

Fabrication of Titanium Target on Copper Substrate for Neutron Production in ES-150 Electrostatic Accelerator¹

Alireza Grayeli^{*2}, Hossein Ghods³, Maryam Karimi⁴, Hossein Rafi-kheiri⁵

Abstract

This article presents the fabrication and characterization of a titanium target deposited on a copper substrate, designed for generating neutron particles in the ES-150 electrostatic accelerator. The selection of copper as the substrate and titanium as the target material was based on their respective properties: copper's exceptional thermal conductivity and titanium's high hydrogen absorption coefficient. A titanium thin film was deposited onto the copper substrate using ion beam sputtering. The resulting crystal structure, surface morphology, and elemental composition of the samples were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and X-ray spectrophotometry (EDX), respectively. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed distinct titanium peaks, primarily oriented along the Ti (002) plane at an angle of 38.42°. The scanning electron microscopy (SEM) results indicate a uniform film with a regular grain distribution and no visible defects. Energy Dispersive X-ray analysis (EDX) further confirmed the presence of titanium and copper elements in the target. Ion beam analysis-based elemental characterization revealed a thick copper substrate and a titanium layer, which was $1.90 \pm 0.19 \mu\text{m}$ thick. The neutron flux produced by the targets in the 150 KeV electrostatic accelerator was investigated, and the neutron yield was measured along the beam axis. A maximum neutron yield of 10^7 n/s was achieved.

Keywords: *Titanium Film, Target, Accelerator, Neutron.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2024.47423.1418

² Assistant Professor, Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: a_grayli@yahoo.com

³ Instructor, Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: hossein.ghods@outlook.com

⁴ Assistant Professor, Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: m.karimi81@gmail.com

⁵ Assistant Professor, Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: hrafi2003@yahoo.com

ساخت هدف تیتانیومی بر زیرلایه مسی به منظور تولید نوترون در شتابگر الکتروستاتیک¹ ES-150

علیرضا گرایلی^{۲*}، حسین قدس^۳، مریم کریمی^۴ و حسین رفیع خیری^۵

چکیده:

در مقاله حاضر، به ساخت و مشخصه‌یابی هدف تیتانیومی بر زیرلایه مسی به منظور تولید ذرات نوترون در شتابگر الکتروستاتیک ES-150 پرداخته شده است. مس، به دلیل رسانایی حرارتی بالا و تیتانیوم به دلیل ضریب جذب بالایی هیدروژن به ترتیب به عنوان زیرلایه و ماده هدف انتخاب شدند. به این منظور لایه نازکی از فلز تیتانیوم با روش کندوپاش پرتو یونی بر زیرلایه مسی انباشت شد. ساختار بلوری تشکیل شده در نمونه‌ها به کمک طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، ریخت‌شناسی سطح به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و توزیع و ترکیب عناصر موجود در نمونه‌ها نیز با استفاده از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) بررسی شده است. طیف‌سنجی XRD قله‌های مختلف تیتانیوم با جهت‌گیری غالب $Ti(002)$ را در زاویه 2θ برای لایه رسوب‌شده نشان می‌دهد. تصاویر SEM، لایه‌ای با ساختار یکنواخت با توزیع منظم دانه‌ها و بدون نقص را نشان می‌دهد و نتیجه بررسی EDX نیز شامل عناصر تیتانیوم و مس می‌باشد. مشخصه‌یابی عنصری با روش‌های مبتنی بر آنالیز با باریکه یونی نشان می‌دهد که نمونه دارای یک زیرلایه مسی ضخیم و لایه تیتانیوم با ضخامت $0.19 \pm 0.1 \mu m$ است. میزان شار نوترونی مربوط به اهداف ساخته‌شده در شتابگر الکتروستاتیک 150 KeV ، مطالعه و بهره‌نوترونی در راستای محور باریکه اندازه‌گیری شد. بیشینه بهره نوترونی از مرتبه 10^7 n/s بدست آمد.

واژگان کلیدی: لایه تیتانیوم، هدف، شتابگر، نوترون.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2024.47423.1418

^۲ استادیار، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) Email: a_grayli@yahoo.com

^۳ مربی، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: hossein.ghods@outlook.com

^۴ استادیار، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: m.karimi81@gmail.com

^۵ استادیار، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: hrafi2003@yahoo.com

۱. مقدمه

هدف یکی از اجزای اصلی در مولدهای نوترونی مبتنی بر واکنش هسته‌ای است. از این رو ساخت هدف‌های مناسب برای تولید ذرات نوترون و به صورت ویژه نوترون‌های تک‌انرژی همواره مورد توجه بوده است. جایگاه ویژه نوترون‌های سریع در پژوهش‌های بنیادی و کاربردی سبب توسعه مولدهای نوترونی و روش‌های تولید این ذره شده است [۱-۳]. بخشی از مهم‌ترین کاربردهای شار نوترونی به پژوهش‌های علوم بنیادی مربوط می‌شود. پژوهش‌های بر پایه نوترون به روزهای اولیه فیزیک هسته‌ای بر می‌گردد. امروزه نیز همچنان به‌عنوان یک عنصر پژوهشی در بسیاری از زمینه‌های علوم و فناوری به‌شمار می‌رود. با کمک نوترون‌ها می‌توان در زمینه تشخیص و معالجه بیماری‌ها [۴]، تولید مواد و عناصر جدید و همچنین در زمینه علم زمین‌شناسی و باستان‌شناسی فعالیت داشت [۵]. همچنین بررسی مواد به‌روش فعال‌سازی نوترونی و شناسایی ساختار بلوری در فیزیک حالت جامد از موارد استفاده شار نوترونی هستند [۶]. در این راستا تهیه هدف‌هایی که بتوانند مقادیر زیادی از ایزوتوپ‌های هیدروژن را به‌صورت پایدار در خود نگهداری کنند، در اولویت طراحی مولد نوترون قرار دارد. هدف مورد استفاده در این‌گونه مولدها به صورت معمول یک لایه نازک فلزی است، که بر روی زیرلایه‌ای که به صورت عمده از جنس مس یا اسکاندیوم است، لایه‌نشانی شده است.

لایه‌نازک فلز تیتانیوم به‌عنوان نگهدارنده ایزوتوپ‌های هیدروژن همواره مورد توجه بوده است [۷-۸]. براساس محاسبات نظری و نتایج تجربی، عناصری مانند تیتانیوم و زیرکونیوم بیشترین توانایی را در تولید هیدریدهای فلزی دارند. این هدف‌ها تا 200°C پایدار هستند و نسبت اتم‌های هیدروژن جذب شده به اتم‌های فلزی نزدیک به ۱٫۵ دارند. در مقایسه با زیرکونیوم، تیتانیوم دارای عدد اتمی و چگالی کمتری است، از این‌رو، برد ذرات باردار در آن بیشتر است. بنابراین، هدف‌های تیتانیومی بازده نوترونی بالاتری نسبت به هدف‌های زیرکونیومی دارند [۹-۱۱].

