مرکز قرار داشته و تعدادی میله‌های کاتد به‌طور متقارن در حول آند و در زوایای مساوی قرار می‌گیرند. علاوه بر میله‌های کاتد که نقش اصلی را در تنگیده کردن پلازما ایجاد می‌کنند، دیواره‌های جانبی و سقف این محفظه نیز به کاتد متصل بوده و کاتد به حساب می‌آیند.

بر اثر اعمال یک اختلاف پتانسیل نسبتاً بزرگ بین آند و کاتد، گاز داخل محفظه دستگاه پلاسمای کانونی دچار شکست الکتریکی شده و لایه‌ای از جریان الکتریکی بین آند و کاتد به وجود می‌آید. سپس تحت تأثیر نیروی لورنتس $\vec{J} \times \vec{B}$ (که در آن B میدان مغناطیسی سمتی ناشی از وجود خود لایه جریان است)، لایه جریان به سمت محور تقارن دستگاه حرکت کرده و پیشاپیش خود پلازما را نیز به جلو رانده و متراکم می‌کند. به این ترتیب یک پلاسمای داغ و چگال که در

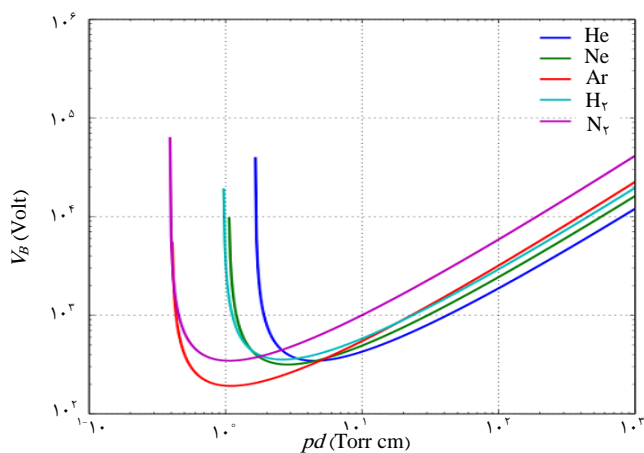
5. Pinched plasma
6. Disruption
7. Shock wave
8. Tokamak
9. Plasma Disruption
10. Diverter

1. ITER
2. DEMO
3. Sputtering
4. Neutron Activation

الکترودمی باشند. شکل ۱ تابع پاشن را برای چند گاز مختلف، از جمله گاز هیدروژن، نشان می‌دهد [۲۶].

در آزمایش‌های مربوط به این پژوهش، گاز مورد استفاده هیدروژن، فاصله بین آند و کاتد ۵ cm (برابر با طول عایق دستگاه MTPF-2) و فشار گاز ۱ mbar (یا ۰.۷۵ Torr) می‌باشند. به این ترتیب مراجعه به شکل ۱، نشان می‌دهد که ولتاژ شکست گاز در حدود ۴۰۰ V خواهد بود که بسیار کم‌تر از ولتاژ تخلیه‌ای است (۱۲ kV) که مورد استفاده قرار گرفته است. به عبارت دیگر، قرار گرفتن یک اختلاف پتانسیل ۱۲ کیلوولتی در بین آند و کاتد و وجود گاز هیدروژن در بین آن‌ها، باعث ایجاد یک میدان الکتریکی نسبتاً قوی و به دنبال آن شکست الکتریکی گاز هیدروژن در درون محفظه می‌شود. به این ترتیب، لایه‌ای از جریان الکتریکی مابین کاتد و آند جاری گردیده و تنگش پلاسما شروع می‌شود.

در مورد فیزیک اندرکنش یون‌های پرنرژی با سطح فلزات، سه سازوکار^۳ را می‌توان مطرح نمود [۲۷]: الف) افزایش دمای سطح و تصعید آن، ب) انتقال انرژی توسط یون و در نتیجه افزایش دمای سطح، ذوب شدن سطح و در نهایت پراکندگی مذاب، ج) کندوپاش فیزیکی توسط یون‌ها. غالب بودن هر یک از این سه سازوکار در دستگاه‌های پلاسمای کانونی، به جنس فلز و انرژی یون‌ها بستگی دارد [۲۷]. جدول ۱ تعدادی از مشخصه‌های فیزیکی مس و تنگستن و نیز دمای جوش آن‌ها در فشارهای مختلف (فشارهای مورد استفاده در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2) را نشان می‌دهد.



شکل ۱. منحنی پاشن برای چند گاز مختلف [۲۶].

در یک آزمایش پژوهشی [۶] با دستگاه پلاسمای کانونی، تخریب سطوح تنگستنی با استفاده از یون‌های دوتریم حاصل از تخلیه الکتریکی با انرژی ۲/۲ kJ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش بیانگر ایجاد ترک‌های میکرونی با عرض ۰.۳ تا ۰.۵ μm ، ذوب شدن تنگستن، و ایجاد حفره‌هایی با اندازه حدود ۵ μm بوده است. در پژوهشی دیگر [۱۲]، اثرات تخریبی یون‌های هلیم حاصل از تخلیه الکتریکی با انرژی ۲/۲ kJ بر سطح تنگستن مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش نیز ترک‌های میکرونی با عرض ۱ تا ۴ μm و تاول‌هایی به اندازه ۰.۲ μm مشاهده شدند؛ ضمن آن‌که تغییر مکان قله‌های طیف پراش پرتو ایکس^۱ به زوایای بالاتر نیز به وقوع پیوسته است. علاوه بر تنگستن، بررسی فولاد ضدزنگ نیز مورد توجه پژوهشگران بوده است. به عنوان مثال با استفاده از یون‌های دوتریم حاصل از تخلیه الکتریکی با انرژی ۲/۹ kJ، اقدام به بررسی سطح فولاد ضدزنگ شده است [۸]. نتیجه این آزمایش نیز نشان‌دهنده انتقال قله‌های پراش به سمت زوایای بیش‌تر و در نتیجه تغییر ساختار کریستالی فولاد بوده است.

