

# بررسی اثرات یون های هیدروژن پرنرژی تولید شد در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 بر خواص سطحی و ساختاری مس و تنگستن

سید حبشی، میرمحمد رضا\*<sup>(۱)</sup> سیمپاری، مهدی<sup>(۲)</sup> رضایی، شاهرخ<sup>(۳)</sup> گودرزی، شروین

صدیقی، فریدالدین

۱- پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده پلازما و گداخت هسته ای

۲- دانشگاه امام علی (ع)، دانشکده علوم پایه

۳- دانشگاه امام علی (ع)، دانشکده مهندسی و پرواز

## چکیده:

در این مقاله اثرات تخریبی پروتون‌های پرنرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی سطح تنگستن و مس بررسی شده است. نمونه‌های تنگستن و مس همزمان با پروتون‌های پرنرژی حاصل از ۲۰ تخلیه الکتریکی، مورد تابش قرار گرفتند، تصاویر SEM از نمونه‌های مرجع و پرتودهی شده، نشان می‌دهند که در سطح تنگستن ترک، حفره و تاول ایجاد شده است. سطح مس نیز دچار تاول هایی شده است که اندازه آن‌ها حداقل ۱۰ برابر بزرگتر از تاول‌های سطح تنگستن است. از پراش پرتو ایکس نیز برای بررسی تغییرات ایجاد شده در ساختار بلوری تنگستن و مس استفاده گردید که نتایج آن نشان می‌دهند پارامترهای بلوری مانند مکان قله‌ها، شدت قله‌ها در هر دو فلز مس و تنگستن تغییر کرده است.

**کلمات کلیدی:** دستگاه پلاسمای کانونی، پروتون‌های پرنرژی، تنگستن، آنالیز پراش اشعه ایکس

## مقدمه :

تنگستن یکی از مواد پیشنهادی برای ساخت دیواره اول توکامک‌های ایترا<sup>۱</sup> و دمو<sup>۲</sup> است [۴-۱]. به صورت کلی، این فلز به علت دارا بودن خواصی همچون نقطه ذوب بالا، مقاومت زیاد در برابر کند و پاش<sup>۳</sup>، فعال شدن کم در هنگامی که در معرض شار نوترونی قرار میگیرد، و خواص ترمودینامیکی مناسب، همواره بعنوان یکی از مهم‌ترین مواد جهت استفاده در دیواره اول دستگاه‌های گداخت هسته‌ای مورد توجه بوده است [۷-۵]. طی سال‌های اخیر، در رابطه با اثر یون‌های پرنرژی 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 [۶، ۱۱، ۱۲]. دستگاه پلاسمای کانونی کم انرژی ساخته شده پژوهشکده گداخت کارایی منحصر به فردی در آزمایش مقاومت مواد مختلف در برابر تابش‌های پرنرژی یونی دارد. به

ITER<sup>۱</sup>

DEMO<sup>۲</sup>

Sputtering<sup>۳</sup>

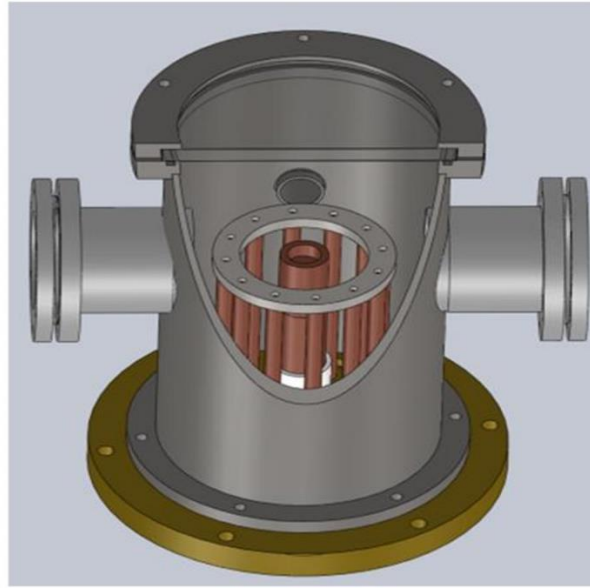
Neutron Activation<sup>۴</sup>

طوری که تمایز تغییرات ایجاد شده در سطح تنگستن به عنوان یک فلز سخت و مقاوم در برابر تابش در مقایسه با مس به عنوان یک فلز تخریب پذیر مشهود است.

