

نیتراسیون پلاسمایی سطح با استفاده از یون‌های پر انرژی نیتروژن تولید شده در

دستگاه پلاسمای کانونی

میرمحمد رضا سیدحبشی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

چکیده

در این پژوهش تاثیر تابش یون‌های نیتروژن بر خواص سطحی و ساختار فلز تیتانیوم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌های تیتانیومی در دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول با یون‌های نیتروژن گسیل یافته از آن در ۵، ۱۰ و ۲۰ تخلیه خازنی دستگاه پلاسمای کانونی مورد تابش قرار داده شد. نمونه‌ها قبل و بعد از تابش دهی تحت بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی، میکروآنالیز و پراش پرتو ایکس قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با تابش یون‌های نیتروژن بر سطح تیتانیوم، تاول‌های متراکم و ناهمواری در سطح نمونه‌ها ایجاد می‌شود که با افزایش تعداد تخلیه خازنی، تراکم و اندازه آنها افزایش می‌یابد. در سطح نمونه‌های تابش شده، نواحی کندوپاش بر اثر برخورد یون‌های پرانرژی نیتروژن و افزایش دمای سطح تیتانیوم پدید آمده است. نتایج پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که با تابش یون‌های نیتروژن به تیتانیوم، پیک‌های پراش پرتو ایکس دچار تغییراتی شده و مکان قله‌ها به سمت زوایای کوچکتر جابجا شده است؛ این امر نشان دهنده کرنش ایجاد شده در نمونه‌ها به دلیل انتقال گرمای زیاد به سطح در زمان تابش یون‌ها بوده است. علاوه بر این، تابش یون‌های نیتروژن بر تیتانیوم باعث کاهش شدت قله‌ها شده است. نتایج حاصل از EDX نشان می‌دهد که با تابش یون‌های نیتروژن بر سطح تیتانیوم، به دلیل تبخیر از سر آند دستگاه پلاسمای کانونی، مقدار بسیار اندکی مس بر سطح فلز رسوب کرده است.

واژه‌های کلیدی: تیتانیوم، ساختار سطح، پلاسمای کانونی، یون‌های نیتروژن، کاشت یون.

Plasma nitration of the surface using high energy nitrogen ions produced in the plasma focus device

Abstract

In this research, the effect of nitrogen ion radiation on the surface properties and structure of titanium metal was investigated. For this purpose, titanium samples were subjected to 2.7 kJ focal plasma device with nitrogen ions emitted from it in 5, 10 and 20 shots of the plasma device. The focus was irradiated. SEM, EDX and XRD analyzes were taken from titanium samples before and after irradiation. The results of SEM show that with the irradiation of ions on the surface of titanium, rough blisters are created on the surface of the specimens; the density and size of these blisters increase with the number of shots. Also, on the surface of the irradiated samples, sputtered areas were observed, owing to the increase in the temperature of the titanium surface by the impact of high-energy nitrogen ions. The X-ray diffraction results showed that with the irradiation of nitrogen ions onto titanium, the diffraction pattern has undergone changes in the peak locations; the peaks shifted to smaller angles, due to the stress and strains created in the surface layers as a result of high heat transfer to titanium during the irradiation of nitrogen ions. In addition, the irradiation of nitrogen ions on titanium caused a decrease in the height of the peaks. The results obtained from EDX also revealed that by irradiating nitrogen ions on the titanium, a small amount of copper has been deposited on the titanium surface due to evaporation from the anode head of the focal plasma device.

Keywords: Titanium, Surface structure, Plasma focus, Nitrogen ions, Ion implantation.

E-mail of Corresponding author: mhabashi@aeoi.org.ir

مقدمه

در تولید ترکیبات روی سطح آلیاژهای فلزی به روش فیزیکی دستگاه‌های متنوعی توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است که از نظر انرژی یون‌های تولیدی و کارکرد به صورت پالسی یا پیوسته و در نهایت مکانیزم تولید پلاسمای نیتروژن با هم تفاوت دارند. یکی از دستگاه‌های بسیار کارآمد در بحث مربوط به کاشت یون در مواد، دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد. این دستگاه با کارکرد پالسی و تولید یون‌های پر انرژی در حدود 500 keV کاربردهای بسیاری در حوزه پردازش مواد و کاشت یون پیدا کرده است.

مکانیزم شتاب‌گیری یون‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی به این صورت است که در اثر تخلیه بانک خازنی روی آند و ایجاد اختلاف پتانسیل مابین کاتد و آند، گاز داخل محفظه دستگاه پلاسمای کانونی دچار شکست الکتریکی می‌شود و رشته‌های جریان بین آند و کاتدها برقرار می‌شوند. این لایه جریان در اثر نیروی لورنتس به سمت انتهای آند حرکت می‌کند و زمانی که به بالای سر آند می‌رسد، توسط نیروی بین رشته‌های جریان هم جهت، به سمت محور مرکزی آند جمع می‌شود و تشکیل پینچ می‌دهند. پینچ تشکیل شده دارای چگالی بسیار بالا، دمای خیلی زیاد و عمر بسیار کوتاه بوده و ناپایدار است. بر اثر ناپایداری $m = 0$ پینچ فروپاشی می‌کند و الکترون‌های به دام افتاده در فضای پینچ با انرژی زیاد به سطح آند برخورد کرده و باعث تولید پرتو ایکس سخت و بخار ذرات در بالای سر آند می‌شود. پس از فروپاشی پلاسمای یون‌ها نیز با انرژی‌های نسبتاً زیاد به سمت مخالف الکترون‌ها گسیل می‌شوند. گستره انرژی باریکه‌های یون در دستگاه پلاسمای کانونی که با انرژی ذخیره شده در محدوده چند کیلوژول تا مگا ژول عمل می‌کنند، در محدوده ده‌ها کیلو الکترون‌ولت تا چندین مگا الکترون‌ولت اندازه‌گیری شده است [۵-۱۰].