هدف این پژوهش، بررسی نتایج حاصل از به کارگیری دستگاه پلاسمای کانونی کم‌انرژی MTPF-2 در پژوهش‌های مرتبط با مواد دیواره اول دستگاه‌های گداخت هسته‌ای بوده است. برای اطمینان از عملکرد سیستم، علاوه بر تنگستن، از فلز نسبتاً نرم مس نیز استفاده شده و موضوع برخورد یون‌های پرنرژی و موج ضربه با سطح دو فلز و به دنبال آن تاول زدن و ذوب شدن سطح فلزات و نیز تغییر میانگین اندازه بلورک‌های سطح مورد توجه قرار گرفتند.

۲. بخش نظری

در حالت کلی، اعمال اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد می‌تواند منجر به شکست الکتریکی گاز بین دو الکترودمی و در نتیجه جاری شدن جریان الکتریکی شود. در سال ۱۸۸۹ میلادی، پاشن^۲ مشخص کرد که ولتاژ شکست گازها V_B ، تابعی از حاصلضرب pd است که در آن p فشار گاز، و d فاصله بین دو

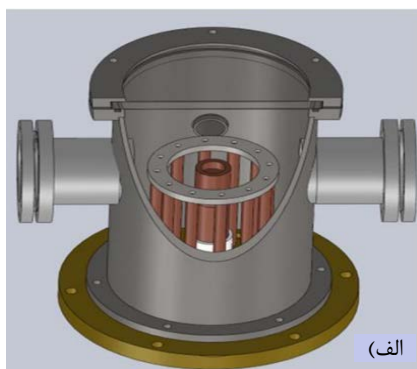
انرژی آستانه کندوپاش برای مواد با جرم اتمی بزرگتر از ۱۲ با دقت بسیار بالا توسط رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۷]:

$$E_{\min}^{\circ} = 511(\text{keV}) \left\{ \left[1 + \frac{A \cdot E_d}{561 \text{ eV}} \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (2)$$

با افزایش عدد جرمی و E_d انرژی آستانه کندوپاش افزایش می‌یابد. E_d از مشخصه‌های فیزیکی یک ماده است که در مرجع [۲۸] اطلاعات کاملی در مورد آن وجود دارد.

۳. چیدمان تجربی

دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 از نوع مدر با بانک خازنی به ظرفیت $13/5 \text{ F}\mu$ و بیشینه ولتاژ تخلیه 20 kV (معادل بیشینه انرژی تخلیه $2/7 \text{ kJ}$) به‌عنوان منبع تولید پروتون‌های پراثری برای پرتودهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این دستگاه، طول آند و کاتد هر یک برابر 145 mm ، شعاع آند $14/5 \text{ mm}$ ، شعاع کاتد 5 mm ، طول مؤثر آند 95 mm ، طول عایق 50 mm و تعداد میله‌های کاتد ۱۲ عدد می‌باشند. شکل ۲ ساختار الکترودهای این دستگاه را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲. شماتیک ساختار دستگاه MTPF-2، (ب) تصویر آند و میله‌های کاتد دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مس و تنگستن

دمای جوش (°C) در فشارهای مورد استفاده در دستگاه MTPF-2				گرمای تبخیر (kJ/mol)	دمای جوش در فشار ۱ atm (°C)	دمای ذوب (°C)	عدد اتمی	ماده تحت تابش
mbar	mbar	mbar	mbar					
۱/۲	۰/۹	۰/۶	۰/۳	۸۲۴	۵۵۵۵	۳۴۲۲	۷۴	تنگستن
۳۹۰۲	۳۸۵۵	۳۷۸۴	۳۶۷۲	۳۰۰	۲۵۶۲	۱۰۸۵	۲۹	مس

در صورتی که در یک فشار، دمای جوش یک فلز از دمای ذوب آن کم‌تر باشد، فلز مستقیماً از فاز جامد به بخار تبدیل می‌شود و سازوکار تصعید رخ می‌دهد. جدول ۱ نشان می‌دهد که در مورد هر دو فلز، در همه فشارهای مطرح، دمای ذوب از دمای جوش کم‌تر است. بنابراین سازوکار افزایش دمای سطح فلز و تصعید آن (سازوکار الف) منتفی است.

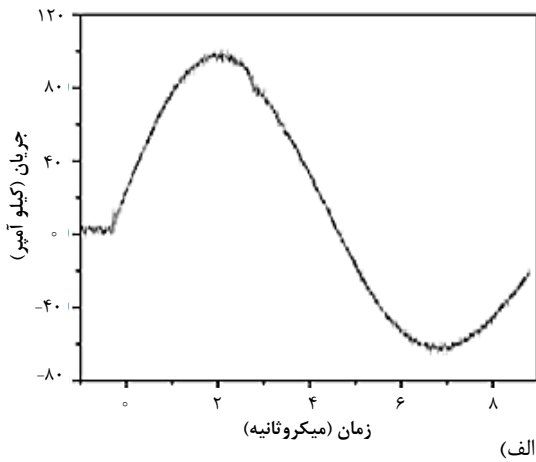
ذوب شدن سطح فلز باعث می‌شود تا برخورد پروتون‌ها و موج ضربه با سطح مذاب منجر به پراکنده و پخش شدن مذاب شود. این سازوکار (سازوکار ب) در مورد مس که دمای ذوب نسبتاً پایینی دارد محتمل‌تر است. در فرایند کندوپاش (سازوکار ج)، وقتی که یون با سطح ماده برخورد می‌کند، نیروی کولنی بین هسته‌ای باعث انتقال انرژی و پراکندگی هسته‌ها می‌شود. اگر پراکندگی در زاویه 180° درجه رخ دهد، بیش‌ترین انتقال انرژی صورت می‌گیرد. بیش‌ترین انرژی منتقل شده به هسته با جرم M برابر است با:

