

بررسی آثار برخورد یون‌های مختلف بر سطح آلومینیوم با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر با انرژی ۲/۵ kJ

زهرا شهبازی راد، مجید شهرياری و فریدون عباسی دوانی

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی تهران

(دریافت: ۸۹/۱۲/۲۰ - پذیرش: ۹۰/۲/۳۱)

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی اثرات و تغییراتی است که بر اثر برخورد یون‌های مختلف تولیدی توسط دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 ($8.6 \mu F$)، ۲۵ kV، ۲/۵ kJ نوع مدر بر روی سطح آلومینیوم به وجود می‌آید. گازهای Ar و H+1%Kr به عنوان گاز عملکردی در دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شد. برای به دست آوردن بیشینه چگالی یونی، فشار و ولتاژ عملکردی بهینه برای گاز Ar به ترتیب ۰/۴۵ mbar و ۲۲ kV و برای گاز H+1%Kr به ترتیب برابر ۵ mbar و ۲۳ kV تعیین شد. برای تحلیل اثرات به وجود آمده بر روی سطح، از تصاویر SEM و برای آنالیز عنصری نمونه‌ها، از طیف‌نگاری EDX استفاده شد. ذوب‌شدگی، تبخیر سطحی، فرورفتگی‌ها و برجستگی‌ها، به وجود آمدن ترک و شکاف در سطح از جمله اثرات مشاهده شده بر روی سطح آلومینیوم با استفاده از تصاویر SEM می‌باشد. همچنین شدت این اثرات در ارتفاعات مختلف از مکان تولید یون در داخل دستگاه پلاسمای کانونی مورد بررسی قرار گرفت. در آنالیز عنصری نمونه‌های آلومینیوم با استفاده از تکنیک EDX نفوذ یون‌های مس ناشی از کندو پاش از آند دستگاه در هنگام تشکیل پینچ، به داخل نمونه‌های آلومینیوم مشاهده شد. محاسبات SRIM برای تعیین عمق نفوذ یون‌ها در داخل نمونه‌های آلومینیوم انجام شده است.

واژه های کلیدی: پلاسمای کانونی، آلومینیوم، مورفولوژی سطح، توزیع مکانی یون‌ها، میکروسکوپ الکترونی، طیف نگار پاشندگی اشعه ایکس، عمق نفوذ یون‌ها.

Investigation of different ion effects on the aluminum samples with a 2.5 kJ mater type plasma focus device

Z. Shahbazi rad, M. Shahriari and F. Abbasi Davani

Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received 10 March 2011, accepted 21 May 2011)

Abstract

The main purpose of this work is to investigate the effects of different ions produced in plasma focus device (SBUPF1) with the specification of ($8.6 \mu F$, 25 kV, 2.5 kJ) on the Aluminum surface. Also the possibility of ion implantation with the use of this device has been investigated. Argon and Hydrogen+1%Krypton used as working gas. For determining optimum ion density, optimum pressure and operating voltage for Argon as operating gas have been obtained (0.45 mbar and 22 kV respectively). These parameters for Hydrogen+1%Krypton were 5 mbar and 23 kV respectively. Irradiated samples have been analyzed with SEM technique for morphological and surface study of samples. The EDX spectroscopy and the SRIM calculations have been done to determine the composition of samples and the penetration depth of the ions in the samples respectively. Melting and surface evaporation effects and generation of cracks were seen in these samples. The intensity of these effects for the samples put in different height from the anode top has been determined. Elemental analysis with EDX technique showed that copper ions penetrated into the samples due to sputtering from anode.

Keywords: Plasma Focus, Surface Morphology, Ion Spatial Distribution,; Energy Dispersive X-ray, Penetration Depth of Ions.

E-mail of corresponding author: Z_shahbazi22@yahoo.com

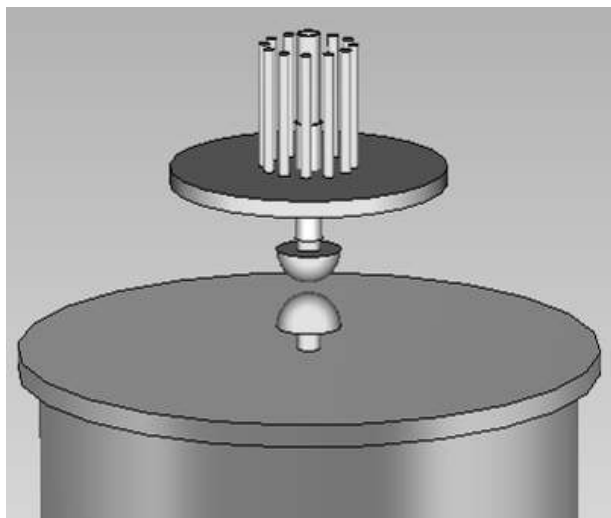
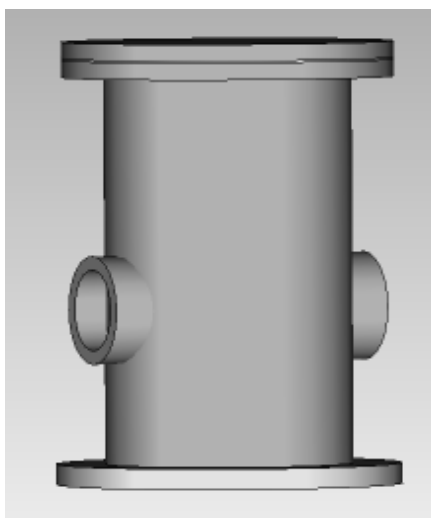
مقدمه