تیتانیوم از فلزاتی است که در صنعت به دلیل دار بودن خواص منحصر به فرد مانند مقاومت در برابر خوردگی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. از مزایای این فلز می‌توان به نقطه جوش بالا، پایداری شیمیایی و زیست سازگاری اشاره نمود [۱]. عوامل بسیاری در خواص سطح تیتانیوم و تیتانیوم نیتريد تولید شده به روش‌های فیزیکی موثر است، از جمله این پارامترها می‌توان به میزان غلظت نیتروژن، دمای سطح تیتانیوم و انرژی یون‌های نیتروژن اشاره کرد. در همین راستا پژوهشگران بسیاری تا کنون با استفاده از دستگاه‌های مختلف و در شرایط کاری گوناگون از نظر دما، فشار کاری، انرژی یون‌های نیتروژن، زمان پرتو دهی و همچنین شار یون‌های نیتروژن، اقدام به تولید و مشخصه‌یابی نیتريد تیتانیوم کرده‌اند.

تیتانیوم نیتريد به طور کلی طی فرآیندهای فیزیکی یا شیمیایی تولید می‌شود. تولید تیتانیوم نیتريد به روش فیزیکی مبتنی بر اندرکنش پلاسمای نیتروژن با سطح تیتانیوم یا ایجاد بخار فیزیکی و لایه نشانی تیتانیوم نیتريد می‌باشد.

پیساروه^۱ و همکارانش تیتانیوم نیتريد را در دماهای مختلف و در فشار ۳ الی ۴/۵ میلی‌بار پلاسمای نیتروژن تولید کردند. نتایج کار آنها نشان داد که با افزایش دما، سختی سطح افزایش می‌یابد به طوری که در دمای ۹۰۰ درجه سختی سطح تقریباً ۱/۷ برابر نمونه شاهد بدست آمد. در حالی که با افزایش عمق از سختی نمونه کاسته می‌شد، بنابراین می‌شود نتیجه گرفت که میزان سختی سطح بسیار وابسته به میزان نیتروژن کاشته شده و نفوذ آن در سطح نمونه می‌باشد [۳].

در پژوهشی دیگر یوشیموتسو^۲ و همکاران با استفاده از جت پلاسمای پالسی با گازهای ترکیبی نیتروژن و هیدروژن در فشار اتمسفر سختی تیتانیوم را افزایش دادند، آنها موفق شدند که لایه تیتانیوم نیتريد را بر سطح تیتانیوم ایجاد کنند [۴].

¹ Pisarev² Yoshimitsu

در پژوهش‌های اخیر نحوه کار به این صورت بود که لایه نازکی از تیتانیوم نیتريد روی سطح مورد نظر توسط دستگاه پلاسمای کانونی ایجاد می‌کردند؛ به این ترتیب که در بالای سر آند، تیتانیوم قرار داده می‌شد و در اثر تشکیل پینچ و برخورد الکترون‌های نسبی با سر آند، تیتانیوم تبخیر شده و با ایجاد ترکیب شیمیایی با اتم‌های نیتروژن موجود در محفظه روی سطح زیر لایه قرار می‌گرفت. در این پژوهش از آند توخالی استفاده شده است که میزان تبخیر از سر آند به حداقل برسد و در مقابل یون‌های پر انرژی نیتروژن مستقیماً به سطح نمونه تیتانیوم تابیده شده می‌شود. نتایج آنالیزها مربوط به اثرات سطحی تابش یون‌های نیتروژن بر زیر لایه تیتانیوم می‌باشد

مواد و روش انجام تحقیق

دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول از نوع مدر^۶ با نام MTPF-2 مجهز به بانک خازنی به ظرفیت $13/5 \mu F$ ، حداکثر ولتاژ شارژ $20 kV$ ، اندوکتانس $158 nH$ و جریان تخلیه $100 kA$ به عنوان منبع تولید یون‌های نیتروژن پر انرژی برای پرتودهی نمونه‌ها مورداستفاده قرار گرفت. ساختار الکترودهای این دستگاه پلاسمای کانونی در شکل ۱ نشان داده شده است.

طول آند و کاتد $145 mm$ ، شعاع آند $14/5 mm$ ، شعاع کاتد $5 mm$ ، طول مؤثر آند $95 mm$ ، طول عایق $50 mm$ و تعداد 12 عدد کاتد به صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته اند. در نوک آند حفره‌ای به شعاع $10 mm$ و عمق $10 mm$ به منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است.

پژوهشگران تحقیقات گسترده‌ای در این حوزه انجام داده‌اند. محبوب^۱ و همکارانش سیلیکون مونوکریستال را با یون‌های نیتروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی $1/45$ کیلوژول مورد تابش قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد که با افزایش میزان کاشته شدن یون نیتروژن در داخل سیلیکون، ساختار آن از حالت کریستالی به حالت آمورف تغییر فاز می‌دهد [۱۱]. راوات^۲ و همکارانش لایه نازک تیتانیوم نیتريد را با موفقیت روی استیل 304 لایه نشانی کردند. آنها لایه نازک تیتانیوم نیتريد را در شرایط گوناگون مانند فواصل مختلف از آند، تعداد تخلیه خازنی و در زوایای متفاوت روی زیر لایه استیل ایجاد کردند [۱۲]. در تحقیق دیگر فانی^۳ و همکاران لایه نازک تیتانیوم نیتريد را روی زیر لایه استیل 304 در زوایای مختلف ایجاد کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که تغییر زاویه قرارگیری زیر لایه نسبت به آند در مورفولوژی و ساختار لایه‌های ایجاد شده موثر بوده است [۱۳]. در پژوهشی دیگر حسین نجاد^۴ و همکارانش لایه نازک تنگستن نیتريد را در زوایای مختلف و تعداد تخلیه خازنی‌های مختلف دستگاه پلاسمای کانونی روی زیر لایه استیل 304 لایه نشانی کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که بهترین زاویه قرارگیری زیر لایه برای لایه نشانی صفردرجه نسبت به آند می‌باشد [۱۴]. شیرازی^۵ و همکارانش مولیبدن نیتريد را بر زیر لایه شیشه‌ای لایه نشانی کردند نتایج پژوهش آنان نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه خازنی اندازه نانوذرات لایه نشانی شده مولیبدن نیتريد روی سطح افزایش می‌یابد و بر زبری سطح نیز افزوده می‌شود [۱۵].