$$E_{\max} = \frac{2E_0(E_0 + 2mc^2)}{Mc^2} \quad (1)$$

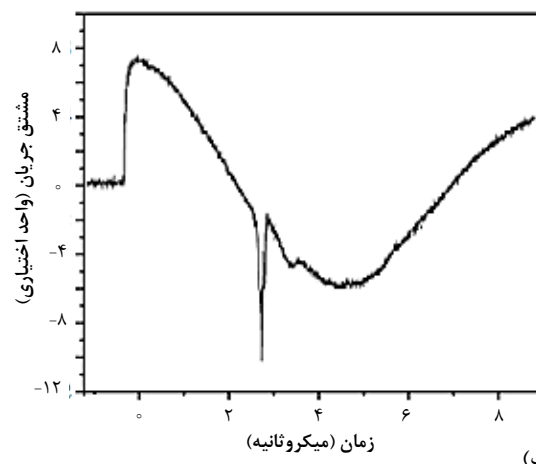
که در آن E_0 انرژی یون و mc^2 انرژی معادل جرم حالت سکون پروتون است. با افزایش انرژی یون و کاهش جرم هسته هدف، E_{\max} افزایش می‌یابد. اگر E_{\max} از انرژی جابه‌جایی شبکه هدف 1 و یا (E_d) بزرگ‌تر باشد، پراکندگی در زاویه‌های بزرگ می‌تواند هسته را کاملاً جابه‌جا کند و یا حتی آن را به بیرون از ماده پرتاب کند. کم‌ترین مقدار E_0 که می‌تواند منجر به E_{\max} برابر با E_d شود، انرژی آستانه کندوپاش نامیده می‌شود. مقدار

1. Displacement Energy

به صورت آنلاین در دسترس می‌باشد، استفاده شده است [۲۹]. مقادیر پارامترهای ثابت دستگاه (شعاع آند، شعاع کاتد، ارتفاع کاتد، ظرفیت خازنی، اندوکتانس، و رزیستانس مدار) و نیز پارامترهای تجربی مرتبط با تخلیه‌های الکتریکی از قبیل نوع گاز، فشار گاز، و ولتاژ تخلیه، و... به عنوان پارامترهای ورودی این نرم‌افزار تعریف شدند. جدول ۲ مهم‌ترین نتایج به دست آمده (برای هر تخلیه الکتریکی) را گزارش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۳. نمودارهای کل جریان تخلیه و مشتق آن. (الف) جریان تخلیه ۱۲ کیلوولتی در فشار ۱ mbar. (ب) مشتق جریان تخلیه.

جدول ۲. حدود پارامترهای باریکه یونی

جریان یونی (kA)	چگالی جریان (Am ⁻²)	سرعت یونها (cm/μs)	شار یونی (m ⁻² s ⁻¹)	شاریدگی یونی (m ⁻²)	شاریدگی انرژی باریکه (Jm ⁻²)
۱۲٫۵	۸٫۷×۱۰ ^{-۸}	۲۴۹	۵٫۵×۱۰ ^{-۲۷}	۱×۱۰ ^{-۲۰}	۲٫۶×۱۰ ^{-۵}

مهم‌ترین شاخص برای اطمینان از انجام موفقیت‌آمیز تنگش پلاسما، ثبت سیگنال کل جریان تخلیه است. تنگش پلاسما باعث افزایش ناگهانی اندوکتانس ستون پلاسما در لحظه تنگش و در نتیجه افت جریان تخلیه در آن لحظه خواهد شد. در این آزمایش‌ها، برای مشاهده سیگنال کل جریان تخلیه (شکل ۳ الف) از یک پیچه روگوفسکی استفاده شده است.

معمولاً برای مشاهده دقیق‌تر، به جای استفاده از سیگنال جریان تخلیه، از سیگنالی موسوم به سیگنال مشتق کل جریان تخلیه، استفاده می‌شود. این سیگنال، چون مشتق جریان تخلیه است، تغییرات جریان را واضح‌تر نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، هم موفقیت‌آمیز بودن تنگش پلاسما و هم زمان وقوع تنگش را به صورتی دقیق‌تر نشان می‌دهد. پیچه‌ای که سیگنال مشتق جریان را می‌دهد، متشکل از چند دور سیم (در حدود ۱۰ دور) است که در کنار قطب مثبت خازن (بانک انرژی) قرار داده می‌شود. عبور جریان از قطب مثبت خازن باعث ایجاد یک جریان القایی در این پیچه می‌شود که متناسب با مشتق کل جریان به صورت یک تغییر جزئی قابل مشاهده است، در سیگنال مشتق جریان به صورت یک قله منفی واضح دیده می‌شود. شکل ۳ ب سیگنال مشتق جریان مربوط به شکل ۳ الف را نشان می‌دهد.