امروزه آلومینیوم به دلیل خواص ویژه‌ای چون استحکام، رسانایی، مقاومت در برابر خوردگی، سبکی، غیرمغناطیس بودن، پایداری محیطی و غیره در کاربردهای بسیاری از جمله تولید در و پنجره، نمای ساختمان‌ها، در صنعت کشتی‌سازی، صنعت هوافضا، صنعت نظامی، صنایع الکترونیک و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مطالعه خواص این فلزات، اندازه‌گیری این خواص، بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی خواص آلومینیوم، در استفاده مطلوب‌تر و بهینه‌تر از این فلز در کاربردهای مختلف بسیار مفید است.

همچنین از فلز آلومینیوم به عنوان ابزار تشخیصی می‌توان استفاده کرد. به عنوان مثال اگر ذرات پرنانژی مانند یون‌های پرنانژی بر سطح آلومینیوم بتابند اثرات به جای مانده بر روی سطح به ازای یون‌های مختلف و همچنین به ازای انرژی‌ها، حرارت و شرایط مختلف محیطی و مکانی با هم متفاوت خواهند بود.

در این تحقیق از فلز آلومینیوم برای بررسی اثرات برخورد یون‌های مختلف تولیدی در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر SBUPF1 و همچنین برای تعیین توزیع مکانی یون‌های تولید شده داخل این دستگاه استفاده می‌شود.

دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 نوع مدر یک نوع از دستگاه‌های پینچ Z می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، این دستگاه از یک استوانه هم محور به نام آند و ۱۲ استوانه هم‌محور به نام کاتد تشکیل شده است. الکترودهای آند و کاتد از جنس مس هستند که در داخل یک محفظه پر شده توسط گاز قرار گرفته است. این دستگاه پلاسمای کانونی دارای بیشینه انرژی $2/5 \text{ kJ}$ است که توسط یک خازن هم‌محور با ظرفیت $8/6 \mu\text{F}$ و بیشینه ولتاژ 25 kV تغذیه می‌شود. الکترودهای آند از طریق یک سوئیچ تریگاترون ولتاژ بالا- جریان بالا به خازن متصل می‌شود. زمانی که ولتاژ بالا به الکترودها اعمال می‌شود، فاز شکست اتفاق افتاده و لایه جریان بر اثر اعمال میدان الکترومغناطیسی بین الکترودها در راستای محور آند شروع به حرکت می‌کند. زمانی که لایه جریان به انتهای آند می‌رسد بر اثر اعمال نیروی لورنتس لایه جریان متراکم می‌شود که این فاز، فاز شعاعی نامیده می‌شود. در انتهای این فاز به خاطر ناپایداری $m=0$ ستون پلاسمای داغ و چگال برای مدت زمان کوتاه تشکیل می‌شود [۲۱]. این ستون پلاسمای چشمه قوی از تابش‌های ایکس سخت و نرم، نوترون (زمانی که گاز دوتریوم به عنوان گاز پرکننده استفاده می‌شود)، الکترون، و یون می‌باشد.



شکل ۱. (۱) محفظه، (۲) کاتدها، (۳) آند، (۴) غلاف عایق، (۵) سوئیچ تریگاترون، (۶) خازن

TDS 1002B، با فرکانس نمونه برداری ۱Gs/s مشاهده می شود.

نمونه های آلومینیوم با ابعاد ۱۲ cm طول، ۱۰ cm عرض، و ۱ mm ضخامت، با استفاده از یک نگه دارنده در بالای آند دستگاه پلاسمای کانونی و در مرکز آن قرار گرفته است. نمونه ها در فواصل مختلف ۱، ۴، ۱۰ سانتی متری از نوک آند و در داخل محفظه دستگاه پلاسمای کانونی قرار گرفته است. هر کدام از نمونه ها توسط یون های تولیدی دستگاه پلاسمای کانونی بعضی توسط یک شات و برخی دیگر توسط ۸ شات خوب مورد پرتو دهی قرار می گیرد.