به صورت کلی، دستگاه‌های پلاسمای کانونی، تشکیل شده‌اند از یک محفظه بسته (برای ایجاد خلا و سپس دمش گاز در آن)، و یک بانک انرژی خازنی. در داخل محفظه دستگاه، دو الکتروود هم‌محور (آند و کاتد) قرار دارند که توسط عایقی استوانه‌ای شکل از هم جدا شده‌اند. آند در مرکز قرار داشته و تعدادی میله‌های کاتد به طور 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 وصل 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 بوجود می‌آید. سپس، تحت تاثیر نیروی لورنتس  $\vec{J} \times \vec{B}$  (میدان مغناطیسی سمتی ناشی از وجود خود لایه جریان)، لایه جریان به سمت محور تقارن دستگاه حرکت کرده و پیشاپیش خود پلازما را نیز به جلو رانده و متراکم می‌نماید. به این ترتیب یک پلاسمای داغ و چگال که اصطلاحاً به پلاسمای تنگیده<sup>۱</sup> موسوم است، تشکیل می‌شود. دمای پلاسمای تنگیده در حدود ۲ keV، چگالی آن در حدود  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ، و محل قرارگیری آن در حدود ۱ cm بالاتر از مرکز سطح فوقانی آند است [۱۳].

## روش کار :

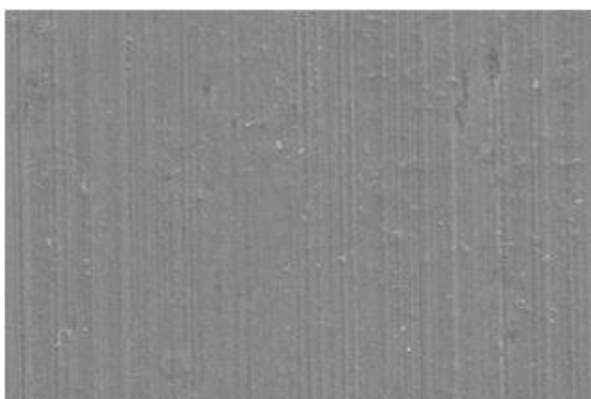
دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 از نوع مدر با بانک خازنی به ظرفیت  $13.5 \mu\text{F}$  و بیشینه ولتاژ تخلیه kV ۲۰ (معادل بیشینه انرژی تخلیه ۲/۷ kJ)، به عنوان منبع تولید پروتون‌های پرنرژی برای پرتودهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این دستگاه، هم طول آند و هم طول کاتد برابر ۱۴۵ mm، شعاع آند ۱۴/۵ mm، شعاع کاتد ۵ mm، طول مؤثر آند ۹۵ mm، طول عایق ۵۰ mm و تعداد میله‌های کاتد ۱۲ عدد می‌باشند. شکل ۱، ساختار الکتروودهای این دستگاه را نشان می‌دهد.



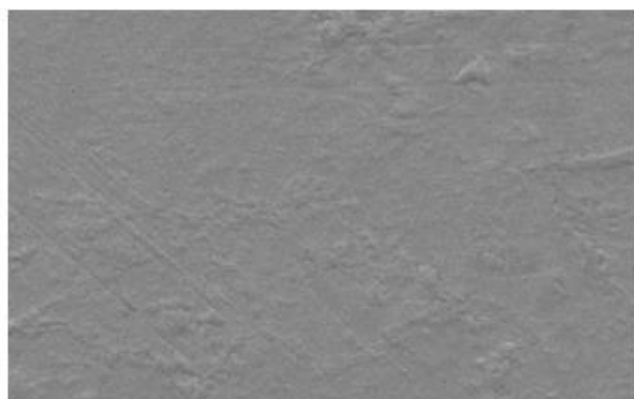
(ب)

(الف)

شکل ۱. الف) شماتیک ساختار دستگاه MTPF-2، ب) تصویر آند و میله‌های کاتد دستگاه نمونه‌های تنگستن با ابعاد  $1 \text{ mm} \times 10 \times 10$  و نمونه‌های مس با ابعاد  $1 \text{ mm} \times 5 \times 5$ ، بعد از صیقل دهی و تمیز شدن سطحشان (با استفاده از استون و آب مقطر)، بر روی سطح داخلی درب محفظه دستگاه پلاسمای کانونی، در فاصله ۸ سانتی متری از آند نصب شدند. فشار محفظه تا  $10^{-3}$  mbar پایین آورده شد و سپس گاز هیدروژن به محفظه تزریق شد و ۲۰ تخلیه‌های الکتریکی با ولتاژ ۱۲ kV، انجام شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شد. شکل ۲، تصاویر نمونه‌های مرجع را نشان می‌دهد.