گاز مورد استفاده در این آزمایش‌ها، هیدروژن بوده است. برای به دست آوردن فشار مناسب این گاز، تخلیه‌های الکتریکی با ولتاژ ۱۲ kV در فشارهای مختلف انجام شد. نتایج نشان دادند که برای تنگش یون‌های هیدروژن، فشار گاز ۱ mbar، مناسب است. نمونه‌های تنگستن با ابعاد ۱×۱۰×۱۰ mm^۳ و نمونه‌های مس با ابعاد ۱×۵×۵ mm^۳، بعد از صیقل‌دهی و تمیز شدن سطح (با استفاده از استون و آب مقطر)، بر روی سطح داخلی درب محفظه دستگاه پلاسمای کانونی در فاصله ۸ سانتی‌متری از آند نصب شدند. فشار محفظه تا ۱۰^{-۳} mbar پایین آورده شد و سپس گاز هیدروژن به محفظه تزریق شد و ۲۰ تخلیه الکتریکی با ولتاژ ۱۲ kV انجام شد.

به منظور در دست داشتن حدود پارامترهای باریکه یونی دستگاه، از نرم‌افزاری که براساس مدل نظری لی^۱ تهیه شده و

1. Prof. Sing Lee

۴. نتایج تجربی

۱.۴ تصویربرداری میکروسکوپ نوری

از سطح نمونه‌های تنگستن و مس قبل و بعد از پرتودهی، تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شد. شکل ۴ تصاویر قبل از پرتودهی (تصاویر مرجع) را نشان می‌دهد. شکل‌های ۴ الف و ۴-ب به ترتیب سطح نمونه مرجع تنگستن و نمونه مرجع مس را نشان می‌دهند. این شکل شیارهایی را بر روی سطح مس مرجع نشان می‌دهد که پیش از این در مرجع ۱۲ نیز دیده شده و به‌عنوان اثر ناشی از پولیش سطح گزارش شده است. شکل ۵ تصاویر پس از تابش سطوح تنگستن و مس را نشان می‌دهد.

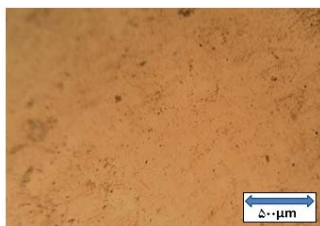
شکل ۵ نشان می‌دهد که در هر دو سطح شبکه‌ای از ترک‌های میکرومتری، ایجاد شده است. میزان سایر تخریب‌ها در حدی نیست که بتوان با استناد به تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری (که بزرگ‌نمایی نسبتاً کمی دارند)، قضاوت دقیقی کرد. به‌عبارت دیگر، برای آن که بتوان قضاوت دقیقی کرد، باید از سامانه‌های تصویربرداری با بزرگ‌نمایی بیشتر استفاده کرد.

۲.۴ تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی

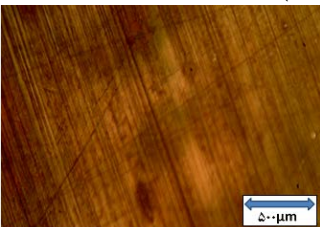
به‌منظور بررسی دقیق‌تر سطح نمونه‌های تنگستن و مس، از نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شد. شکل ۶ تصاویر نمونه‌های مرجع را نشان می‌دهد.

شکل ۶ نشان می‌دهد که قبل از پرتودهی، سطح نمونه‌های مس و تنگستن تقریباً یکنواخت بوده و در آن‌ها حفره و ترک وجود ندارد. شکل ۷، تصاویر میکروسکوپ الکترونی را بعد از برخورد پروتون و موج ضربه، نشان می‌دهد. شکل ۷ (الف و ج)، تصاویر نمونه تنگستن و شکل ۷ (ب و د)، تصاویر نمونه مس می‌باشند.

شکل‌های تنگستن نشان می‌دهند که سطح آن تاول زده است. اندازه این تاول‌ها تقریباً یکسان بوده و میانگین آن‌ها در حدود $0.1 \mu\text{m}$ است. در سطح تنگستن، تغییرات ناشی از ذوب‌شدگی دیده نمی‌شود ولی شکل ۷ ج نشان می‌دهد که سطح تنگستن پوسته پوسته شده است که علت این موضوع نیازمند بررسی‌های بیشتر آتی می‌باشد. سطح مس نیز تاول‌هایی با اندازه‌های نسبتاً متفاوت زده است که اغلب آن‌ها برابر یا بزرگ‌تر از $0.3 \mu\text{m}$ است. شکل ۷ د نشان می‌دهد که انتقال انرژی به سطح مس، باعث ذوب‌شدگی، کندوپاش و ایجاد حفره نیز شده است.

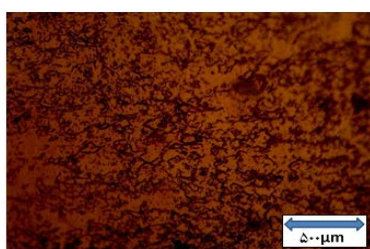


(الف)

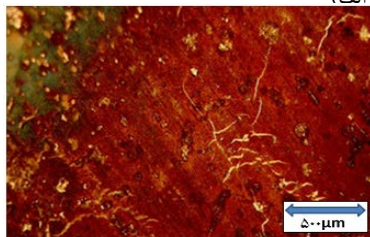


(ب)

شکل ۴. الف) سطح نمونه تنگستن مرجع، ب) سطح نمونه مرجع مس.