نتایج و بحث

در ابتدا ولتاژ و فشار بهینه که در آن بیشینه گسیل یونی و پیچ های قوی اتفاق می افتد، یکبار به ازای گاز آرگون و بار دیگر به ازای گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون یافت شد. مقدار ولتاژ و فشار بهینه به ازای گاز آرگون به ترتیب برابر با ۲۷۱ kV و ۲۲ mbar و ۴۵٪ است. این پارامترها در مورد گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون به عنوان گاز عملکردی به ترتیب برابر مقادیر ۲۳ kV و ۴۵ mbar به دست آمد. مشتق جریان تخلیه و جریان تخلیه نمونه ای برای دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 به ازای گازهای عملکردی آرگون و هیدروژن+۱٪ کریپتون به ترتیب در شکل های (۲-الف) و (۲-ب) نمایش داده شده است.

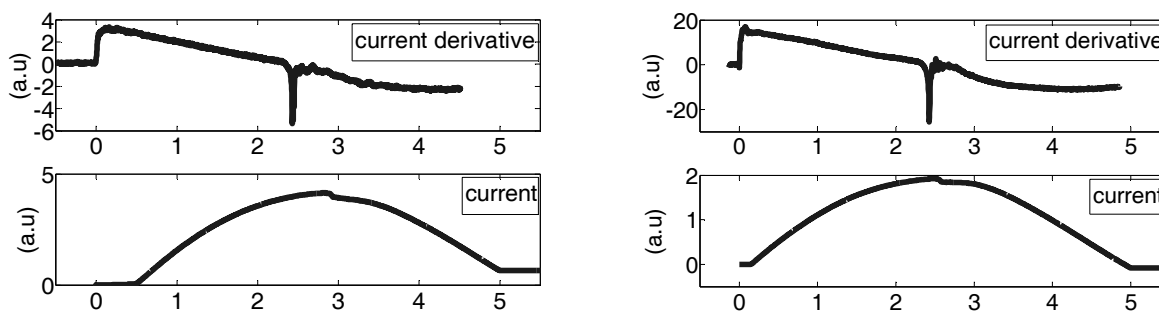
نمونه های آلومینیومی که توسط یون های Ar و H+1%Kr به ازای یک شات مورد پرتو دهی قرار گرفته اند در شکل (۳) نمایش داده شده اند. این دو نمونه در فاصله ۱ cm از نوک آند قرار گرفته اند. همان طور که مشاهده می شود زمانی که گاز H+1%Kr به عنوان گاز عملکردی مورد استفاده قرار می گیرد، مساحتی از نمونه که توسط یون ها تحت تأثیر قرار می گیرد نسبت به حالتی که Ar به عنوان گاز عملکردی مورد استفاده قرار می گیرد، افزایش می یابد. دلیل احتمالی این اثر، افزودن درصد کمی از یک گاز سنگین مانند کریپتون به عنوان گاز افزودنی به یک گاز سبک تر یعنی هیدروژن می باشد.

در این تحقیق هدف ما بررسی اثرات سطحی یون های مختلف تولید شده توسط ستون پلاسمای در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی فلز آلومینیوم در فواصل مختلف نسبت به نوک آند می باشد. هم چنین با استفاده از این اثرات بر روی سطح آلومینیوم، توزیع مکانی یون های تولید شده در فواصل مختلف نسبت به نوک آند تعیین می شود. هم چنین در این تحقیق امکان نفوذ یون ها به داخل سطح آلومینیوم با استفاده از تکنیک EDX مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین عمق نفوذ یون ها در داخل نمونه های آلومینیوم از کد SRIM استفاده شد.

مواد و روش آزمایش ها

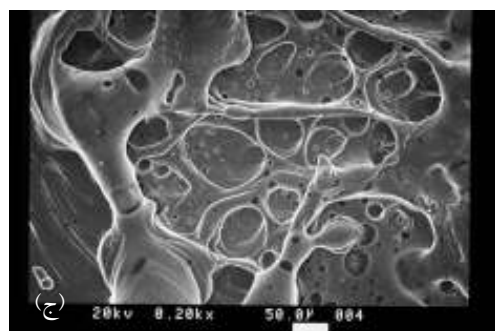
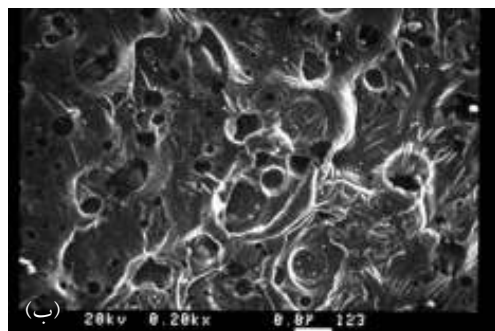
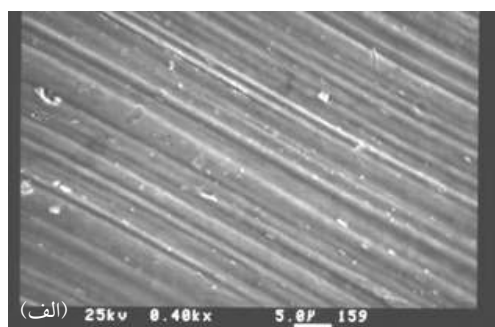
در این آزمایش از دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 استفاده شده است. جریان پیک زمانی که دستگاه در بیشینه ولتاژ عملکردی کار می کند ۱۶۸ kA است که دارای دوره تناوب $10/6 \mu s$ است. اندوکتانس کل سیستم حدود ۲۷۱ nH است. حجم محفظه مورد استفاده 8290 cm^3 است. اطلاعات بیشتر در مورد این دستگاه پلاسمای کانونی در مرجع [۳] قابل مشاهده است.

