

## بررسی تأثیر نوع یون بر خواص انتقال و تراپردی با کاشت یون در تانتالوم

امیر هوشنگ رمضانی، ژاله ابراهیمی نژاد، و سمیه عسگری

گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

پست الکترونیکی: ramezani@wtiau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

### چکیده:

در این تحقیق بر روی سطوح تانتالوم توسط یون نیتروژن و آرگون با چگالی سطحی یونی  $1 \times 10^{17}$  تا  $10 \times 10^{17}$  (یون بر سانتی متر مربع) فرایند کاشت انجام شده است. فرایند کاشت یونی منجر به تغییر ریخت شناسی سطوح می‌شود و تمامی سطوح ناشی از این فرایند ناهموار هستند. این سطوح ناهموار به عنوان فصل مشترک در ساختارهای چندلایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته و بر خواص تراپردی این ساختارها اثر می‌گذارند. برای مطالعه ریخت‌شناسی سطوح لایه‌های نازک کاشته شده یونی، از تحلیل میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) استفاده شده است. فرایند کاشت یونی منجر به تغییر ریخت شناسی سطوح می‌شود و تمامی سطوح ناشی از این فرایند ناهموار هستند. این سطوح ناهموار به عنوان فصل مشترک در لایه کاشته شده مورد استفاده قرار گرفته و بر خواص تراپردی این ساختارها اثر می‌گذارند. نتایج نشان می‌دهد که رابط‌هایی که با کاشت یون آرگون تولید شده‌اند نسبت به یون نیتروژن تغییرات بیشتری دارد. همچنین نسبت قله‌ها به دره در دو مورد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش چگالی سطحی یونی نیتروژن، چگالی جریان به عنوان تابعی از ولتاژ کاهش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** تانتالوم، زبری سطح، لایه نازک، کاشت یون

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر لایه‌های نازک مبتنی بر تانتالوم در زمینه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]، زیرا خواص مختلفی مانند مقاومت در برابر خوردگی بالا، خواص مکانیکی و چگالی کم دارند [۲]. کاشت یون‌های اکسیژن، آرگون، کربن و نیتروژن سطح تانتالوم را بهبود بخشیده است [۳-۴]. پارامترهایی مانند دما، انرژی یون، چگالی جریان و تابش در ویژگی فیلم‌های کاشته شده یونی مهم هستند. فرایند کاشت یون و شرایط رشد بر ریخت‌شناسی رابط‌های کاشته شده و نمونه‌های تولید شده مکانیکی، الکتریکی و نوری تأثیر می‌گذارد. آثار تجربی و نظری زیادی وجود دارد که آنها خواص انتقال را از طریق لایه‌های

نازک مبتنی بر تانتالوم مورد مطالعه قرار دادند [۵-۱۰]. همچنین، تأثیر زبری و ریخت‌شناسی سطوح مبتنی بر تانتالوم بر عملکرد دستگاه‌های الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. روش‌های مختلفی برای تولید رابط‌های ناهموار [۷] وجود دارد و تأثیر سطوح رابط‌های ناهموار بر رسانایی الکتریکی سازه‌ها بررسی شده است [۸]. فرایند کاشت یون باعث زبر شدن سطوح مشترک و سطوح حاصل می‌شود [۱۱-۱۶]. در اینجا، اثر انواع یون‌ها (آرگون و نیتروژن) بر روی خواص انتقال لایه‌های نازک بر پایه تانتالوم که به عنوان ساختارهای چندلایه استفاده می‌شوند، بررسی شده است. احتمال انتقال و چگالی جریان کنکاش شده است. تمامی سطوح موجود در طبیعت ناهموار هستند، اما فرایند کاشت یونی منجر به تغییر ریخت

جدول ۱. شرایط کاشت یون برای نمونه‌ها.