با بمباران این لایه با استفاده از باریکه دوتریومی می‌توان طی واکنش D-D نوترون‌های سریع با انرژی بیش از $2/5\text{ MeV}$ تولید نمود. ضخامت هدف به مشخصات باریکه فرودی و نوع استفاده از هدف بستگی دارد، هرچه به بهره بالاتری نیاز باشد باید ضخامت لایه جاذب را افزایش داد [۱۲-۱۳]. بازده نوترون تولید شده به مشخصات فیزیکی هدف اعم از جنس، توان توقف، ضریب انتقال حرارت، مقاومت در برابر تابش، محتوای ایزوتوپ‌های هیدروژن موجود و توانایی نگهداری آن‌ها وابسته است.

در سال‌های کنونی، شاهد افزایش مطالعات در زمینه توسعه هدف با بهره‌بلا و طول عمر طولانی در کشور بوده‌ایم. طبیعی و همکاران در آزمایشی پیشگامانه در سال ۲۰۰۸ به طراحی و ساخت یک هدف دوتریوم به صورت ویژه برای تولید نوترون پرداختند. پژوهش‌های آن‌ها در مورد عوامل مؤثر بر نفوذ گاز هیدروژن در تیتانیوم، از جمله متغیرهایی مانند فشار، دما، و نرخ نفوذ هیدروژن، در اهداف دوتریوم متشکل از یک لایه تیتانیوم بر روی یک زیرلایه مسی انجام شد. از راه ساخت و آزمایش سه هدف دوتریومی، آن‌ها شرایط بهینه را برای یک هدف با بیشترین ضخامت $1 \mu\text{m}$ بدست آوردند [۱۴].

سینی و همکاران در مقاله خود در سال ۲۰۱۲، یک طرح نوآورانه برای یک هدف فوتونوترونی در شتابگر خطی 10 MeV با کاربرد در رادیوتراپی و رادیوگرافی ارائه کردند. این مطالعه شامل ارزیابی عناصر مختلف از جمله Be ، Ta ، Bi ، Pb ، W ، D_2O ، و BeD_2 بود که همگی دارای آستانه تولید فوتونوترون با انرژی کمتر از 10 MeV هستند. این پژوهش با بهینه‌سازی تولید نوترون برای کاربردهای ویژه به توسعه روش‌های رادیوتراپی و رادیوگرافی پیشرفته کمک می‌کند [۱۵]. جنس ماده هدف، انتخاب روش و بهینه‌سازی شرایط انباشت از دیگر موضوعات موردعلاقه پژوهشگران این حوزه از دانش است [۲۲-۱۶]. در سال ۲۰۱۶، بیستریسکی^۱ و همکاران روش‌هایی را برای رسوب‌دادن لایه‌های نازک دوتریدهای تیتانیوم، زیرکونیوم، نیوبیوم و کروم بر روی زیرلایه‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن و سیلیکون با استفاده از روش مگنترون اسپاترینگ بیان کردند. نتایج تجربی نشان دادند که افزایش مشاهده‌شده در بازده محصولات از دیدگاه تقویت واکنش‌های PD و DD به دلیل اثرات غربالگری الکترونی و تونل‌زنی دوتریوم‌ها در بلورهای دوتریدهای فلزات بیان شده می‌باشد [۱۶].

لی و همکاران در پژوهش‌های خود، طراحی و ساخت یک هدف تیتانیومی به منظور افزایش تولید نوترون در دستگاه‌های مولد نوترون قابل حمل را مورد بررسی قرار دادند. از راه شبیه‌سازی‌های دقیق، این تیم ضخامت هدف بهینه را $2/108 \mu\text{m}$ و $2/190$ شناسایی کردند که سپس به صورت تجربی در یک ژنراتور نوترون پیاده‌سازی شد [۲۳].

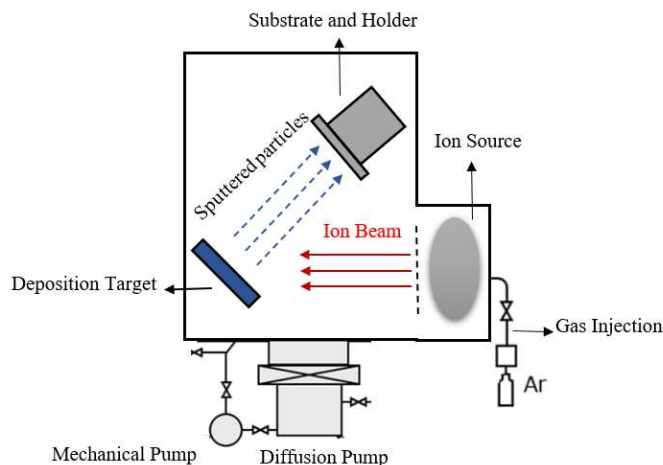
هدف از این مطالعه، طراحی و ساخت هدف جامد متشکل از لایه و زیرلایه جهت تولید شار نوترونی در شتابگر الکتروستاتیک ES-150 می‌باشد. به این منظور با استفاده از روش کندوپاش پرتویونی، لایه تیتانیوم بر روی زیرلایه مسی انباشت شده است. پس از ساخت هدف، مشخصه‌یابی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی و تحلیل عنصری انجام شدند. همچنین برای مشخص

^۱ Bystriksky

کردن توانایی تولید نوترون، آزمایش‌هایی مبتنی بر بمباران هدف با ذرات دوتریوم در شتابگر با استفاده واکنش $D(d,n)^3He$ انجام شد.

۲. روش کار

زیرلایه به‌عنوان نگهدارنده لایه هدف عمل می‌کند. رسانش حرارتی بالا یکی از ویژگی‌های اجتناب‌ناپذیر برای انتخاب زیرلایه است. افزون بر این، صرفه اقتصادی و دسترسی آسان به جنس زیرلایه با درجه خلوص بالا، سبب شد تا مس به‌عنوان زیرلایه هدف انتخاب شود. ابعاد و هندسه هدف با توجه به ابعاد محل نگهدارنده هدف در شتابگر الکتروستاتیک مورد استفاده انتخاب شد. با استفاده از عملیات تراشکاری، زیرلایه مسی به‌صورت پولکی با قطر 31.5 mm ساخته شد. ضخامت پولک 2 mm انتخاب شد تا افزون بر تحمل اختلاف فشار داخل تیوب شتابگر و بیرون (10^{-6} mbar) حرارت ناشی از بمباران هدف را نیز به‌خوبی انتقال دهد. در این پژوهش، با توجه به ویژگی‌های فلز تیتانیوم، هدف از جنس تیتانیوم انتخاب شده است. در شتابگر ES-150 قطر باریکه فرودی در محل هدف برابر 20 mm است، از این‌رو، قطر لایه تیتانیوم به اندازه 25 میلی‌متر انتخاب شد تا در صورت انحراف جزئی مرکز باریکه از مرکز هدف، باریکه از محدوده تیتانیومی هدف خارج نشود. فرآیند انباشت تیتانیوم بر روی زیرلایه مسی با استفاده از دستگاه کندوپاش پرتو یونی انجام شد که به کمک چشمه‌ای با انرژی $5-2\text{ KeV}$ و بیشینه جریان خروجی $10-5\text{ mA}$ پرتو دهی می‌کند. در روش کندوپاش پرتو یونی، سطح تیتانیوم با استفاده از یون‌های شتابدار آرگون بمباران می‌شود. برخورد یون‌های آرگون به سطح تیتانیوم، سبب جدا شدن اتم‌های تیتانیوم می‌شود، در شرایط فشار و دمای قابل‌هدایت اتم‌های تیتانیوم بر روی سطح زیرلایه مسی انباشت می‌شود. شکل (۱) شماتیک دستگاه مورد استفاده جهت انباشت لایه هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک سیستم کندوپاش جهت انباشت لایه هدف.