در این آزمایش یکبار گاز آرگون و بار دیگر گاز هیدروژن+۱٪ کریپتون به عنوان گاز عملکردی دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا ولتاژ و فشار بهینه به ازای هر یک از گازها تعیین شد. زمانی که دستگاه در ولتاژ و فشار بهینه به ازای گاز عملکردی کار می کند، بهترین تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی اتفاق می افتد و در نتیجه بیشترین مقدار یون از ستون پلاسمای گسیل می شود. برای تحقق این هدف به ازای هر ولتاژ و فشار، جریان تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی اندازه گیری شد. جریان تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی توسط پیچ رگوفسکی که در اطراف مسیر جریان قرار گرفته است، اندازه گیری می شود. ثابت کالیبراسیون پیچ رگوفسکی $52/3 \text{ kA/V}$ که نحوه طراحی و ساخت این پیچ در مرجع [۴] ذکر شده است. مشتق جریان خروجی که با استفاده از پیچ رگوفسکی مورد اندازه گیری قرار می گیرد با استفاده از یک اسیلوسکوپ مدل



شکل ۲. مشتق جریان و جریان تخلیه‌ی نمونه‌ای دستگاه پلاسمای کانونی (SBUPF1، الف) در ولتاژ ۲۲kV و فشار ۰/۴۵ mbar و گاز آرگون، (ب) در ولتاژ ۲۳kV و فشار ۵ mbar گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون

یون قابل مشاهده است. شکل‌های (۴-ب) و (۴-ج) ویژگی‌های متفاوتی را به ازای پرتودهی توسط یون‌های مختلف در مورفولوژی سطح نشان می‌دهد.



شکل ۴. تصاویر SEM نمونه‌های الف) پرتون‌دیده، ب) پرتو دیده شده توسط گاز آرگون، ج) پرتو دیده توسط گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون به ازای یک شات



شکل ۳. نمونه‌های آلومینیوم پرتو داده شده در یک شات به ازای الف) گاز آرگون، ب) گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون

همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات رنگی مشاهده شده در سطح نمونه‌های آلومینیوم پرتو دیده توسط گاز H+1%Kr بیشتر از تغییرات مشاهده شده در سطح نمونه‌هایی است که توسط گاز Ar پرتو دیده‌اند.

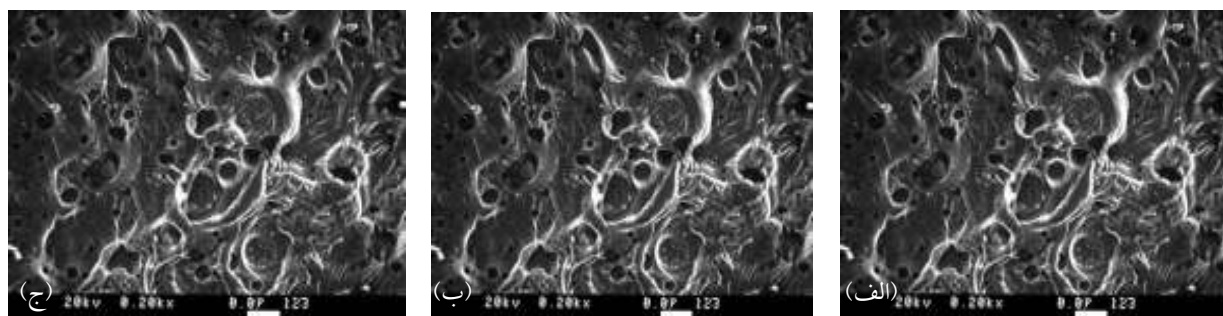
مورفولوژی سطح نمونه‌های آلومینیوم با استفاده از تکنیک تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شده است. تصاویر SEM قبل و بعد از پرتو دهی توسط یون‌های Ar و H+1%Kr در شکل (۴) نمایش داده شده است. در شکل (۴-الف) تصویر نمونه قبل از پرتو دهی توسط