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد دستگاه پلاسمای کانونی به دلیل تولید یون‌های پر انرژی، در گستره انرژی چند ده الکترون ولت تا چند مگا الکترون ولت، یکی از پیش‌روترین دستگاه‌ها در اصلاح مواد محسوب می‌شود [۶،۷،۱۶،۱۷].

¹ Mehboob Sadiq

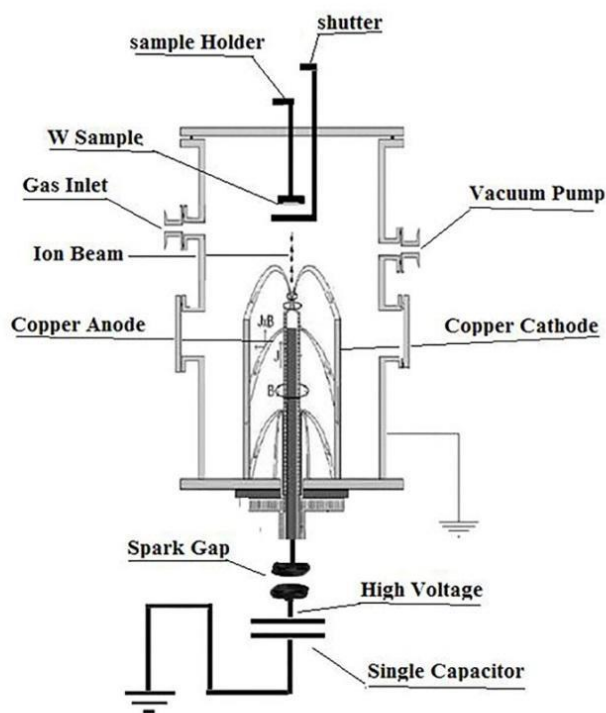
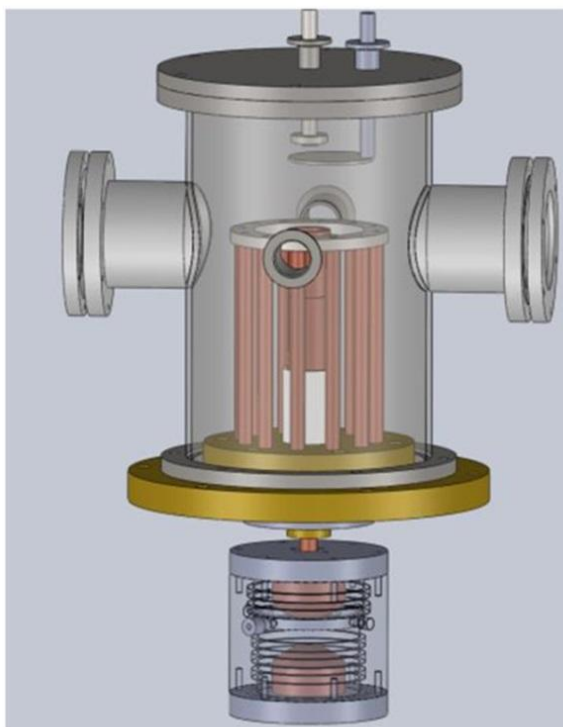
² R.S. Rawat

³ Fani

⁴ Hosseinnejad

⁵ Shirazi

⁶ Mather type plasma focus



شکل ۱. شماتیک دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2

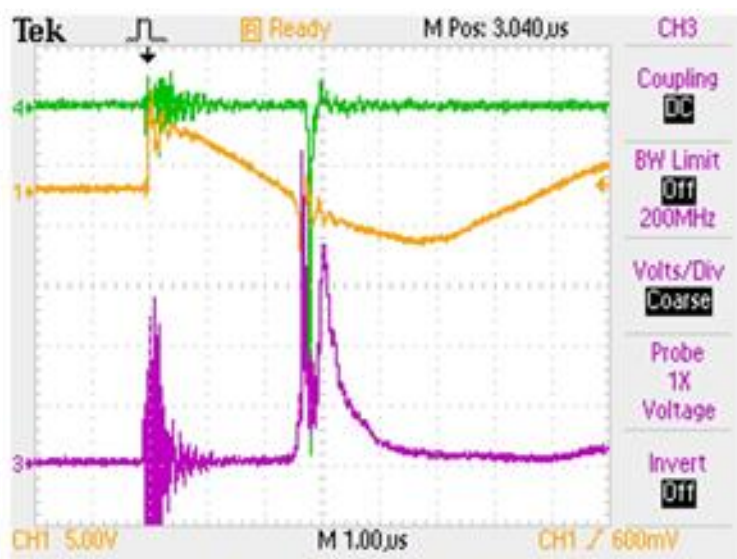
تعیین شرایط بهینه کاری دستگاه پلاسمای کانونی برای گسیل یون نیتروژن

یون‌های تولید شده در ستون پینچ پلاسمای کانونی در زمینه کاشت یون و پردازش سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، تشخیص، اندازه‌گیری و کنترل مشخصات یون‌های تولید شده در این دستگاه مانند انرژی، چگالی و یکنواختی در دستگاه پلاسمای کانونی ضروری است. برای این منظور از ابزارهای تشخیصی استفاده می‌شود که یکی از آنها آشکارساز کاپ فارادی است.