Figure 1. Schematic of the sputtering system for target layer deposition.

جهت فرآیند انباشت، نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و تمیزکاری در دستگاه آلتراسونیک، داخل محفظه دستگاه و روی نگهدارنده زیرلایه، که دارای یک گرمکن برای تنظیم دمای زیرلایه است، قرار داده شدند. دمای زیرلایه به وسیله یک ترموکوپل متصل به نگهدارنده هدایت می‌شود. پس از ایجاد خلأ 10^{-6} mbar و بالابردن دمای زیرلایه تا 400°C گاز آرگون به سمت چشمه‌های کافمن هدایت شده و بعد از یونیزه‌شدن داخل چشمه و تشکیل پلاسما، یون‌ها با ولتاژ شتاب‌دهنده 2.2 kV به سمت هدف شتاب‌دار می‌شوند. جریان بین چشمه و هدف که در اثر انتقال یون‌ها به سمت هدف ایجاد می‌شود در مقدار 10 mA ثابت نگه داشته شد. برخورد یون‌های شتاب‌دار آرگون با هدف تیتانیومی منجر به پراکنش اتم‌های تیتانیوم می‌شود. مدت زمان انجام عملیات لایه‌نشانی ۳ ساعت است. شرایط انباشت لایه‌های تیتانیوم بر روی زیرلایه مسی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ شرایط انباشت لایه تیتانیوم بر زیرلایه مس.

Table 1. Deposition conditions of titanium film on copper substrate

Film	Substrate	Substrate Temp (°C)	Base Pressure (mbar)	Deposition Time (Hour)	Sputtering Source Voltage (kV)	Sputtering Source Current (mA)
Titanium	Copper	400	1×10^{-6}	3	2.2	10

در این مقاله از شتابگر الکترواستاتیک $150\text{-}02$ Multivolt (مدل $150\text{-}02$ Multivolt) استفاده شد. این شتابگر توانایی تولید باریکه دوترون با بیشینه انرژی 150 keV و بیشینه جریان 1 mA با نوسان جریان $20\text{ }\mu\text{A}$ و نوسان ولتاژ 10 kV است. همچنین قطر باریکه خروجی برابر 1 mm است. در این شتابگر از یک چشمه یونی بسامد رادیویی برای تولید یون مثبت استفاده شده است. یون‌های تولیدشده در محیط پلاسمای چشمه با اختلاف پتانسیل میان آند و کاتد از چشمه بیرون رانده می‌شوند. ذرات خروجی از چشمه تحت یک اختلاف پتانسیل 150 kV در ستون شتابدهی، شتاب داده می‌شوند.

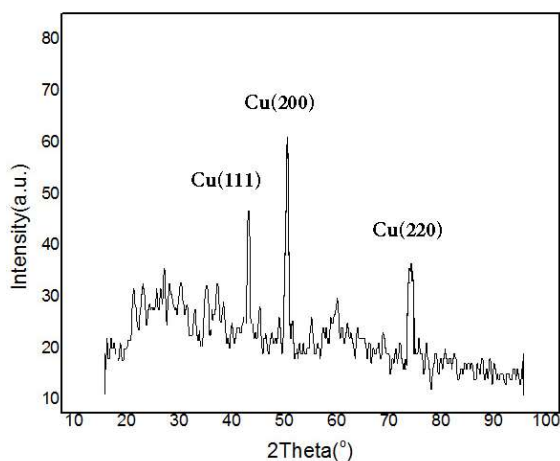
در این پژوهش از آشکارساز BF_3 مدل LND-INC2022 made in USA 91-46 جهت مشخص کردن شار نوترونی استفاده شد. محل استقرار شتابگر و آشکارساز BF_3 در یک سالن با دیوارهای بتونی است و به کمک دو دوربین امکان دیدبانی شرایط آزمایشگاه در زمان پرتودهی در اتاق کنترل فراهم شده است. مرکز هدف به عنوان نقطه مرجع انتخاب شد و ارتفاع مرکز سلول طیف‌نگار به گونه‌ای مشخص گردید که هم ارتفاع با مرکز هدف باشد. راستای خطی که مرکز هدف را به مرکز طیف‌نگار متصل می‌کند به عنوان زاویه صفر در نظر گرفته شد که همان امتداد باریکه دوتریوم فرودی است. طیف‌نگار در فاصله 15 سانتی‌متری و عمود نسبت به هدف قرار گرفت. منابع تغذیه و پیش تقویت‌کننده‌های طیف‌نگار و آشکارساز BF_3 در محل آزمایش قرار گرفتند و با استفاده از کابل‌های BNC طولی به اتاق کنترل متصل شدند. مدت زمان پرتودهی حدود 2 ساعت در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از بروز خطا در نتایج، جریان روی هدف هر ده دقیقه یک‌بار ثبت شده و یک شمارنده نوترونی از نوع BF_3 در فاصله‌ای ثابت از هدف قرار داده شده است. شمارش مربوط به نوترون‌ها به کمک یک شمارشگر به مدت 600 ثانیه و حدود هر 10 دقیقه یک‌بار ثبت شدند.

جهت اطمینان از تکرارپذیری و نیز پایداری هدف ساخته شده، اندازه گیری شار نوترون برای این هدف، سه بار و در روزهای متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. جهت مقایسه نتایج با زمینه، یک هدف بدون تزریق^۱ مشابه با مشخصات هدف اصلی تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت.