زده شد. اثرات مشاهده شده بر روی نمونه‌ها در فواصل مختلف از نوک آند نشان می‌دهد که توزیع یون‌ها بر روی نمونه‌ها در فواصل نزدیک به نوک آند متمرکزتر است و اثر ذوب شدگی و تخریب در سطح نمونه‌ها در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌هایی که در فواصل بیشتر از نوک آند قرار دارند بیشتر است. تصاویر SEM سطوح نمونه‌های آلومینیوم پرتودیده در فواصل مختلف نسبت به نوک آند در شکل (۷) و شکل (۸) به ترتیب به ازای گازهای Ar و H+1%Kr به عنوان گاز عملکردی قابل مشاهده است. با استفاده از این تصاویر اثرات نفوذ یون، تولید مناطق برجسته، تبخیر سطحی و ذوب شدگی به ازای هر دو گاز عملکردی قابل مشاهده است. در نمونه‌های پرتودیده شده توسط گاز Ar مشاهده می‌شود که برای نمونه‌هایی که در فاصله ۱ cm از نوک آند قرار گرفته‌اند، تعداد فرورفتگی‌ها و برجستگی‌ها به خاطر برخورد یون، بیشتر از نمونه‌هایی است که در فواصل ۴ cm و ۱۰ cm قرار گرفته‌اند.

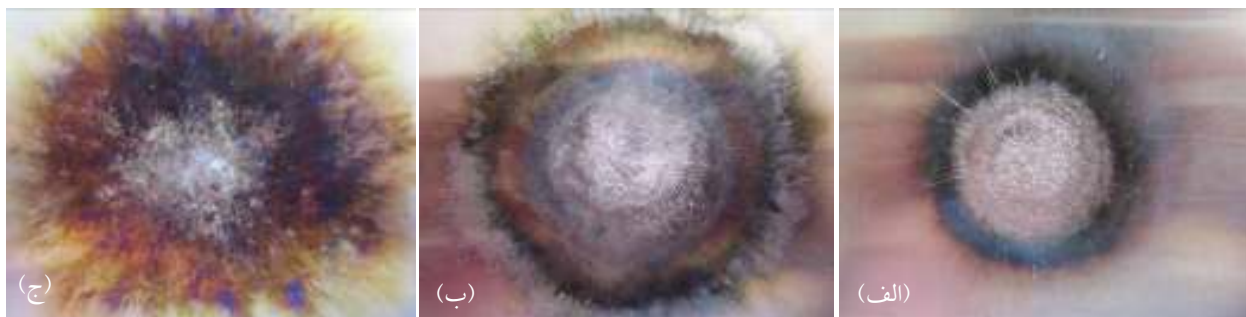
اثرات ذوب شدگی و تبخیر سطحی و تولید مناطق برجسته در مکان برخورد یون روی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در نمونه‌هایی که توسط گاز Ar پرتو دیده‌اند مشاهده می‌شود که چگالی یون‌های نفوذ کرده در داخل نمونه و مناطق برجسته تولید شده بر روی نمونه بیشتر از نمونه‌هایی است که توسط گاز H+1%Kr پرتو دیده‌اند. هم‌چنین سطح اثر مشاهده شده بر روی نمونه‌هایی که با یون Ar پرتو دیده‌اند بیشتر از سطح اثر بر روی نمونه‌هایی است که با یون H+1%Kr پرتو دیده‌اند. در حالت دوم اثر ذوب شدگی بیشتر از اثرات تولید مناطق برجسته و نفوذ یون به داخل نمونه می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که مناطق ذوب شده به هم متصل شده‌اند. اثر برخورد یون‌ها بر روی نمونه‌های آلومینیوم که در فواصل مختلف از نوک آند قرار گرفته است در شکل (۵) و شکل (۶) به ترتیب به ازای گاز Ar و گاز H+1%Kr به عنوان گاز پرتو کننده دستگاه پلاسمای کانونی نشان داده شده است. نمونه‌ها در فواصل ۱، ۴ و ۱۰ سانتی‌متری از نوک آند قرار گرفته‌اند. ۸ شات خوب (در شرایط بهینه ولتاژ و فشار) برای هر نمونه



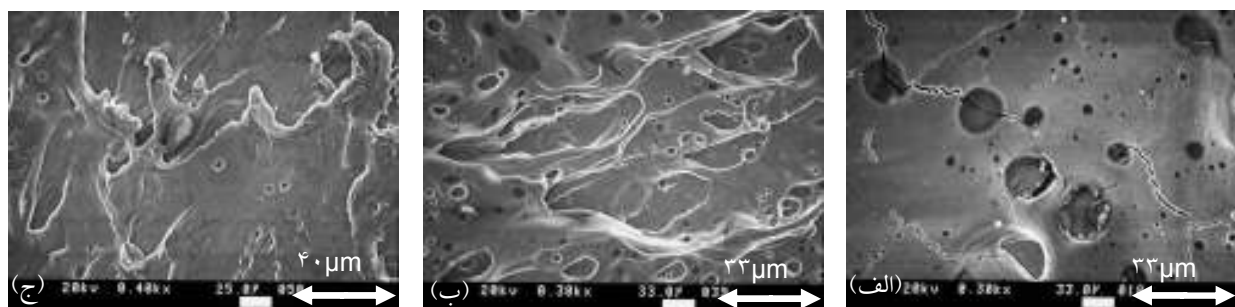
شکل ۵. نمونه‌های آلومینیوم پرتودهی شده توسط یون‌های Ar در فواصل، الف) ۱ cm ب) ۴ cm ج) ۱۰ cm از نوک آند