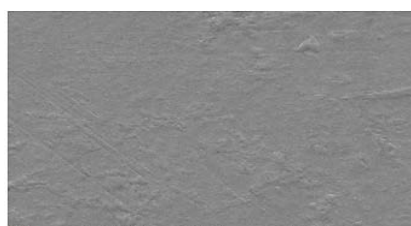


(الف)

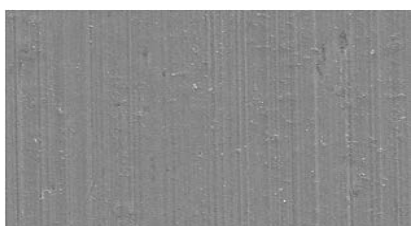


(ب)

شکل ۵. الف) سطح نمونه تنگستن تابش‌دهی شده، ب) سطح نمونه مس تابش‌دهی شده.



(الف)



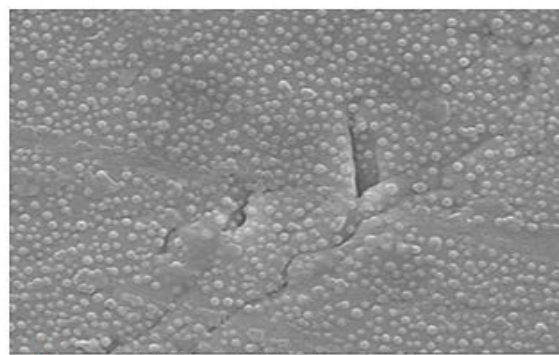
(ب)

شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌های مرجع تنگستن (الف) و مس (ب).

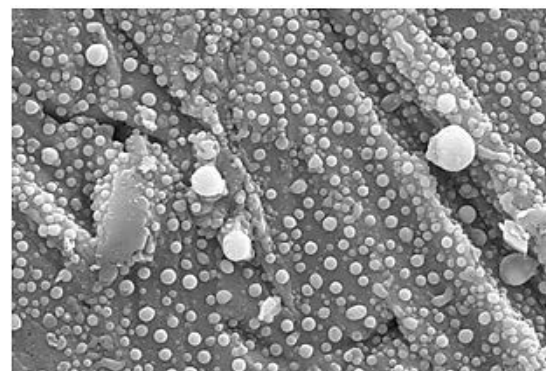
۳.۴ طیف‌نگاری پاشندگی انرژی ایکس

از طیف‌نگاری پاشندگی انرژی پرتو ایکس^۱ به‌منظور بررسی خلوص نمونه مرجع و نیز تعیین عناصر موجود در نمونه تابش دیده استفاده شده است.

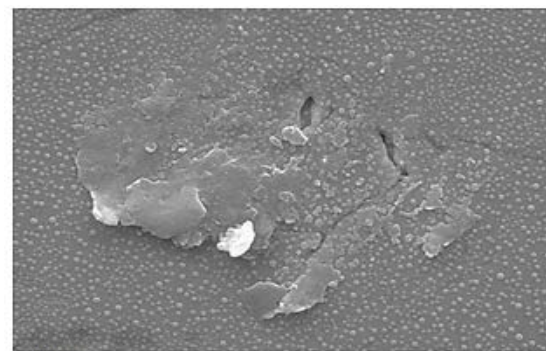
شکل ۸ الف نشان می‌دهد که تنگستن استفاده‌شده در این پژوهش دارای خلوص بالایی می‌باشد. شکل ۸ ب، نشان می‌دهد که در نمونه پرتو دهی‌شده تنگستن، به مقدار ۱/۵٪ وزنی، فلز مس وجود دارد. این موضوع نشان‌دهنده وجود ذرات مس ناشی از تبخیر آند بر روی تنگستن است. به‌عبارت دیگر، گسیختگی پلازما باعث برخورد الکترون‌های پرنرژری با سطح آند، تبخیر ذرات فلز آند (مس) و پخش شدن آن‌ها در محیط شده است. لازم به ذکر است که طیف‌نگاری EDX توانایی تشخیص مقدار یون‌های هیدروژن را که در نمونه نفوذ کرده‌اند را ندارد.



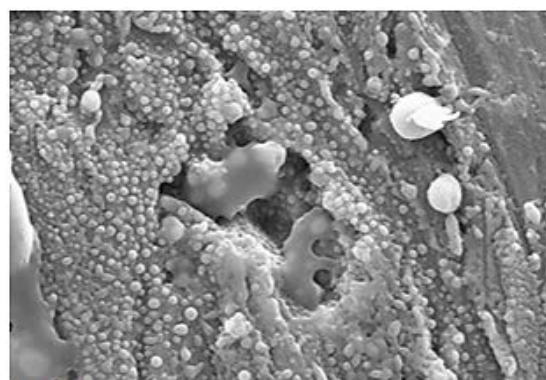
(الف)



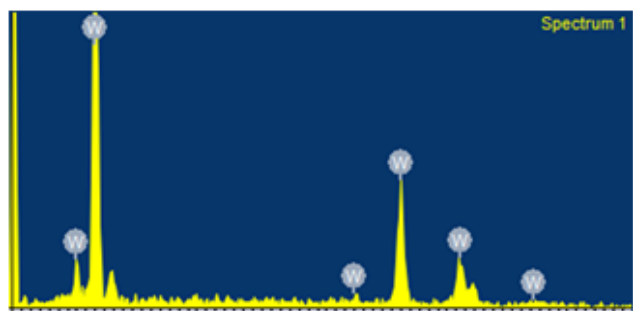
(ب)