۳. نتایج

۱.۳ طیف پراش اشعه ایکس

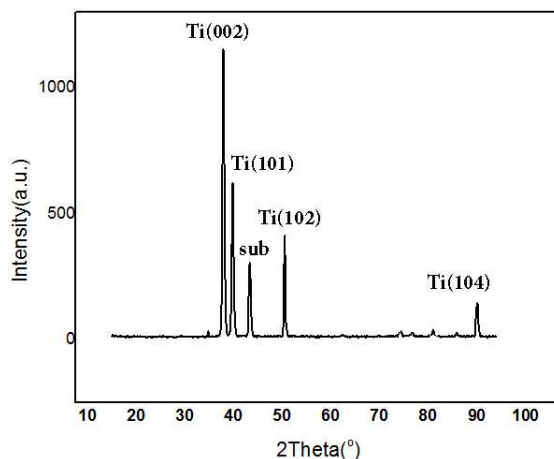
طیف پراش اشعه ایکس نمونه های هدف ساخته شده و زیرلایه، به روش تحلیل پراش پرتو ایکس با استفاده دستگاه با مدل (STOE MP-Stady, Germany) و تابش $\text{Cu-K}\alpha$ مورد بررسی قرار گرفت. طیف مربوط به زیرلایه مسی و هدف ساخته شده در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲ طیف پراش اشعه ایکس مربوط به زیرلایه مسی.

Figure 2. The XRD patterns of copper substrate.

¹Blank



شکل ۳ طیف پراش اشعه ایکس مربوط به هدف.

Figure 3. The XRD patterns of target.

همان طور که از طیف پراش زیرلایه مسی مشخص است، برابر با کارت استاندارد به شماره ۰۸۳۶- JCPDS ۰۰۴-۰۰ این طیف دارای سه قله با جهت گیری های $\text{Cu}(111)$ ، $\text{Cu}(200)$ و $\text{Cu}(220)$ به ترتیب در زوایای 43.31° و 50.45° و 74.12° است. طیف پراش هدف ساخته شده، دارای چهار قله با جهت گیری های $\text{Ti}(002)$ ، $\text{Ti}(101)$ ، $\text{Ti}(102)$ و $\text{Ti}(104)$ به ترتیب در زوایای 38.42° ، 40.17° ، 45.00° و 88.00° است [۲۴]. همچنین یک قله $\text{Cu}(111)$ مربوط به زیرلایه در طیف پراش هدف قابل مشاهده است که دلیل آن نفوذ پرتوهای ایکس به عمق نمونه است. با توجه به ضخامت لایه هدف، نفوذ پرتو ایکس به زیرلایه و ثبت صفحات مس امکان پذیر است. مفیدترین الگو برای استفاده از روش پراش پرتو ایکس برای محاسبه اندازه بلورک، استفاده از عرض قله بیشینه در نصف ارتفاع است. پهنای قله در نصف ارتفاع به تعداد صفحات بازتاب دهنده بلوری بستگی دارد. رابطه شرر^۱ اندازه بلورکها (حوزه پراشده همدوس) را بر حسب پهنای قله پراش پرتو ایکس در نصف ارتفاع و سایر شرایط پراش می دهد:

$$D = \frac{k \lambda}{\cos \theta B_p} \quad (1)$$

در این رابطه D اندازه بلورک، k ضریب ثابت با مقدار 0.9 ، λ طول موج پرتو ایکس و B_p پهنای قله بیشینه در نصف ارتفاع آن است. اندازه بلورک برای لایه نازک تیتانیوم، با استفاده از رابطه شرر برای جهت گیری غالب $\text{Ti}(002)$ مقدار 52 nm محاسبه شد.

¹ The Scherrer

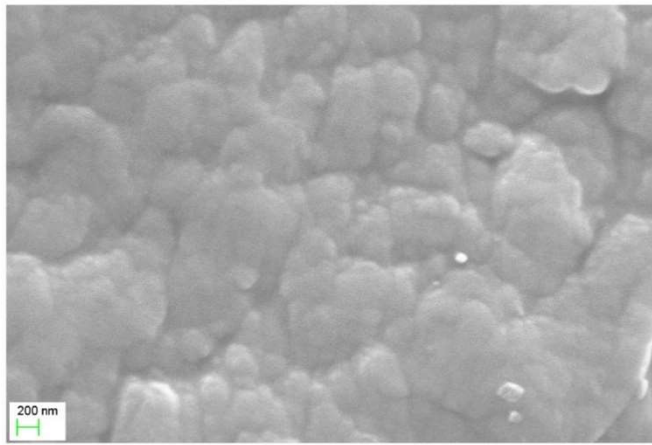
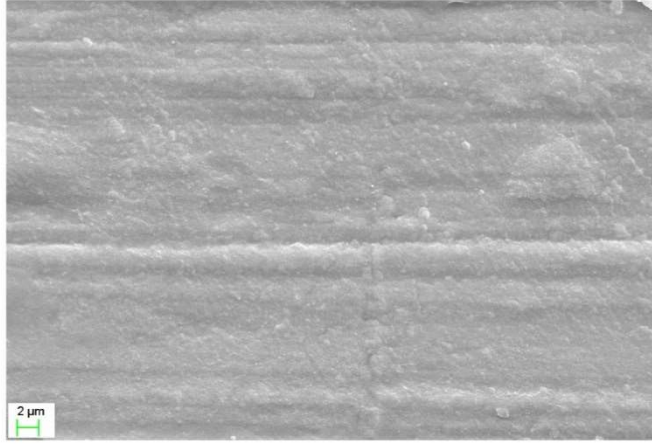
۲.۳ ریخت شناسی

میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی ریخت شناسی سطح هدف با دو بزرگنمایی مختلف استفاده شد. تصاویر در مقیاس های $2\ \mu\text{m}$ و $200\ \text{nm}$ نشان دهنده تشکیل لایه نازک و ساختار دانه‌ای است و در تحلیل EDX، عناصر موجود در لایه‌ها نیز شناسایی شدند. شکل (۴) تصویر SEM نمونه هدف، شکل (۵) تصویر سه بعدی برای مقیاس $200\ \text{nm}$ حاصل از نرم افزار Imagej و شکل (۶) نتیجه آنالیز EDX را نشان می‌دهد.

تصاویر SEM نشان می‌دهد که لایه به صورت یکنواخت تشکیل شده است و پدیده خاصی روی سطوح دیده نمی‌شود. تنها در برخی از قسمت‌ها، شیارهای ریز در بزرگنمایی $2\ \mu\text{m}$ مشاهده می‌شود که ممکن است ناشی از برخورد یون‌های شتابدار در خلال بمباران با استفاده از شتابگر الکترواستاتیک باشد. با تصویربرداری در بزرگنمایی $200\ \text{nm}$ ، ساختار سطحی نمونه با جزئیات بیشتر قابل مشاهده است، به صورتی که حفره و خلل و فرج ناهمگن در لایه‌ها مشاهده نمی‌شود که دلیل بر یکنواختی پوشش است. در این تصویر، سطحی با توزیع یکنواخت از دانه‌هایی با اندازه دانه در محدوده چند ده نانومتر قابل مشاهده است.