نمونه	انرژی keV	جریان $\mu A/cm^2$	خلأ $\times 10^{-6}$ Torr	زمان S	دز $ion/cm^2$
۱	۳۰	۴۰	$2/7 \times 10^{-6}$	۳۶۰	$1 \times 10^{17}$
۲	۳۰	۴۰	$2/7 \times 10^{-6}$	۴۷۰	$3 \times 10^{17}$
۳	۳۰	۴۰	$2/7 \times 10^{-6}$	۷۰۰	$5 \times 10^{17}$
۴	۳۰	۴۰	$2/7 \times 10^{-6}$	۱۱۲۰	$7 \times 10^{17}$
۵	۳۰	۴۰	$2/7 \times 10^{-6}$	۱۶۰۰	$10 \times 10^{17}$

تانتالوم برای تمام نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. نمونه‌های آماده شده تحت زاویه  $90^\circ$  نسبت به باریکه یون در دستگاه کاشت یون قرار داده شده و تحت کاشت یون نیتروژن و آرگون قرار گرفته‌اند. شرایط انجام کاشت بر روی نمونه‌های مختلف به صورت یکجا در جدول ۱ آورده شده است.

### ۳. نتایج و بحث

یکی از مشخصاتی که بعد از کاشت یون تغییر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت دانه‌بندی سطح نمونه تحت کاشت است. تغییرات دانه‌بندی از این نظر مورد توجه است که در اکثر مواقع رابطه‌ای بین دانه‌بندی و زبری سطح وجود دارد. برای بررسی این مشخصه از دستگاه تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در ذیل نتایج تحلیل میکروسکوپ نیروی اتمی برای نمونه‌های کاشت شده و نمونه کاشت نشده آورده شده است. میکروسکوپ نیروی اتمی SPM Auto Probe CP, Park Scientific Instruments استفاده شده در حالت غیر تماسی و در ناحیه اسکن یک میلی‌متر مربع با نوک تنش کم شعاع کمتر از  $20$  نانومتر انجام شد. به منظور بررسی توپوگرافی و زبری سطح، از تحلیل AFM در حالت تماس و مساحت اسکن  $1$  میلی‌متر مربع استفاده شد.

#### تحلیل سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد که کاشت یون نیتروژن بر روی پستی و بلندی سطح و همچنین دانه‌بندی اتم‌ها تأثیر داشته و قابل مشاهده است. تغییرات میزان ناصافی (جذر

شناسی سطوح تولید شده می‌شوند. از طرفی سطوح استفاده شده در ادوات الکترونیکی متفاوت به کار گرفته می‌شوند. بنابراین بررسی خصوصیات تراپردی آنها در ساختارهای چندلایه به منظور افزایش دادن کارایی آن ادوات حائز اهمیت است. احتمال عبور و چگالی جریان این ساختارهای چند لایه‌ای که سطوح مشترکشان با استفاده از فرایند کاشت یونی تولید شده‌اند، محاسبه شده است. یکی از اثرات اصلی ناهمواری، کاهش احتمال عبور است.

در این تحقیق بر روی سطوح تانتالوم توسط یون نیتروژن و آرگون با چگالی سطحی یونی  $1 \times 10^{17}$  تا  $10 \times 10^{17}$  (یون بر سانتی متر مربع) فرایند کاشت انجام شده است. فرایند کاشت یونی منجر به تغییر ریخت شناسی سطوح می‌شود و تمامی سطوح ناشی از این فرایند ناهموار هستند. این سطوح ناهموار به عنوان فصل مشترک در ساختارهای چندلایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته و بر خواص تراپردی این ساختارها اثر می‌گذارد. در ادامه تأثیر ناهمواری فصول مشترک خام (کاشت نشده) و کاشت شده بر احتمال عبور و رسانندگی الکتریکی ساختارهای چندلایه‌ای بررسی خواهد شد.