(ج)

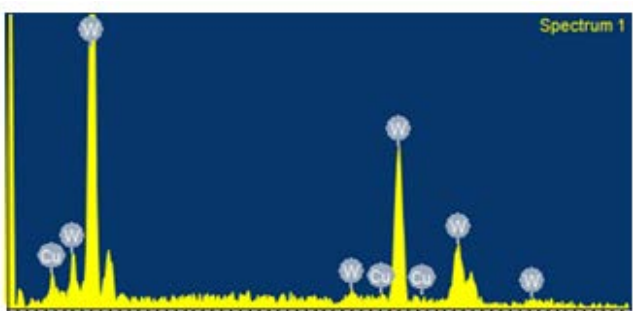


(د)



Full Scale ۲۲۹ cts Cursor. ۰۰۰

(الف)



Full Scale ۲۲۹ cts Cursor. ۰۰۰

(ب)

شکل ۸. نتایج طیف‌نگاری EDX (الف) نمونه تنگستن قبل از تابش‌دهی (ب) نمونه تنگستن پس از تابش‌دهی.

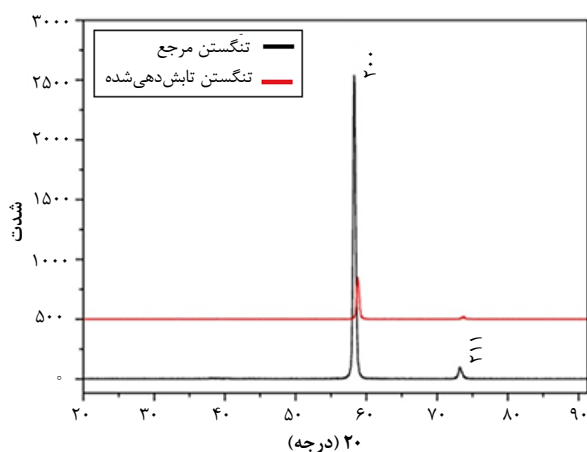
شکل ۷. تصاویر نمونه تنگستن (الف و ج) و نمونه مس (ب و د).

1. Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDX

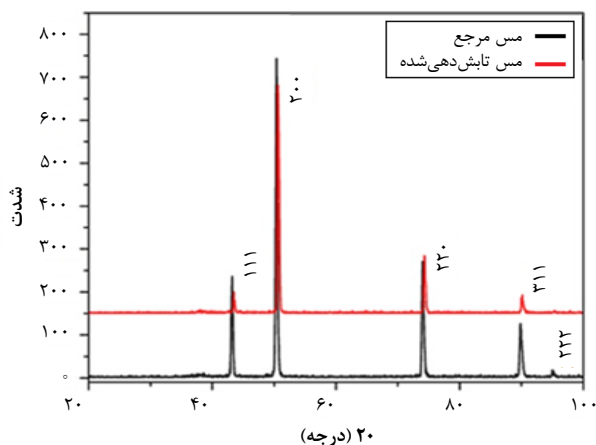
با استفاده از رابطه شرر و اعداد مربوط به بلندترین قله (قله ۲۰۰)، میانگین اندازه بلورک‌های نمونه مرجع و نمونه پرتودیده به ترتیب برابر $29/1 \text{ nm}$ و $38/8 \text{ nm}$ خواهند بود.

۵. نتیجه‌گیری

با استفاده از جدول ۵ می‌توان مهم‌ترین نتایج به دست آمده در طی این پژوهش را با نتایج دو پژوهش دیگر (مراجع [۶] و [۱۲]) مقایسه کرد. جدول ۵ نشان می‌دهد که در تمامی این آزمایش‌ها، سطوح تنگستنی دچار ترک شده‌اند. همچنین با توجه به داده‌های جدول ۵، آزمایش‌های با دستگاه‌های پلاسمای کانونی کوچک می‌تواند باعث تاول زدگی و ذوب شدن سطح تنگستن و مس شود. جدول ۵ همچنین مؤید افزایش زاویه قله‌های پراش است که بیانگر دور شدن فلز از حالت کریستالی و نزدیک شدن به حالت آمورف است.



شکل ۹. طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های تنگستن.



شکل ۱۰. طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های مس.

۴.۴ آنالیز پراش پرتو ایکس

از آنالیز پراش پرتو ایکس^۱ برای بررسی تأثیر برخورد یون‌ها و موج ضربه بر خواص ساختاری و بلوره‌ای تنگستن و مس استفاده شد. شکل ۹ نتایج آنالیز نمونه‌های مرجع و پرتودیده تنگستن را نشان می‌دهد. در این شکل کاهش شدت قله‌ها و انتقال آن‌ها به سمت زاویه‌های بزرگ‌تر دیده می‌شود. جدول ۳ مقادیر کمی این آنالیز را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳، پس از پرتودهی، هر دو قله به سمت زوایای بزرگ‌تر انتقال پیدا کرده‌اند، کاهش چشم‌گیری در ارتفاع قله‌ها به وجود آمده و فاصله صفحات نیز کاهش پیدا کرده است. این تغییرات مؤید دور شدن نمونه از حالت کریستالی و نزدیک شدن به حالت آمورف است. رابطه (۳)، که به رابطه شرر^۲ معروف است، میانگین اندازه بلورک‌های^۳ فلز، را به دست می‌دهد:

$$D = \frac{k \lambda}{\beta_{\theta} \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