ابتدا برای دستیابی به محدوده‌ی مناسب فشار گاز نیتروژن در فشارهای مختلف گاز نیتروژن و ولتاژهای کاری ۱۰ kV الی ۱۳ تخلیه‌های مختلفی انجام شد و نتایج نشان داد که ولتاژ شارژ خازن و فشار مناسب گاز نیتروژن برای دستیابی به شرایط بهینه و پینچ‌های متوالی با عمق خوب به ترتیب ۰/۴ mbar و ولتاژ ۱۲ kV می‌باشد. نمونه تیتانیوم به ابعاد ۱۰ میلی‌متر در ۱۰ میلی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر تهیه شد، سطح نمونه‌ها قبل از تابش دهی با استفاده از سنباده صیقلی شد و در کوره آنیل شدند. نمونه‌های تیتانیوم در فاصله ۶ سانتیمتری از سر آند و در (۲۰، ۱۰، ۵) تخلیه خازنی تحت تابش یون‌های نیتروژن پر انرژی قرار گرفتند.

کیلوژول با گاز نیتروژن، ولتاژ خازنی ۱۴kV و فشار ۳ تا ۴/۵ تور می‌باشد. نمودار بنفش مربوط به سیگنال آشکارساز فنجان فارادی می‌باشد؛ حداکثر مساحت سطح زیر نمودار جریان فارادی کاپ متناسب با چگالی یون‌ها می‌باشد. در شکل (۲) جریان تخلیه و مشتق جریان تخلیه نشان داده شده است.

شد. با استفاده از این سیگنال‌ها در طی تخلیه‌های خازنی مختلف گاز نیتروژن، شرایط کاری بهینه دستگاه (شامل فشار گاز مناسب و ولتاژ تخلیه بانک خازنی) برای گسیل یون نیتروژن برآورد شد. با بررسی سیگنال‌های بدست آمده از فارادی کاپ، مشاهده شد که شرایط بهینه برای در دستگاه پلازما کانونی ۲/۷



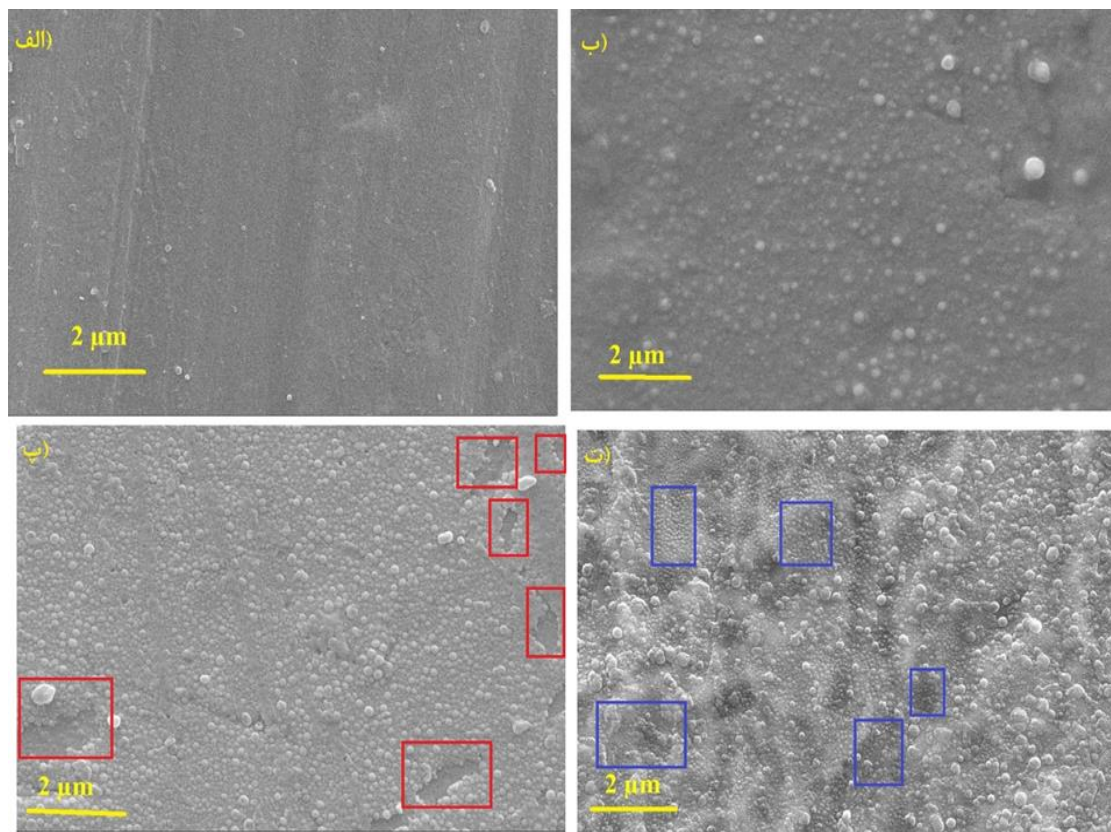
شکل ۲. خروجی اسپیکسکوپ در یک تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی: سیگنال سبزرنگ نمودار پرتو ایکس سخت، نمودار نارنجی رنگ، نمایانگر مشتق جریان تخلیه و نمودار بنفش رنگ نمایانگر جریان یونی اندازه گیری شده توسط فارادی کاپ.

نتایج و بحث

نتایج میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های تیتانیوم

تابش دهی (شکل ۳ الف) نشان دهنده‌ی سطح صاف و هموار نمونه است. با تابش یون‌های نیتروژن بر سطح تیتانیوم تاول‌ها و ناهمواری‌هایی در سطح نمونه‌ها به وجود می‌آید که می‌تواند یکی از علل تغییر در سختی سطح نمونه‌ها باشد. تصاویر شکل ۳ ب، پ و ت مربوط به سطح نمونه‌های تیتانیوم تابش دهی شده به ترتیب در ۵، ۱۰ و ۲۰ تخلیه خازنی یون‌های نیتروژن است.