### ۲. فرایند آزمایشگاهی کاشت یون

در این آزمایش از نمونه‌های تانتالوم در ابعاد  $1 \times 1 \times 0.5$  mm استفاده شده و نمونه‌ها توسط دستگاه پولیش با صفحه دوار و پولیش داده شده و بعد توسط نمذ مخصوص و خمیر الماس کاملاً صیقلی شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها توسط آب و صابون شسته شده و در محلول استن و الکل به مدت  $20$  دقیقه تحت عملیات فراصوت قرار گرفت و بعد از آن توسط اجاق مخصوص در دمای  $100$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شده تا خشک شوند. این قسمت از آزمایش توسط دستگاه کاشت یون مرکز تحقیقات پلاسما انجام گرفت. پنج عدد از نمونه‌ها را به مساحت‌های تقریبی  $1$  cm<sup>2</sup> برای کاشت انتخاب می‌کنیم. خلأ دستگاه در شروع عملیات یون سازی (Torre)  $10-2 \times 5$  بود که در حین عملیات کاشت با توجه به ایجاد باریکه یونی به (Torre)  $10-2 \times 4$  تغییر می‌کند. شرایط کاشت بر روی نمونه‌های

<sup>1</sup>Atomic Force Microscopic

میانگین مربعی سطح<sup>۱</sup> (RMS Roughness)) نشان می‌دهد که در نمونه دوم ناصافی سطوح در مقایسه با نمونه خام کاهش یافته است. هنگامی که سطح نمونه توسط یون‌های نیتروژن بمباران می‌شود این یون‌های پرانرژی باعث هموار شدن سطح و یا به عبارتی ردیف شدن اتم‌های شبکه می‌شوند و در نتیجه میزان تراکم یون‌های موجود در سطح افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش اختلاف در ارتفاع دره‌ها و قله‌ها و یا همان جذر میانگین مربعی سطح می‌شود.

به این منظور در شکل ۱، تصویر سه بعدی AFM سطوح تانتالوم قبل و پس از فرایند کاشت یونی با یون‌های آرگون و نیتروژن نشان داده شده است. جدول‌های ۲ و ۳، مقایسه‌ای از میزان ناهمواری نمونه‌های کاشت شده با یون‌های آرگون و نیتروژن را ارائه می‌دهند. شکل ۲، تغییرات میانگین ناهمواری را برحسب تابعی از دز یون‌های آرگون و نیتروژن نمایش می‌دهد.

با توجه به این که فلز تانتالوم مورد استفاده یک فلز چندبلوری است بر اثر بمباران یونی صفحات کریستالی مختلف سطح تانتالوم به صورت یکسان خورده نشده است و منجر به ایجاد پستی و بلندی‌های بیشتری در بالا رفتن زبری سطح شده است. بعد از مدتی، بلندی‌های سطح خود مانع برخورد یون و دیگر نقاط سطح می‌شوند یعنی به نوعی موجب ایجاد سایه‌هایی بر روی سطح می‌شوند. طبیعی است که عمل فرسایش فیزیکی بر اثر برخورد یون‌ها بر روی این بلندی‌ها ادامه می‌یابد و در مکان‌های سایه اتفاق خاصی روی نمی‌دهد. همچنین در ادامه، اتم‌های کنده شده از بلندی‌ها می‌توانند بر روی سایه‌ها و دره‌ها مجدداً جایگزیده شوند که نتیجه آن کاهش زبری است. توجیه دیگر برای افزایش زبری سطح در دز  $5 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> می‌تواند افزایش میزان انتشار سطحی اتم‌های تانتالوم بر روی سطح نمونه باشد [۴].

همان طور که تصاویر نشان می‌دهند زبری سطوح قبل و بعد از این فرایند تغییر کرده و به همین دلیل تغییرات ریشه میانگین مربعی زبری نمونه‌های مختلف در جدول نشان داده شده است. این مقادیر تا چگالی سطحی یونی  $5 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> افزایش یافته و سپس در چگالی سطحی یونی  $10 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> کاهش

می‌یابد. دلیل این افزایش و کاهش را می‌توان به ترتیب در اثر کندوپاش به دلیل بمباران و سپس توزیع یافتن مجدد ماده به دره‌ها تشریح کرد. این توزیع مجدد به واسطه افزایش فرایند پخش شدگی است که به دلیل زبری سطح در دز یونی بالا صورت می‌گیرد [۱۷-۲۰]. دلیل دیگر افزایش زبری سطح در چگالی سطحی یونی  $5 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup>، افزایش انتشار سطحی اتم‌های تانتالوم در سطوح نمونه است [۲].