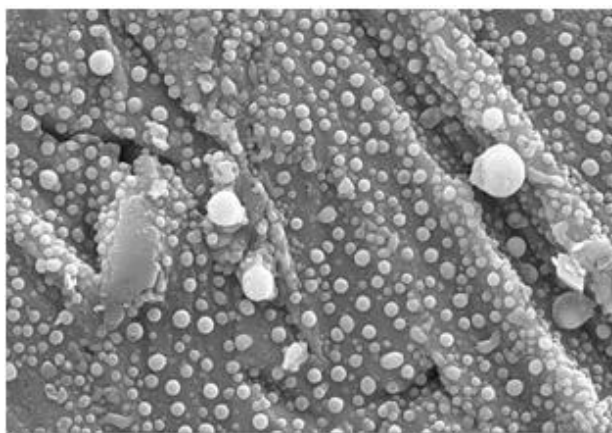


(ب)

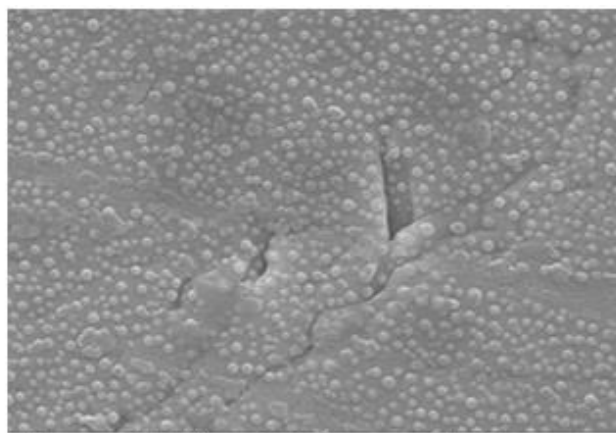


(الف)

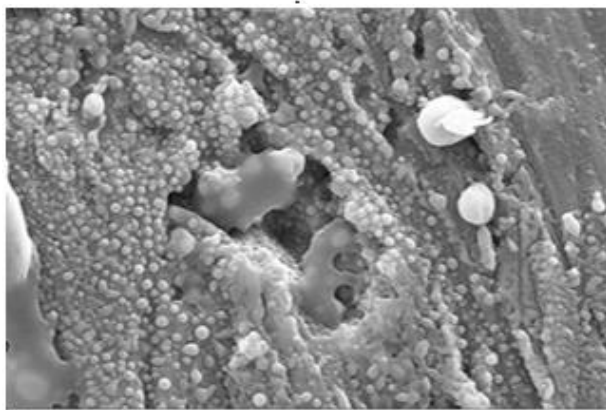
شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌های مرجع تنگستن (الف)، و مس (ب) شکل ۲، نشان می‌دهد که قبل از پرتو دهی، سطح نمونه‌های مس و تنگستن، تقریباً یکنواخت بوده و در آن‌ها، حفره و ترک وجود ندارد



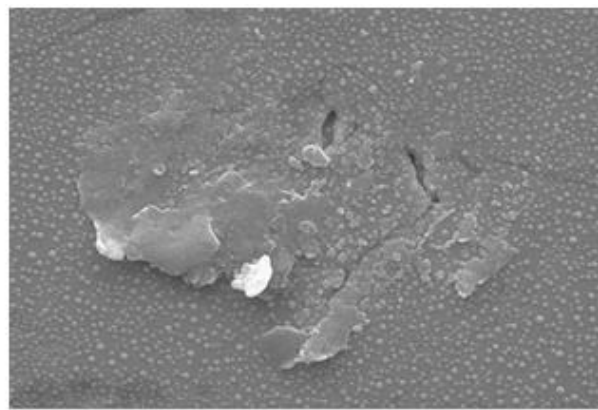
(ب)



(الف)