یون‌های پر انرژی نیتروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی برای تابش دهی سطح تیتانیوم مورد استفاده قرار گرفتند. بعد از تابش دهی نمونه‌های تیتانیوم در ۵، ۱۰ و ۲۰ تخلیه با گاز نیتروژن از براقی سطح نمونه‌ها کاسته شد و تغییرات ایجاد شده در سطح نمونه‌ها با چشم غیر مسلح نیز قابل رویت بود. تصویر SEM از سطح نمونه تیتانیوم قبل از



شکل ۳. تصاویر SEM از نمونه‌های تیتانیومی؛ الف) قبل از تابش دهی، ب) بعد از ۵ تخلیه خازنی، پ) بعد از ۱۰ تخلیه خازنی، ت) بعد از ۲۰ تخلیه خازنی دستگاه پلاسمای کانونی.

است که تبخیر فیزیکی یا کندوپاش نامیده می‌شود. این مکانیزم چندان باعث تغییر شکل ظاهری سطح فلز نمی‌شود. در فرایند کندو پاش وقتی که یک یون پر انرژی وارد سطح ماده می‌شود، نیروی کولنی بین هسته‌ها باعث انتقال انرژی و پراکندگی هسته‌ها می‌شود. اگر پراکندگی در زاویه ۱۸۰ درجه رخ دهد، بیشترین انتقال انرژی صورت می‌گیرد. بیشترین انرژی منتقل شده به هسته با جرم M برابر است با؛

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

که در آن E_0 انرژی پروتون و mc^2 انرژی معادل جرم حالت سکون پروتون است. با افزایش انرژی پروتون و کاهش جرم هسته هدف، E_{\max} افزایش می‌یابد. اگر E_{\max} از انرژی

در مورد فیزیک اندرکنش باریکه نیتروژن پر انرژی پلاسمای کانونی با سطح فلز، سه مکانیزم را می‌توان مطرح نمود. الف) انتقال انرژی توسط موج ضربه و باریکه یونی به سطح فلز، افزایش دمای سطح، ذوب شدن و سپس پراکندگی مذاب بر اثر برخورد باریکه نیتروژن. ب) افزایش دمای سطح فلز و تصعید آن، ج) کندوپاش^۱ فیزیکی توسط یون‌های نیتروژن. اینکه کدامیک از این مکانیزم‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی غالب هستند به جنس فلز، انرژی یونی و میزان تغییر دمای سطح فلز بستگی دارد.

عملکرد مکانیزم‌های الف) و ب) به دماهای ذوب و جوش مواد مورد بررسی بستگی دارد. مکانیزم سوم، ضربه فیزیکی حاصل از بمباران یون‌های پر انرژی و کنده شدن ذرات فلزی

¹ Sputtering

بعد از کندوپاش، دوباره با یون‌های نیتروژن مورد تابش قرار گرفته‌اند و حباب‌های کوچکی در حال رشد است که نشان می‌دهد دلیل اصلی ایجاد ناهمواری در سطح تیتانیوم تابش یون‌های نیتروژن می‌باشد. علت به وجود آمدن حباب و تاول در سطح تیتانیوم ناشی از تجمع اتم‌های نیتروژن در نقص‌های شبکه‌ای^۴ مانند نقص بین‌نشینی^۵، نابه‌جایی‌ها در شبکه^۶ و جاهای خالی^۷ است. در اثر تابش‌دهی تیتانیوم، دمای سطح تیتانیوم تا چند هزار درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند.

جابجایی شبکه هدف^۱ (E_d) بزرگ‌تر باشد، پراکنندگی در زاویه‌های بزرگ می‌تواند هسته را کاملاً جابجا کند و یا حتی آن را به بیرون از ماده پرتاب کند. کمترین مقدار E_0 که می‌تواند منجر به E_{max} معادل با E_d شود، انرژی آستانه کندوپاش نامیده می‌شود. مقدار انرژی آستانه کندوپاش برای مواد با جرم اتمی بزرگ‌تر از ۱۲ با دقت بسیار بالا توسط رابطه زیر که توسط اگرتون و همکارانش^۲ ارائه شده قابل محاسبه است [۱۸].

$$E_{min}^0 = 511(keV) \left\{ \left[1 + \frac{A \cdot E_d}{561eV} \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}$$

با افزایش عدد جرمی و E_d انرژی آستانه کندوپاش افزایش می‌یابد. E_d از مشخصه‌های فیزیکی یک ماده است که در مقاله کودریافتسیف^۳ و همکارانش اطلاعات کاملی در این زمینه موجود است [۱۹]. در همین راستا در شکل ۳-ت نواحی دیده می‌شود (مستطیل‌های آبی رنگ) که تاول‌های کوچکی در حال جوانه‌زدن مربوط به نواحی موجود در سطح نمونه تیتانیوم هستند که با افزایش تعداد تخلیه خازنی اندازه تاول‌ها و تراکم آنها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد تخلیه خازنی در سطح نمونه تیتانیوم قسمت‌هایی دیده می‌شود که سطح دچار کندوپاش شده و با مستطیل‌های قرمز نشان داده شده است. این کندوپاش‌ها در اثر افزایش دمای سطح تیتانیوم و برخورد یون‌های پر انرژی نیتروژن صورت گرفته است. در شکل ۴ نیز نواحی که با دایره‌های قرمز نشان داده شده است مربوط به قسمت‌هایی از سطح تیتانیوم است که دچار کندوپاش فیزیکی ناشی از اصابت یون‌های نیتروژن ایجاد شده است.