مقایسه نتایج زبری با توپوگرافی سطح که از تصاویر AFM به دست می‌آید بسیار مفید است؛ زیرا وابستگی زیادی بین زبری سطح و توپوگرافی سطح وجود دارد. در مورد نمونه‌های این تحقیق نیز تغییرات توپوگرافی با تغییرات زبری کاملاً مطابقت دارد. توپوگرافی سطح نمونه میزان تغییرات پستی و بلندی سطح را نشان می‌دهد. هرچه نمودار آن پهن‌تر باشد به این معنا است که یکنواختی سطح کمتر و در نتیجه سطح زبرتر است. نمودارهای باریک‌تر نشان دهنده یکنواختی بیشتر است و سطح در این حالت زبری کمتری دارد.

#### بررسی احتمال انتقال و خاصیت تراپردی

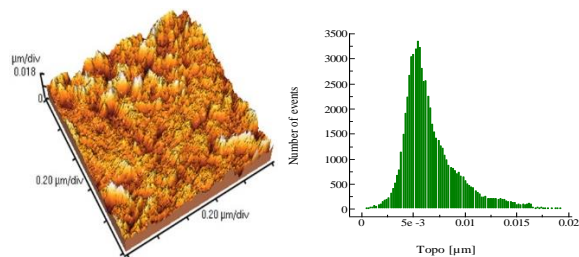
میانگین ناهمواری یکی از کمیت‌هایی است که در توصیف ناهمواری استفاده می‌شود. بنابراین به منظور دستیابی به اطلاعات جامع‌تر در خصوص بررسی نوع فصول مشترک تولید شده، محاسبات مربوط به خواص تراپردی انجام شده است. در بخش حاضر، تأثیر ناهمواری فصول مشترک (ناشی از فرایند کاشت یونی با آرگون و نیتروژن با چگالی سطحی یونی متفاوت)، بر خواص تراپردی ساختارهای چندلایه‌ای بررسی می‌شود که این فصول مشترک در آنها استفاده شده‌اند. محاسبات این بخش نیز بر اساس روش ماتریس انتقال و تقریب الکترون نسبتاً آزاد انجام شده است.

کاهش احتمال عبور یکی از نتایج اصلی وجود ناهمواری در نمونه‌ها به شمار می‌رود. بنابراین با استفاده از روش ماتریس انتقال، تأثیر فرایند کاشت یونی بر خصوصیات تراپردی نمونه‌ها بررسی شده است. به این منظور، تابع موج زیر در نظر گرفته شده است:

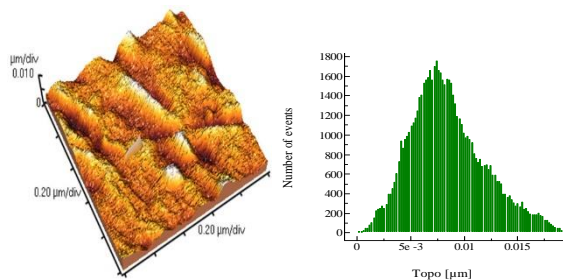
جدول ۳. زبری سطح نمونه‌ها قبل و بعد از فرایند کاشت یونی با

یون نیتروژن.

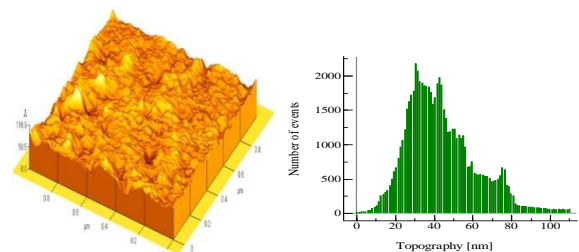
نمونه	دز نیتروژن ions/cm <sup>2</sup>	زبری ریشه میانگین مربعی A°	زبری میانگین A°
کاشت نشده	0	۱۴/۱	۴۱/۶
۱	۱ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۲۲/۱	۶۱/۹
۲	۳ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۱۸/۹	۵۰/۳
۳	۵ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۵۹/۹	۱۷/۱
۴	۷ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۲۳/۶	۷۶/۳
۵	۱۰ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۴	۱۰/۵