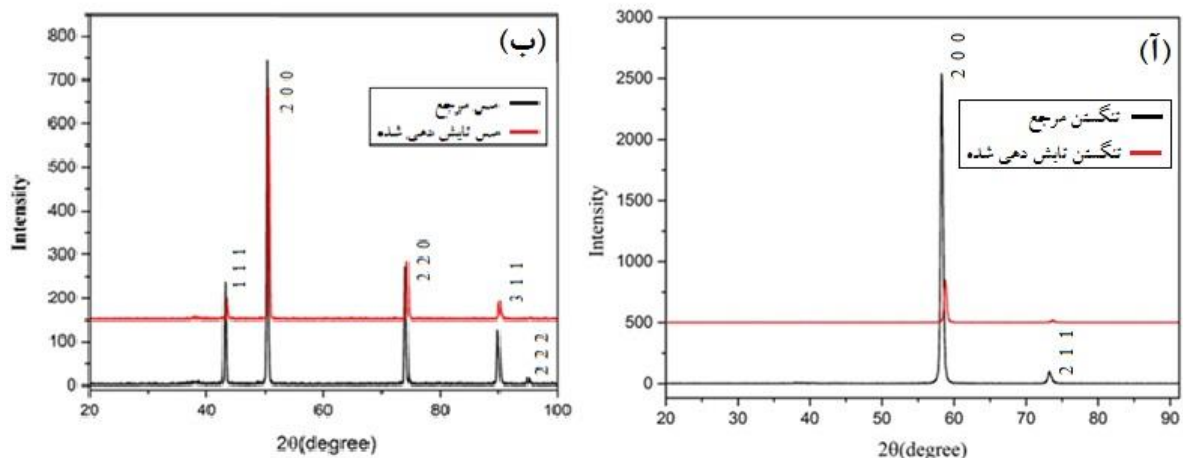
(د)



(ج)

شکل ۳، تصاویر میکروسکوپ الکترونی را بعد از برخورد پروتون های پر انرژی را نشان می دهد. شکل های سمت راست، تصاویر نمونه تنگستن و شکل های سمت چپ، تصاویر نمونه مس می باشند.

شکل های فوق نشان می دهند که هر دو نوع سطح تاول زده اند و دچار ترک هم شده اند. شکل ۳-د، نشان می دهد که انتقال انرژی موج ضربه و یون های پروتون به سطح مس، باعث ذوب شدگی، کندوپاش و ایجاد حفره شده است. در سطح تنگستن، تغییرات ناشی از ذوب شدگی، دیده نمی شود ولی شکل ۳-ج نشان می دهد که سطح تنگستن پوسته پوسته شده است. از آنالیز پراش پرتو ایکس برای بررسی تاثیر برخورد یون ها و موج ضربه بر خواص ساختاری و بلوره ای تنگستن و مس استفاده شد. شکل ۴ نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه های مرجع و پرتو دیده تنگستن و مس را نشان می دهد. در شکل فوق، کاهش شدت قله ها و شیفت نیز آن ها به سمت زوایای بزرگتر دیده می شود. کاهش چشمگیری در ارتفاع قله ها بوجود آمده، و فاصله صفحات نیز کاهش پیدا کرده است. این تغییرات موید دور شدن نمونه از حالت کریستالی و نزدیک شدن به حالت آمورف می باشد.



شکل ۴. طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های تنگستن.

در این آزمایش‌ها، دلیل اصلی ایجاد تغییر حالت فلز (پس از تابش دهی) می‌تواند افزایش تنش‌های درونی<sup>۱</sup>، و ایجاد حفره‌های نقطه‌ای باشد. تنش‌های درونی، ناشی از خنک شدن سریع سطح نمونه‌ها و یا ذوب شدگی نقطه‌ای نواحی تابش دهی شده، است [۱۱]. رابطه زیر که به رابطه شرر<sup>۲</sup> معروف است، میانگین اندازه بلورک‌های فلز (یا کریستالیت‌ها)، را بدست می‌دهد.

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta_{2\theta} \cdot \cos\theta}$$

در رابطه فوق  $D$  میانگین اندازه بلورک‌های فلز،  $k$  ضریب شکل بلور (برای تنگستن ۰/۹۴)،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس (در این حالت برابر ۱/۵۴۰۵۹ آنگسترم)،  $\theta$  زاویه براگ<sup>۳</sup> و  $\beta_{2\theta}$  پهنای عرض پالس (برحسب رادیان) در میانه قله<sup>۴</sup> می‌باشند. استفاده از این رابطه، و اعداد مربوط به قله بلندتر (قله ۲۰۰)، میانگین اندازه بلورک‌های نمونه مرجع و نمونه تابش دیده تنگستن را به ترتیب ۲۴/۱ nm و ۳۰/۲ nm بدست می‌دهد. به عبارت دیگر، پس از تابش، میانگین اندازه بلورک‌های تنگستن ۲۵٪ افزایش پیدا کرده است. همچنین میانگین اندازه بلورک‌های نمونه مرجع و نمونه پرتو دیده مس، را به ترتیب برابر ۲۹/۱ nm و ۳۸/۸ nm بدست می‌دهد. به عبارت دیگر، پس از تابش، اندازه بلورک‌های مس ۳۳٪ افزایش پیدا کرده است.