با استفاده از تصویر سه بعدی SEM، مشاهده می‌شود که به دلیل کوچکی اندازه دانه‌های نمونه (nm ۶۱-۲۵)، لایه تیتانیوم به صورت یکنواخت و یکپارچه بر روی زیرلایه رشد کرده است. شکل (۵) تصویر سه بعدی را برای مشاهده بهتر تغییرات زبری سطح نشان می‌دهد. این تصویر سه بعدی با استفاده از نرم افزار Imagej (1.54) بدست آمده است. در این تصویر، تغییرات ارتفاع بر اساس تغییر شدت رنگ دیده می‌شود.

در شکل (۶) نتیجه بررسی عنصری برای هدف نمایش داده شده است، به صورتی که طیف محاسبه شده شامل Cu برای زیرلایه مس و پوشش Ti می‌باشد. قلّه دیگری نیز در انرژی $2.1\ \text{keV}$ دیده می‌شود که مربوط به لایه نازک طلای انباشت شده پیش از تصویربرداری SEM می‌باشد.

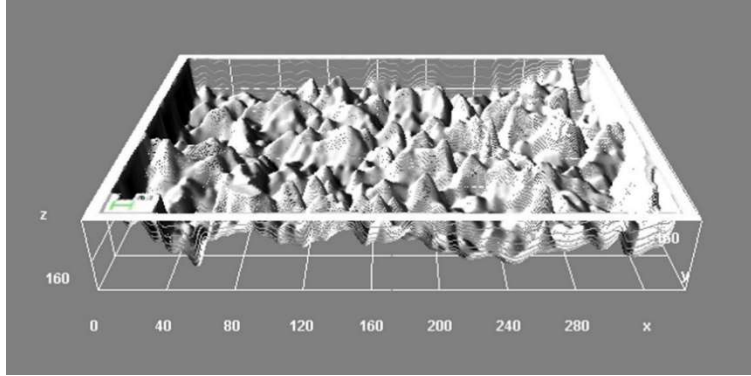


شکل ۴ تصویر SEM نمونه هدف.

Figure 4. The SEM image of target.

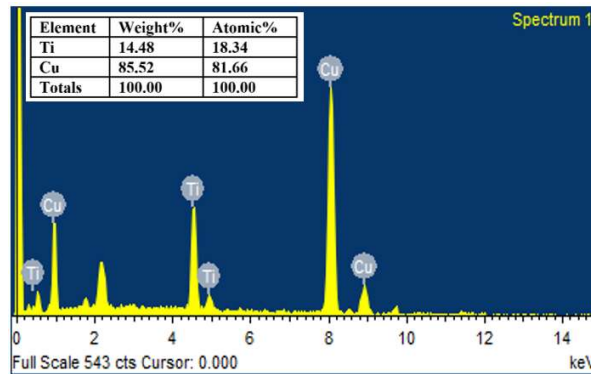
SSS

AN



شکل ۵ تصویر SEM سه بعدی نمونه هدف.

Figure 5. The 3D SEM image of target.



شکل ۶ تصویر EDX نمونه هدف.

Figure 6. The EDX image of target.

۳.۳ مشخصه یابی هدف با استفاده از روش های آنالیز با باریکه یونی

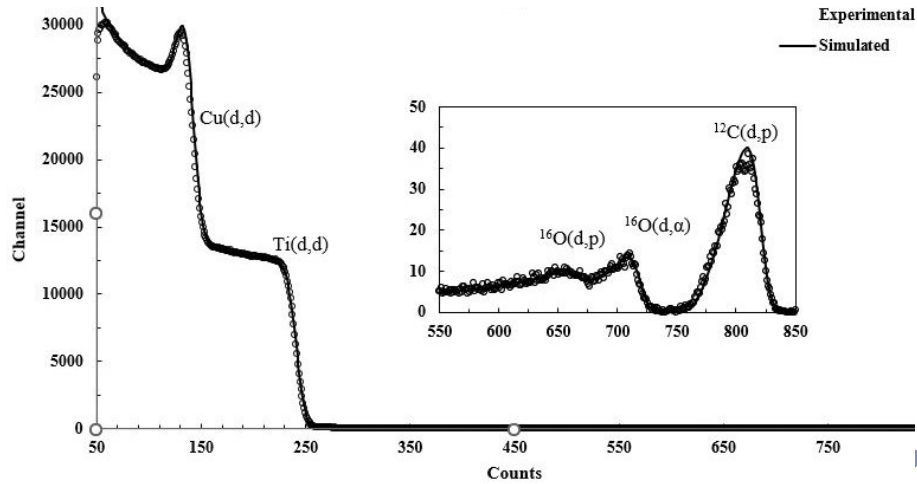
غلظت و نمایه عمقی عناصر تیتانیوم و هیدروژن به همراه ناخالصی های کربن و اکسیژن موجود در هدف ساخته شده به کمک روش های مبتنی بر بررسی با باریکه یونی شامل RBS^1 ، NRA^2 و ERD^3 مشخص شدند. بررسی ها با استفاده از باریکه خروجی از شتابگر واندوگراف ۳ MV تهران در محفظه واکنش نصب شده بر روی خط باریکه 30° انجام شد. این محفظه دارای یک نگهدارنده