⁴ Crystalline defects

³ Interstitials

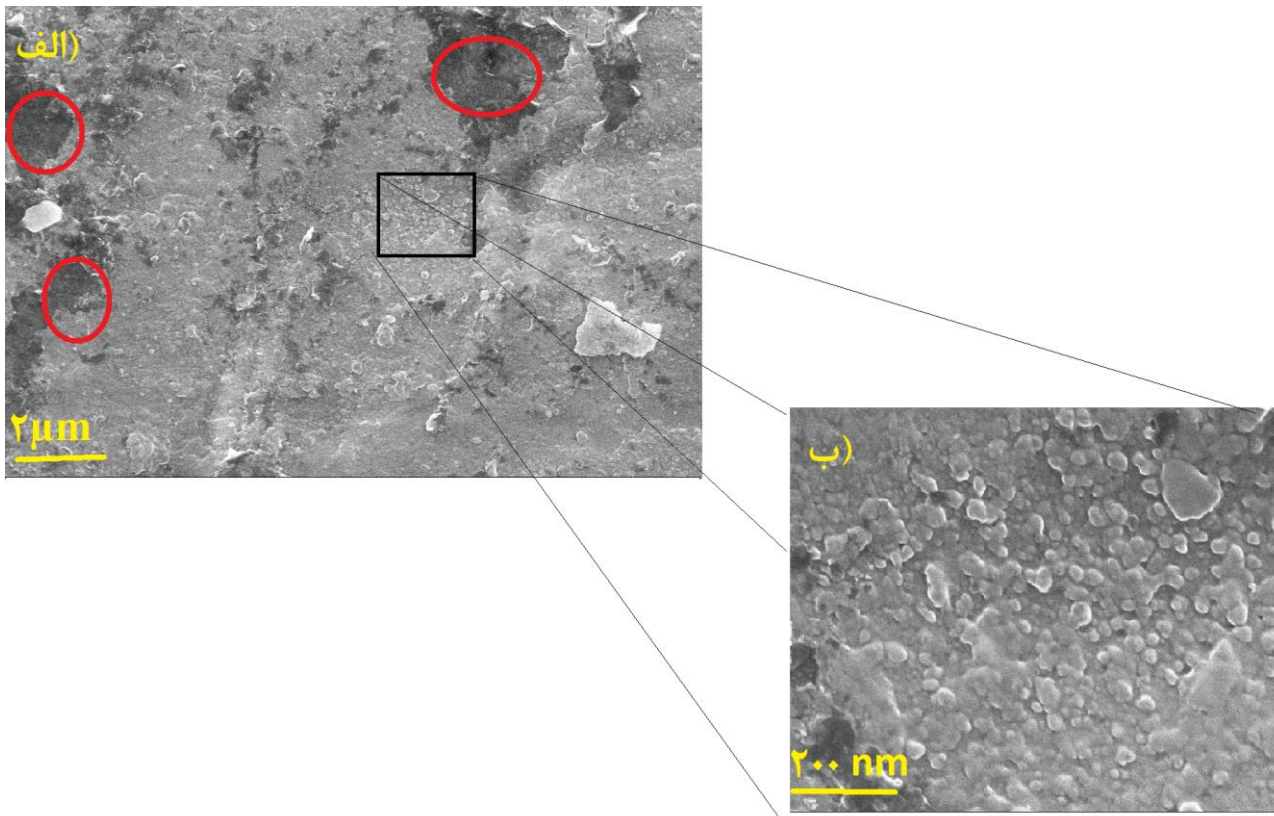
⁶ lattice dislocations

⁷ Vacancies

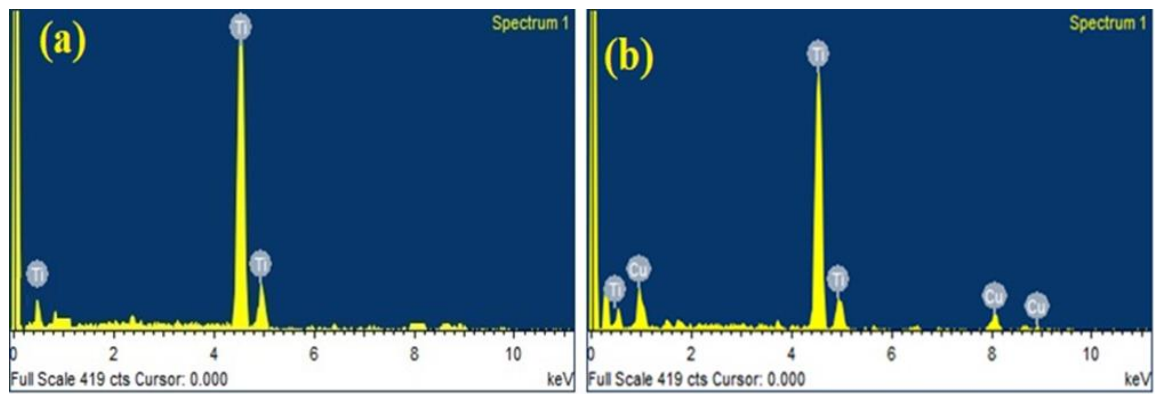
¹ Displacement energy

² Egerton

³ Kudriavtsev



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه تیتانیوم تابش‌دهی شده در ۲۰ تخلیه خازنی با یون‌های نیتروژن.



شکل ۵. نمودار (a) طیف توزیع انرژی پرتو ایکس از نمونه تیتانیوم بدون تابش، (b) نمونه تابش‌دهی شده با ۲۰ تخلیه خازنی دستگاه پلاسمای کانونی با یون‌های نیتروژن.

به طیف نمونه اولیه به دلیل تنش و کرنش^۲ ایجاد شده در نمونه‌ها ناشی از انتقال گرمایی بسیار زیاد به نمونه‌ها در زمان تابش یون‌های نیتروژن بوده است. تنش و کرنش ایجاد شده دلایل زیادی دارد؛ از جمله نابجایی‌ها در شبکه^۳، ترک‌های انباشته شده^۴، میکروتنش‌ها^۵، تنش‌های داخلی^۶، مرز دانه^۷، تنش داخلی^۸ و نقص‌های نقطه‌ای^۹ [۵,۶,۲۰]. رابطه زیر که به رابطه شرر^{۱۰} معروف است، برای تخمین میانگین اندازه بلورک های فلزی ارایه شده است.