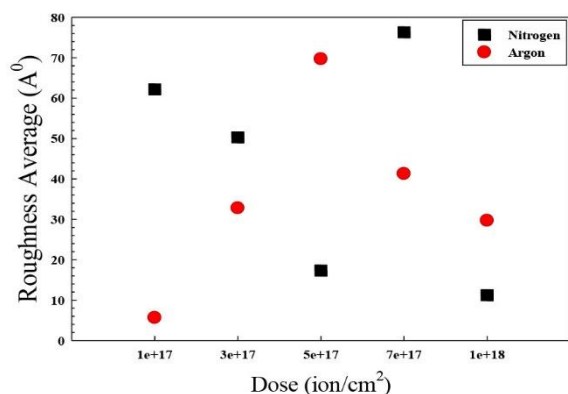
(الف) نمونه کاشت نشده



(ب) نمونه کاشت شده با نیتروژن



(ج) نمونه کاشت شده با آرگون



شکل ۲. میانگین زبری سطح نمونه‌ها برحسب تابعی از نوع و دز یون‌ها در فرایند کاشت یونی.

$$\psi_j = \sum_q (a_j^\gamma(q)e^{ik_n z} + b_j^\gamma(q)e^{-ik_n z})e^{iq \cdot (x,y)}, \quad (1)$$

با استفاده از پیوستگی تابع موج و مشتق آن، احتمال عبور از روش ماتریس انتقال قابل محاسبه خواهد بود.  $q$  بردار موج عرضی و  $k_n = [2m(V_n - E_n)]^{1/2} / \hbar$  عدد موج است.

$V_n$  برای مناطق  $n = 1, 2, 3$  به ترتیب  $0$ ،  $E_{FL} + V - eV_{app} / 4$  و  $-eV_{app}$  است که  $V = \Delta E_c [\theta(z - \varepsilon(r))]$  و  $\varepsilon(r)$  ارتفاع فصل مشترک است.

$$\begin{pmatrix} a_r \\ 0 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} a_l \\ b_l \end{pmatrix}, \quad (2)$$

بر طبق این تعریف، رابطه عبور به شکل زیر است:

شکل ۱. تصاویر سه بعدی کاشت شده تانتالوم با یون  $1 \times 10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> نیتروژن و آرگون.

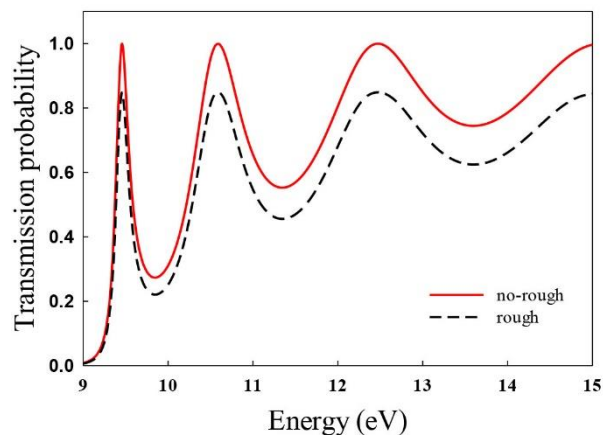
جدول ۲. زبری سطح نمونه‌ها قبل و بعد از فرایند کاشت یونی با یون آرگون.

نمونه	دز آرگون ions/cm <sup>2</sup>	زبری ریشه میانگین مربعی A°	زبری میانگین A°
کاشت نشده	0	۲۲/۳	۱۵/۷
۱	۱ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۷/۵۲	۵/۶۴
۲	۳ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۴۱/۱	۳۲/۸
۳	۵ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۹۵/۳	۶۹/۷
۴	۷ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۵۰/۳	۴۱/۳
۵	۱۰ × ۱۰ <sup>۱۷</sup>	۷/۵۲	۲۹/۷

سطوح، مقادیر عددی این قله‌ها نسبت به حالت سطوح آرمانی (بدون ناهمواری) کاهش چشم‌گیر داشته و مقدار آنها به یک نمی‌رسد. به منظور توضیح بهتر، در شکل ۴، فقط سهم مؤلفه‌های پراکنده شده احتمال عبور به صورت تابعی از انرژی الکترون فرودی نمایش داده شده‌اند.