¹ Rutherford Backscattering Detection

² Nuclear Reaction Analysis

³ Elastic Recoiled Detection

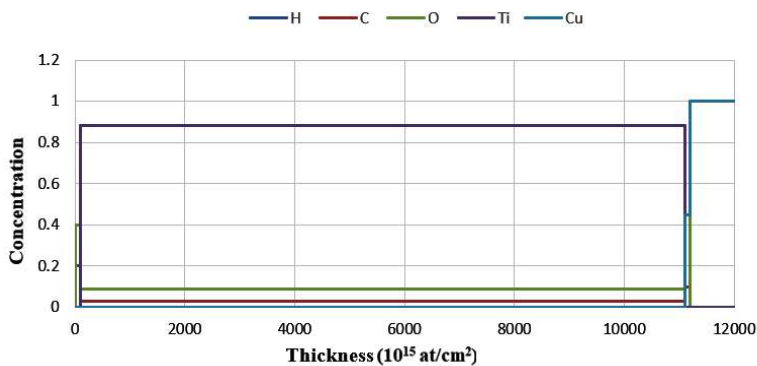
هدف دوار با ظرفیت ۱۲ نمونه و توانایی تغییر زاویه فرودی باریکه بین 0° تا 90° است. همچنین این محفظه توانایی نصب و بهره‌برداری همزمان از ۴ آشکارساز سدسطحی در زوایای پراکندگی مختلف را دارد. نمایه عمقی لایه تیتانیوم بر زیرلایه مس با استفاده از آنالیز RBS و نمایه عمقی عناصر سبک کربن و اکسیژن با آنالیز NRA به کمک واکنش‌های هسته‌ای $^{16}\text{O}(d,p,0,1)$ ، $^{16}\text{O}(d,\alpha)$ و $^{12}\text{C}(d,p)$ مشخص شدند [۲۵]. هر دو بررسی با مطالعه و تفسیر همزمان طیف برهمکنش باریکه دوتریوم 1000 keV با سطح نمونه در زاویه پراکندگی 165° انجام شد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده حاصل ضرب بار در زاویه فضایی با برازش طیف پس‌پراکندگی زیرلایه سنگین مس محاسبه شده است. نمایه عمقی هیدروژن موجود در نمونه‌ها به کمک بررسی ERD و با استفاده از باریکه آلفا 1800 keV انجام شد. برای آشکارسازی هسته‌های هیدروژن پس‌زده شده از سطح نمونه از یک آشکارساز سدسطحی در زاویه پراکندگی 30° استفاده شد. بدین منظور نمونه 70° نسبت به باریکه فرودی چرخانده شده و برای حذف ذرات آلفا پراکنده شده از سطح نمونه دهانه آشکارساز رو به عقب با یک لایه کپتون به ضخامت $7 \mu\text{m}$ پوشانده شد. همچنین در این آنالیز از آشکارساز واقع در زاویه پراکندگی 165° برای دیده‌بانی باریکه فرودی استفاده شد. شبیه‌سازی تمام طیف‌های ثبتی با استفاده از نرم‌افزار SIMNRA 7.01 و انتخاب الگوی توان توقف Zigler/Biersack و الگوی تفرق Chu&Yang انجام شد. داده‌های ارزیابی شده سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای دوتریوم روی عناصر سبک اکسیژن و کربن و پراکندگی آلفا روی هیدروژن از سایت IBANDL استخراج شدند [۲۶-۲۷]. پراکندگی پرتابه‌های دوتریوم و آلفا از روی زیرلایه فلزی، سطح مقطع رادرفورد با تقریب Andersen در نظر گرفته شد. در تمامی آزمایش‌ها ابعاد باریکه روی نمونه $2 \times 2 \text{ mm}^2$ و شدت باریکه حدود 20 nA در نظر گرفته شد. طی آزمایش زمان مرده سامانه آشکارسازی همواره کمتر از 10% بوده است. خطای سیستماتیک اندازه‌گیری‌ها 10% (با دقت ± 1) مربوط به حاصل ضرب بار در زاویه فضایی، سطح مقطع و برازش طیف در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از طیف پس‌پراکندگی دوترون با انرژی $E_d=1000 \text{ keV}$ از روی هدف ساخته شده در زاویه 165° به همراه شبیه‌سازی طیف مربوط به بررسی‌های RBS و NRA در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل ۷ طیف پس پراکنده‌گی دوترون $E_d=1000$ keV از روی هدف ساخته شده به همراه شبیه‌سازی طیف مربوط به بررسی‌های RBS و NRA.

Figure 7. Deuteron backscatter spectrum $E_d=1000$ keV from the fabricated target along with simulation of the spectrum from RBS and NRA analyses.

نمایه عمقی یکی از نمونه‌ها بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در شکل (۸) نمایش داده شده است. با توجه به شکل، نمونه دارای یک زیرلایه مسی ضخیم و لایه نازک تیتانیوم به ضخامت $1.9 \mu\text{m}$ (با فرض چگالی 4.52 g/cm^3) و اندکی آلودگی هیدروکربنی (شامل 20% هیدروژن، 40% کربن و 40% اکسیژن) به ضخامت کمتر از 10 nm در سطح لایه تیتانیومی است. میزان ناخالصی‌های کربن و اکسیژن در لایه سطحی تیتانیوم به ترتیب کمتر از 3% و 9% است. در سطح زیر لایه مسی نیز یک لایه اکسیدی نازک (حدود 10 nm) به همراه آلودگی کربنی وجود دارد. میزان هیدروژن موجود در لایه تیتانیوم کمتر از حد آشکارسازی (10 ppm) است. در حقیقت، بر اساس بررسی انجام‌شده، این لایه بدون ناخالصی هیدروژن است.



شکل ۸ نمایه عمقی هدف ساخته شده بر اساس آنالیزهای RBS، NRA و ERD.

Figure 8. Target depth profile constructed based on RBS, NRA, and ERD analyses.

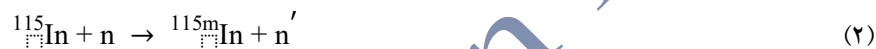
۴.۳ اندازه‌گیری شار نوترونی هدف

در شتابگر الکترواستاتیک مورد استفاده، نوترون‌ها با واکنش D-D بدست می‌آیند. میزان شار نوترون تولیدشده از این دستگاه متناسب با میزان جریان باریکه فرودی، انرژی ذرات، چگالی اتم‌های موجود در هدف و سطح موثر برخورد باریکه با هدف است. به صورتی که می‌توان با ثابت نگاه‌داشتن چند کمیت به بررسی دیگر کمیت‌ها پرداخت. در این مقاله برای مشخص شدن کیفیت و میزان کارایی هدف‌های تولیدشده، با ثابت نگاه‌داشتن انرژی ذرات فرودی، سطح هدف و دانستن جریان ذرات برخوردکننده با هدف به مقایسه نرخ تولید نوترون در چند هدف پرداخته شده است. برای بمباران هدف‌ها با باریکه دوتریوم دو روند به کار گرفته شد. در روند اول یا روند بدون تزریق، هدف با باریکه 120 keV از یون‌های دوتریوم به مدت ۲ ساعت بمباران شده و سپس شمارش نوترون انجام شده است. در روش دوم ابتدا به مدت ۲ ساعت نمونه هدف تحت تابش یون‌های دوتریوم با انرژی 60 keV قرار گرفته و سپس بمباران با باریکه دوتریوم‌های با انرژی 120 keV به مدت ۲ ساعت انجام و در نهایت محصول نوترونی، شمارش شده است.

برای اندازه‌گیری شار نوترون‌های سریع تولیدشده، راحت‌ترین و دقیق‌ترین روش، روش فعال‌سازی نوترونی است. نوترون را می‌توان یا با واکنش گامایی که هنگام گیراندازی گسیل می‌شود و یا با تابش گسیل شده از سوی رادیویزوتوپ‌هایی که پس از گیرافتادن نوترون تولید می‌شود، آشکار ساخت. این رادیویزوتوپ ممکن است β^- یا β^+ یا گاما و یا ترکیبی از آن‌ها را تابش کند. با شمارش فعالیت

این رادیوایزوتوپ، اطلاعاتی پیرامون شار نوترونی که آن ایزوتوپ را تولید کرده است، بدست می‌آید.