نتیجه گیری

Internal stresses<sup>۱</sup>

Scherrer's formula<sup>۲</sup>

Bragg's angle<sup>۳</sup>

Full Width at Half Maximum, FWHM<sup>۴</sup>

در این پژوهش اثرات پروتون های پرانرژی بر روی مس و تنگستن بررسی شد، آنالیزهای انجام شده بر روی نمونه های مرجع و تابش دهی شده مس و تنگستن در ۲۰ تخلیه الکتریکی در هیدروژن، نشان می دهد که در اثر برخورد یون های پرانرژی هیدروژن و موج ضربه تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی با سطوح این فلزات، تغییرات عمده ای در سطح آنها ایجاد می شود. نتایج میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی نشان می دهند که در ۲۰ تخلیه الکتریکی در هیدروژن، تاول های مترکم و با اندازه تقریبی ۰.۵ میکرومتر در سطح مس تولید شده است به طوری که اندازه این تاول ها حداقل ۱۰ برابر تاول های ایجاد شده بر سطح تنگستن می باشد. همچنین در سطح مس در اثر انتقال گرما، قسمت هایی از سطح ذوب شده و سطح ناهموار شده است. آنالیز طیف پراش پرتو ایکس نشان می دهد که تابش یون های پرانرژی بر روی تنگستن و مس، باعث تغییر مکان قله ها به سمت زوایای بالاتر نسبت به مکان قله ها در نمونه مرجع شده است این تغییرات در سایر پژوهش های مشابه مشاهده شده است، که ناشی از تنش فشاری است که بر روی نمونه های تنگستن و مس وارد شده است. به عبارت دیگر تخریب های ایجاد شده توسط پروتون های پرانرژی، فقط محدود به سطح ماده نبوده بلکه بر اثر تنش فشار ایجاد شده، فاصله صفحات بلوری تنگستن و مس کاهش یافته است و به این ترتیب ساختار کریستالی نیز دچار دگرگونی شده است.

#### مراجع:

- [۱] S. Wurster, N. Baluc, M. Battabyal, T. Crosby, J. Du, C. García-Rosales, A. Hasegawa, A. Hoffmann, A. Kimura, H. Kurishita, R.J. Kurtz, H. Li, S. Noh, J. Reiser, J. Riesch, M. Rieth, W. Setyawan, M. Walter, J.H. You, R. Pippan, *Journal of Nuclear Materials*, 442 (2013) S181-S189.
- [۲] H. Bolt, V. Barabash, G. Federici, J. Linke, A. Loarte, J. Roth, K. Sato, *Journal of Nuclear Materials*, 307-311 (2002) 43-52.
- [۳] M. Roedig, W. Kuehnlein, J. Linke, M. Merola, E. Rigal, B. Schedler, E. Visca, *Fusion Engineering and Design*, 61-62 (2002) 135-140.
- [۴] B.I. Khripunov, V.S. Koidan, A.I. Ryazanov, V.M. Gureev, S.N. Kornienko, S.T. Latushkin, A.S. Rupyshev, E.V. Semenov, V.S. Kulikauskas, V.V. Zatekin, *Physics Procedia*, 71 (2015) 63-67.
- [۵] H. Bolt, V. Barabash, W. Krauss, J. Linke, R. Neu, S. Suzuki, N. Yoshida, A.U. Team, *Journal of Nuclear Materials*, 329-333 (2004) 66-73.
- [۶] S.H. Saw, V. Damideh, J. Ali, R.S. Rawat, P. Lee, S. Lee, *Vacuum*, 144 (2017) 14-20.
- [۷] J. Brooks, L. El-Guebaly, A. Hassanein, T. Sizyuk, *Nuclear Fusion*, 55 (2015) 043002.
- [۸] S. Javadi, M. Ghoranneviss, R.S. Rawat, A. Salar Elahi, *Surface and Coatings Technology*, 313 (2017) 73-81.
- [۹] F.W. Meyer, P.S. Krstic, H. Hijazi, M.E. Bannister, J. Dadras, C.M. Parish, H.M.M. Iii, *Journal of Physics: Conference Series*, 488 (2014) 012036.
- [۱۰] B.B. Cipiti, G.L. Kulcinski, *Journal of Nuclear Materials*, 347 (2005) 298-306.
- [۱۱] M. Bhuyan, S.R. Mohanty, C.V.S. Rao, P.A. Rayjada, P.M. Raole, *Applied Surface Science*, 264 (2013) 674-680.
- [۱۲] N.J. Dutta, N. Buzarbaruah, S.R. Mohanty, *Journal of Nuclear Materials*, 452 (2014) 51-56.
- [۱۳] م. حبیبی، علوم و فنون هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران، ۸۰ (۱۳۹۶) ۱۰-۱۶.