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های آلومینیوم پرتودیده با یون‌های Ar، الف) ۱ cm ب) ۴ cm ج) ۱۰ cm از نوک آند به ازای ۸ شات



شکل ۷. نمونه های آلومینیوم پرتودهی شده توسط یون های H+1%Kr، (الف) ۱cm (ب) ۴cm، (ج) ۱۰cm از نوک آند



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های آلومینیوم پرتودیده با یون های H+1%Kr، (الف) ۱cm (ب) ۴cm، (ج) ۱۰cm از نوک آند به ازای ۸ شات

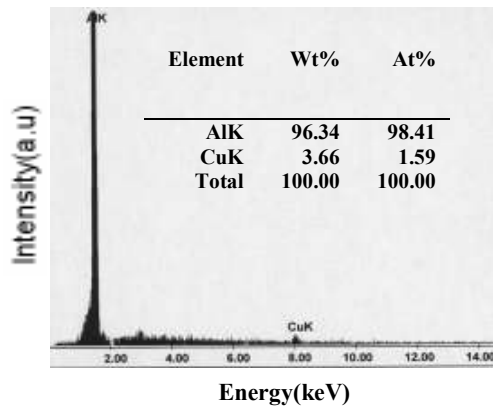
گرفته اند، تخریب سطح بیشتر از نمونه هایی است که در فواصل دورتر قرار گرفته اند.

همچنین با توجه به اثرات مشاهده شده بر روی نمونه ها مطابق شکل (۵) و (۶)، توزیع مکانی یون ها در فضای بالای نوک آند در دستگاه پلاسمای کانونی، مخروطی شکل است.

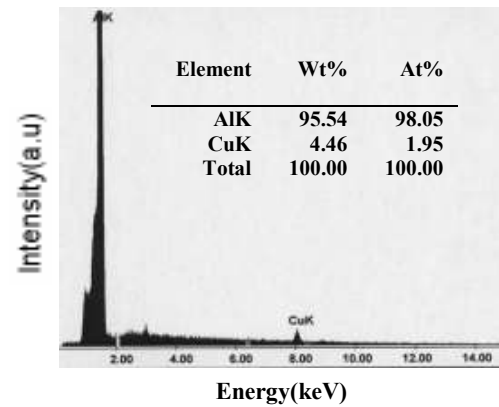
با استفاده از طیف نگاری پاشندگی انرژی اشعه ایکس (EDX)، درصد عناصر موجود در نمونه ها و امکان نفوذدهی یون داخل نمونه های آلومینیوم با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این طیف نگاری در شکل (۹) نمایش داده شده است. طیف نگاری نمونه پرتودیده نشان می دهد که تنها عنصر موجود در داخل نمونه آلومینیوم با نسبت ۱۰۰٪ است. آنالیز نمونه های پرتودیده توسط EDX، حضور دو عنصر آلومینیوم و مس در نمونه را تأیید می کند. برای یک نمونه پرتو دیده شده آنالیز به ازای دو نقطه مختلف بر روی نمونه مطابق شکل (۹) انجام شد: یک نقطه در مکان های نزدیک به مرکز پرتودهی و نقطه دیگر در فواصل دورتر از مرکز پرتودهی. آنالیز عنصری در نقطه نزدیک به مرکز پرتودهی نشان می دهد که درصد عنصر

همچنین مشاهده می شود که هر چه فاصله از آند افزایش پیدا می کند، تخریب سطح نمونه ها کاهش پیدا می کند. همچنین برای نمونه هایی که در فاصله ۱۰ cm قرار گرفته اند اثر ذوب شدگی کمتر از اثرات دیگر مشاهده می شود.

در مورد نمونه هایی پرتودیده توسط یون H+1%Kr، مشاهده می شود که مساحت فرورفتگی های ایجاد شده به خاطر برخورد یون ها بزرگتر از مساحت فرورفتگی ها در نمونه های پرتو دیده شده توسط یون Ar است. اثر دیگر قابل مشاهده شده تولید ترک هایی در ابعاد میکرو است. به نظر می رسد که این اثر به خاطر وجود ۱٪ گاز سنگین کریپتون در محتوای گاز عملکردی است. در نمونه هایی که در فاصله ۴ cm از نوک آند قرار دارد هر دو اثر ذوب شدگی و تولید فرورفتگی ها و برجستگی ها مشاهده می شود ولی سطح این اثرات نسبت به نمونه هایی که در فاصله ۱ cm قرار گرفته اند، کم تر است. در نمونه هایی که در فاصله ۱۰ cm قرار گرفته اند، ذوب شدگی نسبت به نمونه هایی که در فاصله های کم تر قرار گرفته اند، کم تر است. به ازای هر دو گاز عملکردی مشاهده می شود که نمونه هایی که در فواصل نزدیک تر نسبت به نوک آند قرار