واکنش‌های هسته‌ای مشخصی چون واکنش‌های $(n,2n)$ ، پراکندگی غیرالاستیک و بعضی واکنش‌های (n,p) ، (n,α) و (n,γ) هنگامی که انرژی نوترون‌ها بیش از انرژی آستانه معینی باشد، انجام می‌گیرد. در اغلب موارد این واکنش‌ها منجر به تولید ماده رادیواکتیو می‌گردند که پس از پرتودادن، قابل اندازه‌گیری است. با استفاده از این واکنش‌ها و با کمک آشکارسازهای آستانه که به شکل پولک‌ها و سیم‌های فلزی هستند، می‌توان مقدار شار، طیف انرژی و دز نوترون‌های سریع را مشخص کرد. در این مطالعه، هدف از این اندازه‌گیری‌ها بدست آوردن شار نوترون حاصل از واکنش D-D مولد نوترون است، که در نتیجه آن نوترون‌هایی با انرژی ۲-۳ MeV تولید می‌شود، برای این ناحیه از انرژی نوترون از فویل ایندیم و واکنش $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ استفاده شد. ضخامت نمونه به حد کافی نازک است تا شار رسیده به تمام اتم‌ها کمابیش ثابت باشد. ایندیم تحت شار نوترون با رابطه زیر برهم‌کنش می‌کند:



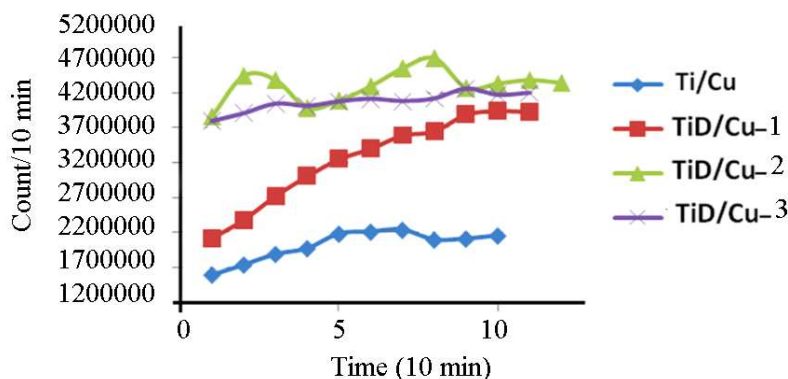
ایندیم شبه پایدار (^{115m}In) با رابطه زیر واپاشی می‌کند:



جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری بهره نوترونی.

Table 2 Neutron gain measurement results.

Target	Time	Irradiation Time (Hour)	Deuterium beam current (μA)	Indium foil activity (Bq)	Neutron Yield (at target position) (n/S)
Ti/Cu (Without injection)	1402/10/18	2	200	18	$5.247 \times 10^6 \pm 10\%$
TiD/Cu	1402/10/20	2	200	116.76	$3.727 \times 10^7 \pm 10\%$
TiD/Cu	1402/11/05	2	200	193.7	$6.091 \times 10^7 \pm 10\%$
TiD/Cu	1403/03/22	2	200	110.95	$4.031 \times 10^7 \pm 10\%$



شکل ۹ شمارش ثبت شده با استفاده از آشکارساز BF₃ در بازه‌های ده دقیقه‌ای برای هدف TiD/Cu و هدف بدون تزریق.

Figure 9. Counts recorded by the BF₃ detector at ten-minute intervals for the TiD/Cu target and the target without injection.

با توجه به جدول (۲)، اندازه‌گیری شار نوترون بدست آمده از واکنش D-D در دو مقطع زمانی پس از شمارش اولیه با فاصله زمانی ۲ و ۲۰ هفته، از مرتبه 10^7 n/s است و در این بازه زمانی هدف ساخته شده پایداری مناسبی از خود نشان داده است. از طرفی مقایسه شار نوترون برای هدف ساخته شده و هدف بدون تزریق، نشان‌دهنده افزایش یک مرتبه در شار نوترون اندازه‌گیری شده، می‌باشد که این تغییر به دلیل حبس گازهای تزریق شده در هدف مورد مطالعه می‌باشد.

شکل (۹) مقدار شمارش ثبت شده توسط آشکارساز BF₃ در بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای برای هدف بدون تزریق و هدف تزریق شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد برای بررسی اثر زمان، هدف تزریق شده با گذشت زمان ۲ و ۲۰ هفته از زمان اولین شمارش، تحت بمباران در شتابگر و شمارش نوترون قرار گرفت و نتایج این شمارش در شکل (۹) با منحنی‌های TiD/Cu-۱، TiD/Cu-۲ و TiD/Cu-۳ به ترتیب برای شمارش در نخستین آزمایش، شمارش با گذشت ۲ هفته و شمارش با گذشت ۲۰ هفته مشخص شد که نتایج این شمارش‌ها به صورت کمی در جدول (۲) آمده است. قابل ذکر است که نوسانات منحنی شماره (۲) به دلیل موقعیت آشکارساز در زمان انجام آزمایش و نوفه ناشی از منبع ولتاژ مولد نوترون می‌باشد که البته در نهایت بهره نوترون نهایی ثبت شده با دو شمارش دیگر، از یک مرتبه می‌باشند.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش کندوپاش پرتو یونی، یک لایه نازک تیتانیوم به ضخامت $1/9 \mu\text{m}$ در فشار پایه 10^{-6} mbar بر روی یک زیرلایه مسی لایه نشانی شد. تجزیه و تحلیل طیف پراش اشعه ایکس نقشی اساسی در توصیف نمونه‌های تولید شده ایفا کرد و قله‌های مختلف تیتانیوم با جهت گیری غالب $\text{Ti}(002)$ را در زاویه $38/42^\circ$ برای لایه رسوب شده نشان داد. افزون بر این، طیف پراش اشعه ایکس نمونه هدف، قله $\text{Cu}(111)$ در زاویه $43/31^\circ$ را که مربوط به زیرلایه مسی است، را آشکار کرد. تصاویر SEM، لایه‌ای با ساختار یکنواخت با توزیع منظم دانه‌ها و بدون نقص را نشان می‌دهد و هیچ گونه پدیده ویژه‌ای در سطح آن مشاهده نمی‌شود. نتیجه بررسی EDX نیز شامل عناصر تیتانیوم و مس می‌باشد. مشخصه یابی عنصری با روش‌های مبتنی بر بررسی با باریکه یونی نشان داد که نمونه دارای یک زیرلایه مسی ضخیم و لایه تیتانیوم با ضخامت $1/9 \mu\text{m}$ است. همچنین، میزان ناخالصی‌های کربن و اکسیژن در لایه سطحی تیتانیوم کمتر از 3% و 9% است. در ادامه استفاده از یک شتابگر الکترواستاتیک، دستیابی به شار نوترون هدف بهینه را در شرایط بمباران دقیق در سه مقطع زمانی مجزا مهیا کرد و مقایسه‌ی از مرتبه 10^7 n/s یافت شد. ثبات در داده‌ها با گذشت زمان، بر پایداری هدف تأکید می‌کند. مقایسه بین شار نوترونی نمونه بهینه و نمونه بدون تزریق، تفاوتی به اندازه یک واحد در بزرگی مرتبه تولید نوترون را نتیجه داد.