در رابطه فوق D میانگین اندازه بلورک‌های فلز، k ضریب شکل بلور (برای تنگستن $0/94$)، λ طول موج پرتو ایکس (در این حالت برابر $1/54059$ آنگسترم)، θ زاویه براگ^۴ و β_{θ} پهنای عرض پالس در میانه قله^۵ (برحسب رادیان) می‌باشند. استفاده از این رابطه و اعداد مربوط به بلندترین قله (قله ۲۰۰)، میانگین اندازه بلورک‌های نمونه مرجع و نمونه تابش‌دیده را به ترتیب $29/1 \text{ nm}$ و $30/2 \text{ nm}$ به دست می‌دهد. شکل ۱۰، طیف پراش نمونه‌های مرجع و پرتودیده مس را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در نمونه‌های پرتودیده مس نیز ارتفاع قله‌ها کاهش یافته و زاویه‌های براگ نیز به سمت مقادیر بزرگ‌تر انتقال پیدا کرده‌اند؛ ضمن آن‌که فاصله صفحات نیز کاهش یافته است. به عبارت دیگر، در این مورد نیز نمونه از حالت کریستالی دور و به حالت آمورف نزدیک شده است. جدول ۴ مقادیر دقیق این آنالیز را نشان می‌دهد.

1. X-Ray Diffraction (XRD)
2. Scherrer's Formula
3. Grain
4. Bragg's Angle
5. Full Width at Half Maximum, FWHM

جدول ۳. پارامترهای طیف پراش پرتو ایکس نمونه های تنگستن

شماره صفحه	زاویه ۲θ		ارتفاع قله		پهنای قله		فاصله صفحات (Å)
	قبل از تابش	پس از تابش	قبل از تابش	پس از تابش	قبل از تابش	پس از تابش	
۲۰۰	۵۸,۲۵۴۱	۵۸,۸۱۵۷	۲۴۷۱,۰۴	۳۴۲,۴۰	۰,۳۹۳۶	۰,۳۱۴۹	۱,۵۷۰۰۶
۲۱۱	۷۳,۲۰۱۱	۷۳,۸۱۰۰	۹۳,۷۳	۱۳,۱۳۵	۰,۳۸۴۰	۰,۶۷۲۰	۱,۲۸۲۷۸

جدول ۴. پارامترهای طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های مس

شماره صفحه	زاویه ۲θ		ارتفاع قله		پهنای قله		فاصله صفحات بلوری (Å)
	قبل از پرتو دهی	پس از پرتو دهی	قبل از پرتو دهی	پس از پرتو دهی	قبل از پرتو دهی	پس از پرتو دهی	
۱۱۱	۴۳,۲۱۲۷	۴۳,۴۷۱۲	۲۲۱,۹۸	۳۵,۴۸	۰,۳۱۴۹	۰,۳۱۴۹	۱,۰۸۱۷۹
۲۰۰	۵۰,۳۸۸۹	۵۰,۵۵۷۸	۷۳۳,۱۲	۴۷۰,۶۷	۰,۳۱۴۹	۰,۲۳۶۲	۱,۸۰۵۳۷
۲۲۰	۷۳,۹۶۷۹	۷۴,۳۱۵۰	۲۳۸,۴۰	۱۲۲,۴۹	۰,۳۱۴۹	۰,۲۷۵۵	۱,۲۷۶۳۷
۳۱۱	۸۹,۸۷۱۵	۹۰,۰۱۹۷	۱۱۴,۹۷	۲۷,۷۰	۰,۳۵۴۲	۰,۳۳۶۰	۱,۰۸۹۱۸

جدول ۵. مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج مراجع

ردیف	مرجع	انرژی تخلیه (kJ)	نوع گاز	جنس فلز	ترک‌های میکرونی	اندازه تاولها (µm)	ذوب‌شدگی	زاویه قله‌های پراش
۱	این پژوهش	۱	هیدروژن	تنگستن	دید شده	۰,۱	دید نشده	افزایش یافته
۲	این پژوهش	۱	هیدروژن	مس	دید شده	≥ ۰,۳	دید شده	افزایش یافته
۳	[۶]	۲,۲	هلیوم	تنگستن	دید شده	—	دید شده	گزارش نشده
۴	[۱۲]	۲,۲	دوتریم	تنگستن	دید شده	۰,۲	گزارش نشده	افزایش یافته

این پژوهش نشان داد که برخورد یون‌ها و موج ضربه با سطح تنگستن و مس باعث افزایش میانگین اندازه بلورک‌های تنگستن به اندازه ۲۵٪ و میانگین اندازه بلورک‌های مس به اندازه ۳۳٪ شده است. این افزایش‌ها ناشی از بهم پیوستن بلورک‌های مجاور به یکدیگر است. به عبارت دیگر برخورد یون‌ها و موج ضربه با این سطوح باعث افزایش تحرک ساختارهای نانومتری و ایجاد بلورک‌هایی با اندازه بزرگ‌تر شده است [۳۰].

یکی از اهداف این پژوهش، مشخص کردن توانایی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 در پژوهش‌های مرتبط با فلزهای مطرح برای دیواره اول دستگاه‌های گداخت هسته‌ای بوده است. با توجه به این‌که این کار اولین پژوهش از نوع خود است که با استفاده از دستگاه MTPF-2 انجام شده، برای اطمینان از عملکرد سیستم، علاوه بر فلز مقاوم تنگستن از فلز نسبتاً نرم مس نیز استفاده شده است. نتایج نشان داد که انجام

تخلیه‌های با انرژی ۱ kJ در دستگاه MTPF-2 می‌تواند باعث ترک خوردن و تاول زدن سطح تنگستن، ذوب شدن سطح مس و افزایش میانگین اندازه بلورک‌های تنگستن شود و بنابراین می‌توان از این دستگاه جهت آزمایش مقاومت مواد پیشنهادی در ساخت دیواره اول رآکتورهای گداخت استفاده کرد.