در مقایسه، حالت با همواری نسبت به حالت بدون ناهمواری، فرایند پراکنده‌گی مانع از رسیدن مقدار احتمال عبور به عدد یک می‌شود. همچنین تغییرات احتمال عبور به عنوان تابعی از میزان ناهمواری (برای نمونه‌های کاشت شده با چگالی سطحی یون‌های مختلف) نشان می‌دهد که با افزایش میزان چگالی سطحی یونی، سطوح هموارتر می‌شوند. به عبارت دیگر، هرچه چگالی سطحی یونی یون‌های استفاده شده در فرایند کاشت بیشتر باشد، سهم پراکنده‌گی ناشی از ناهمواری کاهش می‌یابد. به منظور بررسی تأثیر پراکنده‌گی ناشی از ناهمواری بر رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها، در شکل ۵، مشخصه I-V نمونه کاشت نشده نشان داده شده است. منحنی‌ها برای حالت آرمانی (بدون در نظر گرفتن ناهمواری) و حالت واقعی (با در نظر گرفتن ناهمواری) ترسیم شده‌اند. در پدیده تونل‌زنی، یک الکترون بیشترین میزان احتمال تونل‌زنی کوانتومی را خواهد داشت اگر فصول مشترک آرمانی و بدون ناهمواری لحاظ شوند. این امر منجر به بیشترین مقدار در قله مشخصات I-V جریان-ولتاژ خواهد شد.

با افزایش میزان ولتاژ اعمالی، در ابتدا مقدار جریان به بیشینه مقدار رسیده و سپس با افزایش ولتاژ، جریان در یک منطقه مقاومت دیفرانسیلی منفی<sup>۱</sup> کاهش می‌یابد [۵]. ادوات الکترونیکی با این مشخصات در سوئیچ‌های الکترونیکی سریع، تولید نوسانات میکروویو و به عنوان تشدید کننده‌ها برای بسامدهای بالا استفاده می‌شوند. به همین ترتیب منحنی‌های دیگری برای نمونه‌های کاشت شده رسم شده است. به عنوان هدف مهمی در این مطالعه، تأثیر میزان چگالی سطحی یونی یون‌های استفاده شده در فرایند کاشت یونی بر روی ناهمواری هموار نمودن فصول مشترک (نمونه‌ها) بررسی شده است. بنابراین، مشخصه I-V نمونه‌های کاشت شده (مؤلفه‌های پراکنده شده) در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳. تأثیر ناهمواری بر احتمال عبور نمونه کاشت نشده.

$$T(E, V_{app}) = \frac{k_r m_r}{k_l m_l} \left( \frac{a_r}{a_l} \right)^2, \quad (3)$$

بنابراین، چگالی جریان به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی به صورت زیر نوشته می‌شود [۳]:

$$\frac{em^* K_B T}{4\pi^2 \hbar^2} \int_0^\infty T(E, V_{app}) \ln \left[ \frac{1 + \exp[E_F - E / K_B T]}{1 + \exp[E_F - E - eV_{app} / K_B T]} \right] dE, \quad (4)$$