مراجع

- [1] Leung, K.N., "New compact neutron generator system for multiple applications", *Nuclear Technology* **206(10)**, 1607-1614, 2020. <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1719800>
- [2] Wu, Y., "Development of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG", *International Journal of Energy Research* **42(1)**, 68-72, 2018. <https://doi.org/10.1002/er.3572>
- [3] Ludewigt, B.A., Wells, R.P. and Reijonen, J., "High-yield D-T neutron generator", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **261(1-2)**, 830-834, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.246>
- [4] Metwally, W.A., Adel, Y., Dalah, E.Z. and Al-Omari, H., "Utilizing neutron generators in boron neutron capture therapy", *Applied Radiation and Isotopes* **174**, 109742, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109742>

- [5] Miceli, A., Festa, G., Gorini, G., Senesi, R. and Andreani, C., "Pulsed neutron gamma-ray logging in archaeological site survey", *Measurement Science and Technology* **24**(12), 125903, 2013. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/12/125903>
- [6] Xu, X., Chang, Y., Tang, W., Sun, Y., Lu, J., Zhao, L. and Li, X., "Measurement of neutron yield and angular distribution for DT neutron generator by neutron activation analysis method", *Applied Radiation and Isotopes* **156**, 108971, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108971>
- [7] Das, B.K., Das, R., Verma, R. and Sharma, A., "Characterization of deuteriated titanium thin film by residual gas analyzer", *Vacuum* **196**, 110724, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110724>
- [8] Liu, J., Lu, J., Xu, X., Li, C., Wang, Y. and He, H., "The influence of target film material and coating on neutron yield and sputtering yield", *Materials Research Express* **9**(1), 015503, 2022. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac38dd>
- [9] Mehrabi, M., Vosoughi, S., Salek, N. and Ghapanvari, M., "Investigation of geometric effects on fast neutron radiography using IECF", *Annals of Nuclear Energy* **181**, 109547, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109547>
- [10] Rajput, M., Swami, H.L., Vala, S., Abhangi, M., Kumar, R. and Kumar, R., "Tritium-titanium target degradation due to deuterium irradiation for DT neutron production", *Nuclear Fusion* **63**(6), 066033, 2023. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/accd80>
- [11] Kargaryan, A., Ghapanvari, M., Sedaghat, M., Aslezaem, A. and Bagheri, A., "Design and construction of a solid target with a cooling system to investigate the surface fusion phenomenon", *Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology (JONSAT)* **43**(3), 113-123, 2022. <https://doi.org/10.24200/nst.2022.1453>
- [12] Bystritsky, V.M., Dudkin, G.N., Filipowicz, M., Tuleushev, Y.Z. and Zhakanbaev, E.A., "Targets of deuterides TiD₂, ZrD₂, NbD, and CrD₂ with different structures used in experiments on the study of pd and dd reactions at astrophysical energies", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **810**, 80-85, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.006>
- [13] Bergaoui, K., Reguigui, N., Gary, C.K., Brown, C., Cremer, J.T., Vainionpaa, J.H. and Piestrup, M.A., "Development of a new deuterium–deuterium (D–D) neutron generator for prompt gamma-ray neutron activation analysis", *Applied Radiation and Isotopes* **94**, 319-327, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.09.004>
- [14] Tayyebi, P. and Davani, F.A., "Design and Construction of Deuterium Target for Fast neutron Production", *IEEE NPSS Toronto Proceedings* (2010).
- [15] Seyfi, S., Rahmani, F., Ghaasemi, F., Tavakkoli, H., "Optimum photoneutron target design for 10 MeV linear accelerator for the purpose of radiotherapy and radiography", *Proceeding of*

the Annual Physics Conference of Iran, Birjand University, Tehran, 26-29 August, 2013. (in Persian)

[16] Bystritsky, V.M., Bystritskii, V.M., Dudkin, G.N., Filipowicz, M., Gazi, S., Huran, J., Mesyats, G.A., Nechaev, B.A., Padalko, V.N., Parzhitskii, S.S. and Pen'kov, F.M., "Effect of the crystal structure of a deuterated target on the yield of neutrons in the dd reaction at ultralow energies", *JETP letters* **99**, 497-502, 2014. <https://doi.org/10.1134/S0021364014090033>

[17] Guo, W.T., Zhao, S.J., Jing, S.W. and Zheng, Y.L., "Effect of target film materials on neutron yield of neutron tube with drive-in target", *Radiation Physics and Chemistry* **182**, 109358, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109358>

[18] Guo, W.T., Zhao, S.J., Yu, Z.T., Shi, G.Y. and Jing, S.W., "Effect of target material on neutron output and sputtering yield of DD neutron tube", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **473**, 48-54, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.04.017>

[19] Demin, A.S., Morozov, E.V., Maslyayev, S.A., Pimenov, V.N., Gribkov, V.A., Demina, E.V., Sasinovskaya, I.P., Sirotinkin, V.P., Sprygin, U.S., Bondarenko, G.G. and Tikhonov, A.N., "The influence of a powerful stream of deuterium ions and deuterium plasma on the structural state of the surface layer of titanium", *Inorganic Materials: Applied Research* **8**, 412-418, 2017. <https://doi.org/10.1134/S2075113317030078>

[20] Reichenbach, B., Johnson, B.B. and Schwoebel, P.R., "The field evaporation of deuterated titanium as a neutron generator ion source", *Journal of Applied Physics* **108(9)**, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3499697>

[21] Bystritsky, V.M., Dudkin, G.N., Filipowicz, M., Tuleushev, Y.Z. and Zhakanbaev, E.A., "Targets of deuterides TiD₂, ZrD₂, NbD, and CrD₂ with different structures used in experiments on the study of pd and dd reactions at astrophysical energies", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **810**, 80-85, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.006>

[22] Hong, Z., Wang, L., Feng, Y., Gong, B., Yang, J. and Wang, X., "Study on deuterium permeation behavior of palladium films prepared by magnetron sputtering method", *Coatings* **12(7)**, 978, 2022. <https://doi.org/10.3390/coatings12070978>

[23] Liu, J., Lu, J., Xu, X., Li, C., Wang, Y., He, H., "The influence of target film material and coating on neutron yield and sputtering yield", *Mater. Res. Express* **9**, 015503-015512, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.04.017>

[24] Karimi, M., Grayeli, A.R., Larijani, M.M., "Design, fabrication and characterization of titanium thin film applicable in deuterium target", *29th Iranian nuclear Conference, Tehran, 26 Feb, 2023*.

[25] Tesmer, J. R., Nastasi, M., "Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis", *Mater. Res. Society, New York*, 2, 2009.

[26] Mayer, M., "SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA", In *AIP conference proceedings* **475(1)**, 541-544, American Institute of Physics, 1999.
<https://doi.org/10.1063/1.59188>

[27] <https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>. Available in 8 June 2024

Article in Press