مراجع

1. S. Wurster, N. Baluc. You, R. Pippan, *Recent progress in R&D on tungsten alloys for divertor structural and plasma facing materials*, *J. Nuc. Mat.* **442**, 181-189 (2013).
2. H. Bolt, et al, *Plasma facing and high heat flux materials – needs for ITER and beyond*, *J. Nuc. Mat.* **307**, 43-52 (2002).
3. M. Roedig, et al, *Investigation of tungsten alloys as plasma facing materials for the ITER divertor*, *Fus. Eng. Des.* **61-62**, 135-140, (2002)
4. B.I. Khripunov, V.S. Koidan, A.I. Ryazanov, *Study of Tungsten as a Plasma-facing Material for a Fusion Reactor*, *Phy. Pro.* **71**, 63-67 (2015).
5. H. Bolt, V. Barabash, W. Krauss, *Materials for the plasma-facing components of fusion reactors*, *J. Nuc. Mat.* **329-333**, 66-73 (2004).
6. S.H. Saw, et al, *Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus*, *Vac.* **144**, 14-20 (2017).
7. J. Brooks, et al, *Plasma-facing material alternatives to tungsten*, *Nuc. Fus.* **55**, 043002 (2015)
8. S. Javadi, et al, *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*, *Surf. Cot. Tech.* **313**, 73-81 (2017).
9. F.W. Meyer, P.S. Krstic, H. Hijazi, *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: Con. Ser.* **488**, 012036 (2014).
10. B.B. Cipiti, G.L. Kulcinski, *Helium and deuterium implantation in tungsten at elevated temperatures*, *J. Nuc. Mat.* **347**, 298-306 (2005).
11. M. Bhuyan, et al, *Plasma focus assisted damage studies on tungsten*, *Appl. Sur. Sci.* **264**, 674-680 (2013).
12. N.J. Dutta, N. Buzarbaruah, S.R. Mohanty, *Damage studies on tungsten due to helium ion irradiation*, *J. Nucl. Mat.* **452**, 51-56 (2014).
13. M.J. Inestrosa-Izurietta, E. Ramos-Moore, L. Soto, *Morphological and structural effects on tungsten targets produced by fusion plasma pulses from a table top plasma focus*, *Nuc. Fus.* **55**, 093011 (2015).
14. M. Habibi, *Experimental Study of the Anode Geometry and Insulator Material-Length Effect on Ion Beam Intensity in a Mather Type Plasma Focus Device*, *J. Nuc. Sci. & Technol.*, Vol. **38**, Issue 80, 10-17 (2017).
15. S. Lee, A. Serban, *Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch*, *IEEE.* **24**, 1101-1105 (1996).
16. S. Al-Hawat, et al, *Using Mather-type plasma focus device for surface modification of AISI304 Steel*, *Vac.* **80** (2010).
17. V. Gribkov, et al, *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*, *J. Phy. D.* **40**, 3592 (2007).
18. Cicuttin, et al., *Experimental results on the irradiation of nuclear fusion relevant materials at the dense plasma focus 'Bora' device*, *Nuclear Fusion*, **55**(6), 063037, (2015).
19. IAEA-Tecdoc-1708, *Integrated Approach to Dense Magnetized Plasmas Application in Nuclear Fusion Technology*, *IAEA, Vienna*, (2013).
20. A. Bernard, et al., *Scientific status of plasma focus research*, *J. Moscow Phys. Soc.* **8**, 93-170 (1998).
21. V. Gribkov, et al, *Interaction of high temperature deuterium plasma streams and fast ion beams with stainless steels in dense plasma focus device*, *J. Phy.* **36**, 1817 (2003).
22. J. Gunn, et al, *Surface heat loads on the ITER divertor vertical targets*, *Nuc. Fus.* **57**, 046025 (2017).
23. G. Kalinin, et al, *Structural materials for ITER in-vessel component design*, *J. Nuc. Mat.* **233**, 9-16 (1996).
24. V. Pimenov, S. Maslyaev, *Surface and bulk processes in materials induced by pulsed ion and plasma beams at Dense Plasma Focus devices*, *Nu. kl.* **51**(1), 71-78 (2006).
25. R. Rayaprolu, et al, *Simulation of neutron irradiation damage in tungsten using higher energy protons*, *Nuc. Mat. E.* **9**, 29-35, (2016).
26. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*, **2nd ed.**, *Wiley. Int.*, ISBN 978-0471005773.
27. R. Egerton, et al, *Basic questions related to electron-induced sputtering in the TEM*, *Ultramicroscopy*, Vol. **110**, Issues (8), 991-997 (2010).
28. Y. Kudriavtsev, et al, *Calculation of the surface binding energy for ion sputtered particles*, *Applied surface science*, Vol. **239**, Issues 3-4, 273-278 (2005).
29. S. Lee, *Radiative dense plasma focus computation package: RADPF, online available*, <http://www.plasmafocus.net/IPFS/modelpackage/File1RADPF.htm>., <http://www.intimal.edu.my/school/fas/UFLF> (2013).
30. N.J. Dutta, S.R. Mohanty, N. Buzarbauah, *Modification on graphite due to helium ion irradiation*, *Phys. Lett. A*, doi/10.1016/j.physleta. 2016.05.044 (2016).