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

در رابطه فوق D میانگین اندازه بلورک های فلز، k ضریب شکل بلور (برای تنگستن ۰/۹۴)، λ طول موج پرتو ایکس (در این حالت برابر ۱/۵۴۰۵۹ آنگستروم)، θ زاویه براگ^{۱۱} و $\beta_{2\theta}$ پهنای عرض پیک (برحسب رادیان) در میانه قله^{۱۲} می باشد. با استفاده از این رابطه، و اعداد مربوط به قله‌ها، میانگین اندازه بلورک‌ها در نمونه مرجع و نمونه تابش‌دیده با ۲۰ تخلیه خازنی به ترتیب ۲۲/۵ nm و ۲۱/۵ nm بدست آمد [۸,۲۱,۲۲].

دمای نمونه تحت تابش، نقش اساسی در تغییر نقص‌های شبکه از جمله چگالی دمایی، به هم پیوستن تهی جاها^۱ و نقص‌های بینابینی در شبکه بلوری ماده و نحوه پخش اتم‌های نیتروژن در ساختار ماده دارد؛ این نقص‌ها در اثر تابش یون‌های پر انرژی نیتروژن بر تیتانیوم در ساختار کریستالی آن به وجود آمده است.

۲-۳- نتایج آنالیز سطح با طیف‌سنجی توزیع انرژی و پراش

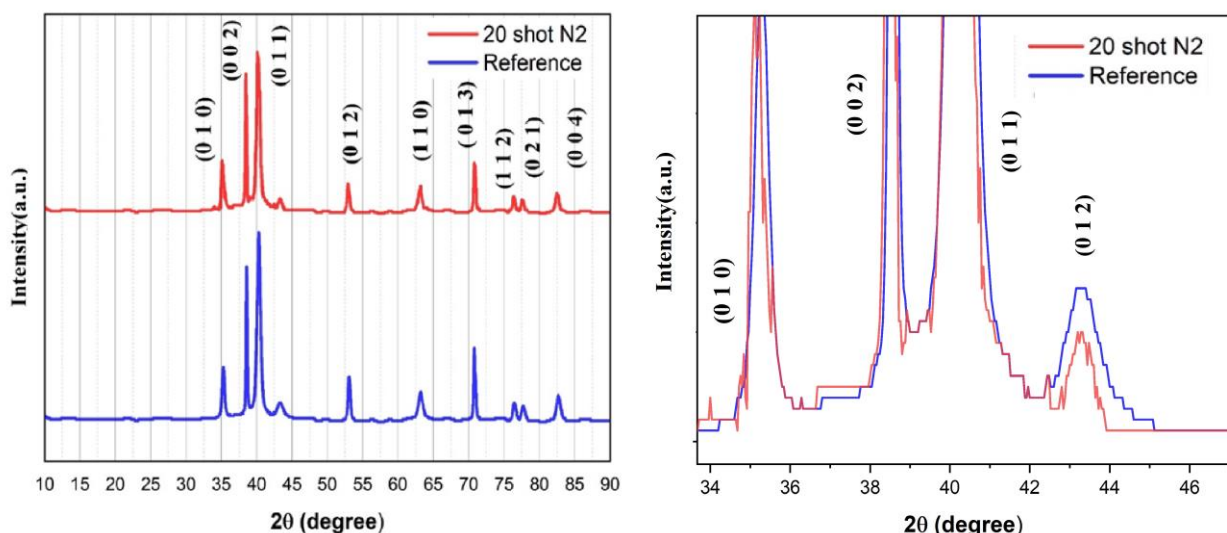
پرتو ایکس

از نمونه تیتانیوم قبل و بعد از تابش‌دهی آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی گرفته شد (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که با تابش یون‌های نیتروژن بر سطح تیتانیوم، مقدار ناچیزی مس بر سطح تیتانیوم بر اثر تبخیر از سر آند دستگاه پلاسمای کانونی رسوب کرده است. باتوجه به نتیجه آنالیز فوق می‌توان به این نکته اشاره کرد که تیتانیوم مورد استفاده در این پژوهش ناخالصی عمده‌ای ندارد. از نمونه‌های تیتانیوم قبل و بعد از تابش با ۲۰ تخلیه خازنی نیتروژن، پراش پرتو ایکس گرفته شد. طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های مرجع و تابش‌دهی شده با یون‌های نیتروژن در شکل ۶ نشان داده شده است. قله‌های مربوط به صفحات طیف تیتانیوم مرجع نشان می‌دهد که تابش یون به سطح تیتانیوم باعث به وجود آمدن تغییراتی در مکان قله‌ها و شدت قله‌ها شده است. نشان می‌دهد که تابش یون‌های دستگاه پلاسمای کانونی، ساختار بلوری تیتانیوم را تحت تاثیر قرار داده است.

با تابش یون‌های نیتروژن به تیتانیوم، مکان قله‌ها به سمت زوایای کوچکتر جابجا شده‌اند که میزان این جابجایی تقریباً ۰/۲ درجه می‌باشد. تابش یون‌های نیتروژن بر تیتانیوم باعث کاهش ارتفاع قله‌ها نیز شده است. جابجایی مکان قله‌ها نسبت

2 Stress/stain
3 Dislocations
4 Stacking faults
5 Micro stresses
6 Long-range internal stresses
7 Grain boundaries
8 Internal stresses
9 Point defects
10 Scherrer's formula
11 Bragg's angle
12 Full Width at Half Maximum, FWHM

¹ Vacancy coalescence



شکل ۶. الگوهای پراش پرتو ایکس از نمونه‌های تیتانیومی قبل و بعد از تابش دهی.

سطح نمونه تیتانیوم تاییده شده است. این نقص‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در اثر تابش یون‌های پر انرژی نیتروژن و پدیده کندوپاش بر تیتانیوم در ساختار سطح آن تغییراتی به وجود آمده است.