(ب)

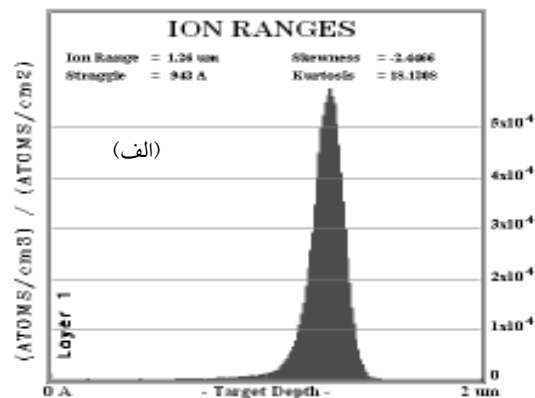
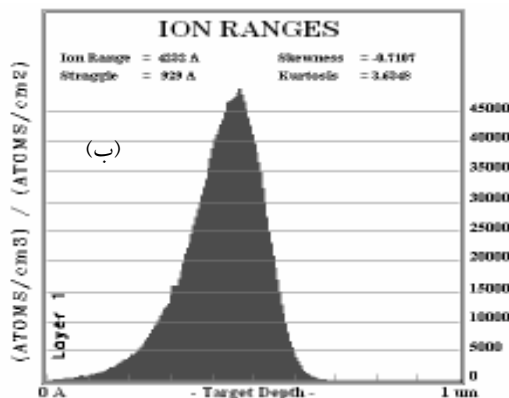


(الف)

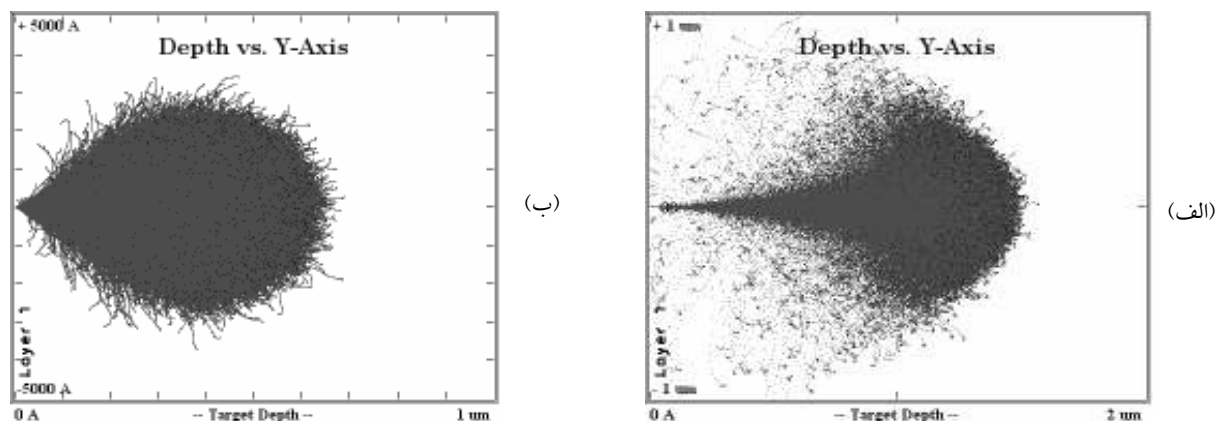
شکل ۹. طیف نگاری EDX نقاط روی نمونه های پرتودیده در فواصل مختلف نسبت به مرکز پرتو دهی، (الف) نزدیک مرکز پرتو دهی، (ب) دورتر از مرکز

نفوذ آن ها به قدری کم باشد که قابل صرف نظر کردن باشد که این مساله نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. برای تخمین عمق نفوذ یون ها در داخل نمونه از محاسبات توسط کد SRIM استفاده شد. محاسبات SRIM نشان می دهد که اگر بیشترین انرژی از نظر احتمال وقوع برای یون های هیدروژن در داخل دستگاه پلاسمای کانونی 150 keV باشد، عمق نفوذ یون ها در داخل نمونه آلومینیوم $1/27 \mu\text{m}$ است که محاسبات مربوطه در شکل (۱۰-الف) قابل مشاهده است. عمق نفوذ یون های آرگون در داخل آلومینیوم به ازای یون های آرگون با بیشترین احتمال وقوع انرژی 500 keV برابر با $0/42 \mu\text{m}$ است (مطابق شکل (۱۰-ب)). عمق نفوذ یون های هیدروژن و آرگون داخل نمونه آلومینیوم در شکل (۱۱-الف) و (۱۱-ب) نمایش داده می شود.

آلومینیوم در نمونه $95/54\%$ است و درصد حضور مس $4/46\%$ است (شکل (۹-الف)). برای نقطه ای که دورتر از مرکز پرتو دهی قرار دارد درصد حضور آلومینیوم $96/34\%$ و درصد حضور مس $3/66\%$ است. (شکل (۹-ب)) این آنالیز نشان می دهد که بعد از پرتو دهی مقداری مس به داخل نمونه نفوذ پیدا کرده است. به دلیل این که آند از مس ساخته شده است، در زمان وقوع پینچ بر اثر برخورد الکترون بر روی نوک آند، کندوپاش در سطح مس اتفاق می افتد. این یون ها به داخل نمونه آلومینیوم نفوذ می کنند. انتظار داشتیم که درصدی یون هیدروژن و یا آرگون به داخل نمونه های آلومینیوم بر اثر پرتو دهی با یون های هیدروژن و آرگون مشاهده کنیم، ولی در عمل این طور نشد. این ممکن است به دقت دستگاه طیف نگاری EDX برگردد یا ممکن است به این خاطر باشد که یون های مذکور به داخل نمونه نفوذ پیدا نکرده باشند و یا



شکل ۱۰. محاسبات برد یون ها در آلومینیوم برای، (الف) یون های هیدروژن با انرژی 150 keV و، (ب) یون های آرگون با انرژی 500 keV



شکل ۱۱. محاسبات عمق نفوذ، (الف) یون های هیدروژن با انرژی ۱۵۰ keV و ، (ب) یون های آرگون با انرژی ۵۰۰ keV در نمونه های آلومینیوم با استفاده از کد SRIM

نتیجه گیری

نمونه های آلومینیوم، تعیین توزیع مکانی یون ها در فضای بالای نوک آند است که این توزیع مکانی چگالی یون ها یک شکل مخروطی مانند دارد.

با توجه به محاسبات SRIM می توان نتیجه گرفت که عمق نفوذ یون های هیدروژن در داخل نمونه بیشتر از عمق نفوذ یون های آرگون در داخل نمونه آلومینیوم است.

منابع

1. M. V. Roshan, S. V. Springha, A. R. Talebitaher, R. S. Rawat and P. Lee, *Nuclear activation measurement of high energy deuterons from a small plasma focus*, Physics Letters A, 373 (2009) 851–855.
2. M. Bhuyan, N. K. Neog, S. R. Mohanty, C. V. S. Rao and P. M. Raole, *Studies on Ion Emission from the Plasma Focus Device by Using Ion Collector and Track Detector*, Journal Fusion Energy 29 (2010) 177–180.
3. B. Shirani and F. Abbasi, *Construction and Experimental Study of a 2.5kJ, Simply configured, mather type plasma focus device*, Brazilian Journal of Physics, 40(2010) 125-130.

۴. ز. شهبازی راد و ن. دارستانی و ب. شیرانی و و. دامیده و ف. عباسی و م. شهریار، طراحی و ساخت پیچشی روگوفسکی مناسب برای اندازه گیری جریان تخلیه الکتریکی در لحظه وقوع تنگش در دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1، کنفرانس فیزیک، دانشگاه ابوعلی سینا، شهریور ۱۳۸۹.

در این تحقیق با توجه به آزمایشات انجام شده ابتدا مقدار فشار و ولتاژ بهینه به ازای گازهای Ar و H+1%Kr به عنوان گازهای عملکردی به دست آمد، که این مقادیر برای گاز Ar برابر ۰/۴۵ mbar و ۲۲ kV و برای گاز H+1%Kr و ۵ mbar و ۲۳ kV تعیین شد. نمونه های آلومینیوم در فواصل مختلف نسبت به نوک آند قرار داده شد و یکبار توسط یون های Ar و یکبار توسط یون های H+1%Kr مورد پرتو دهی قرار گرفت. ذوب شدگی، تبخیر سطحی، نفوذ یون ها، ترک های ریز، فرورفتگی و برجستگی به علت برخورد یون از جمله اثرات مشاهده شده بر روی سطح نمونه ها می باشد. هم چنین مشاهده شد که با فاصله گرفتن از نوک آند تخریب سطح آند و اثرات مشاهده شده بر اثر برخورد یون با سطح، به تدریج کاهش می یابد، ولی گستردگی این اثرات (سطح اثر) افزایش می یابد. تصاویر SEM نمونه های پرتو داده شده با یون های H+1%Kr ترک های ریزی در حد میکرو را نشان می دهد که این ترک ها در نمونه های پرتو داده شده توسط یون های Ar قابل مشاهده نیست. که این به خاطر وجود درصد کمی از یک یون سنگین مانند کریپتون به عنوان گاز افزودنی به گاز اولیه می باشد.

طیف نگاری EDX وجود درصد کمی مس را داخل نمونه های آلومینیوم پرتو داده شده نشان می دهد که این به خاطر کندوپاش مس بر اثر برخورد الکترون با نوک آند در هنگام وقوع پینچ است. نتیجه دیگر به دست آمده با توجه به اثرات مشاهده شده بر روی