مراجع

- [1] R.W. Poon, J.P. Ho, X. Liu, C. Chung, P.K. Chu, K.W. Yeung, W.W. Lu, K.M. Cheung, Formation of titanium nitride barrier layer in nickel–titanium shape memory alloys by nitrogen plasma immersion ion implantation for better corrosion resistance, *Thin solid films* 488 (2005) 20-25.
- [2] R.A. Roşu, V.-A. Şerban, A.I. Bucur, U. Dragoş, Deposition of titanium nitride and hydroxyapatite-based biocompatible composite by reactive plasma spraying, *Applied Surface Science* 258 (2012) 3871-3876.
- [3] Y.V. Borisyuk, N. Oreshnikova, M. Berdnikova, A. Tumarkin, G. Khodachenko, A. Pisarev, Plasma nitriding of titanium alloy Ti5Al4V2Mo, *Physics Procedia* 71 (2015) 105-109.
- [4] Y. Yoshimitsu, R. Ichiki, K. Kasamura, M. Yoshida, S. Akamine, S. Kanazawa, Atmospheric-pressure-plasma nitriding of titanium alloy, *Japanese Journal of Applied Physics* 54 (2015) 030302.
- [5] M. Bhuyan, S. Mohanty, C. Rao, P. Rayjada, P.

نتیجه گیری

در این مقاله اثرات تابش یون‌های پر انرژی نیتروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلوژول روی تیتانیوم مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از سیگنال‌های بدست آمده از فارادی کاپ برای استخراج باریکه یونی نیتروژن بهینه‌سازی گردید و سپس نمونه‌های تیتانیومی در معرض تخلیه خازنی‌های مختلف قرار گرفتند. در این تحقیق از آنالیزهای SEM، XRD، EDS. برای بررسی اثرات سطحی و ساختاری یون‌های نیتروژن روی بررسی تصاویر SEM نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه‌های خازنی به تراکم ناهمواری‌های ایجاد شده در سطح تیتانیوم افزوده می‌شود. مناطقی نیز در سطح تیتانیوم دیده شد که دچار کندوپاش شده است. نتایج بدست آمده از آنالیز EDS دلالت بر این داشت که به دلیل استفاده از استوانه توخالی به عنوان الکتروود آند دستگاه، میزان تبخیر از سر آند به حداقل رسیده و در عوض یون‌های پر انرژی نیتروژن مستقیماً به

tungsten nitride thin films using plasma focus device, *Journal of fusion energy* 30 (2011) 382-387.

[15] M. Shirazi, M. Ghasemloo, G.R. Etaati, M.T. Hosseinejad, M.R. Toroghinejad, Plasma focus method for growth of molybdenum nitride thin films: Synthesis and thin film characterization, *Journal of Alloys and Compounds* 727 (2017) 978-985.

[16] M.A. Asgarian, M.M.R. Seyedhabashi, B.S. Bidabadi, C. Rasouli, F. Sedighi, Radiation damage of tungsten surface irradiated with high-energy hydrogen and helium beams of plasma focus device, *Fusion Engineering and Design* 160 (2020) 112007.

[17] 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* 175 (2020) 109249.

[18] R. Egerton, R. McLeod, F. Wang, M. Malac, Basic questions related to electron-induced sputtering in the TEM, *Ultramicroscopy* 110 (2010) 991-997.

[19] Y. Kudriavtsev, A. Villegas, A. Godines, R. Asomoza, Calculation of the surface binding energy for ion sputtered particles, *Applied surface science* 239 (2005) 273-278.

[20] A. Chamani, S.M.M. Abtahi, M.A.H. Tafreshi, M.M.R. Seyedhabashi, The comparison of the destructive effects of high energy protons produced in a plasma focus device on copper and molybdenum, *Radiation Safety and Measurement* 10 (2021) 19-30.

[21] V.N. Pimenov, E.V. Demina, L. Ivanov, V. Gribkov, A. Dubrovsky, U. Ugaste, T. Laas, M. Scholz, R. Miklaszewski, B. Kolman, Damage and modification of materials produced by pulsed ion and plasma streams in Dense Plasma Focus device, *Nukleonika* 53 (2008) 111-121.

[22] F. Sedighi, A. Kouhi, D. Iraj, C. Rasouli, B.S. Bidabadi, M.M. Seyedhabashi, H. Rasouli, Damage study and 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.

Raole, Plasma focus assisted damage studies on tungsten, *Applied surface science* 264 (2013) 674-680.

[6] M. mohammadreza Seyedhabashi, M.A. Tafreshi, S. Shafiei, A. Abdisaray, Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device, *Applied Radiation and Isotopes* 154 (2019) 108875.

[7] M. mohammadreza Seyyedhabashy, M.A. Tafreshi, S. Shafiei, A. Nasiri, Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device, *Nuclear Engineering and Technology* 52 (2020) 827-834.

[8] 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* 144 (2017) 14-20.

[9] M.M. Seyedhabashi, B. Shirani Bidabadi, M. Amirhamzeh Tafreshi, F. Sedighi, A. Nasiri, Damage studies on irradiated tungsten by helium and argon ions in a plasma focus device, *Radiation Safety and Measurement* 9 (2020) 1-12.

[10] 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)* 41 (2020) 100-109.

[11] M. Sadiq, S. Ahmad, M. Shafiq, M. Zakaullah, Nitrogen ion implantation of silicon in dense plasma focus, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 252 (2006) 219-224.

[12] R. Rawat, W. Chew, P. Lee, T. White, S. Lee, Deposition of titanium nitride thin films on stainless steel—AISI 304 substrates using a plasma focus device, *Surface and Coatings Technology* 173 (2003) 276-284.

[13] N. Fani, H. Savaloni, * Investigation on the formation of titanium nitride thin films on 304 type stainless steel using plasma focus device, *Journal of Theoretical and Applied Physics* 6 (2012) 1-7.

[14] M. Hosseinejad, G. Etaati, M. Ghoranneviss, M. Shirazi, Z. Ghorannevis, Structural and morphological investigations of deposited