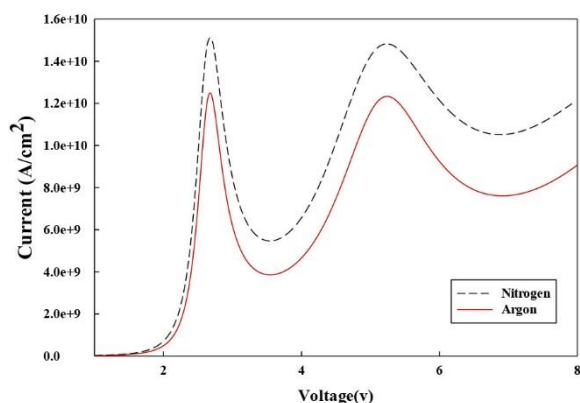
فصول مشترک اول و سوم ساختارها، نمونه‌های ناهموار هستند بنابراین کمیت‌های فوق را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همان‌طور که ذکر شد، نمونه‌های مذکور یا کاشت نشده هستند و یا با استفاده از روش کاشت با یون آرگون و نیتروژن بر روی تانتالوم نفوذ کرده‌اند. سطح نمونه‌ها  $50 \times 50$  میلی‌متر مربع است. جرم مؤثر الکترونی به صورت  $m_e$  جرم الکترون در نظر گرفته شده است [۵]. اکنون می‌توان احتمال عبور را بر حسب انرژی الکترون‌های فرودی برای نمونه کاشت نشده (با و بدون در نظر گرفتن ناهمواری) در شکل ۳ رسم کرد.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تأثیر عمده ناهمواری کاهش احتمال عبور به واسطه فرایند پراکنده‌گی الکترون است. می‌توان منحنی مشابه برای سایر نمونه‌ها را نیز رسم کرد اما در اینجا مقایسه تأثیر میزان چگالی سطحی یونی در فرایند کاشت یونی بر روی میزان پراکنده‌گی الکترون‌ها مورد بحث و علاقه است. دلیل قله‌های ظاهر شده در نمودار این است که تونل‌زنی تشدید زمانی رخ می‌دهد که انرژی الکترون‌های فرودی با انرژی پایین‌ترین سطح انرژی در چاه کوانتومی مطابقت داشته باشد. به دلیل ناهمواری موجود در

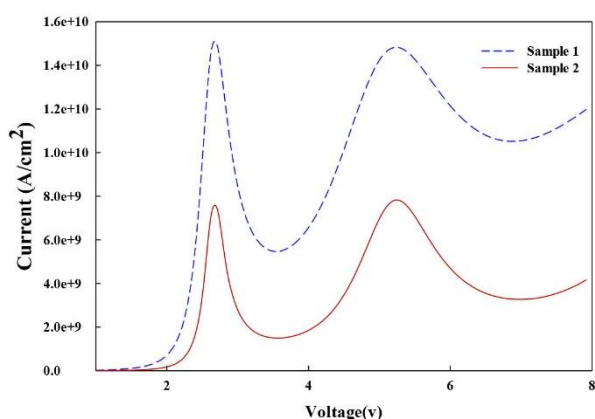
<sup>1</sup> Negative Differential Resistance (NDR)







شکل ۱۰. چگالی جریان بر حسب تابعی از ولتاژ اعمالی برای دو مورد فصول مشترک کاشت شده با یون‌های آرگون و نیتروژن.

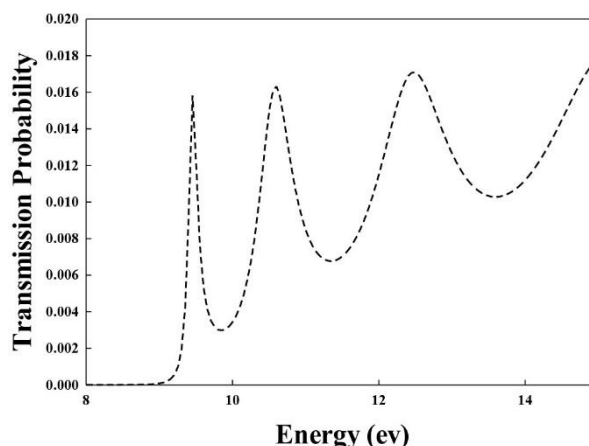


شکل ۱۱. چگالی جریان بر حسب ولتاژ اعمالی برای فصول مشترک ناهموار تولید شده با چگالی سطحی یونی‌های  $1 \times 10^{17}$  (منحنی نقطه چین) و  $3 \times 10^{17}$  نیتروژن.

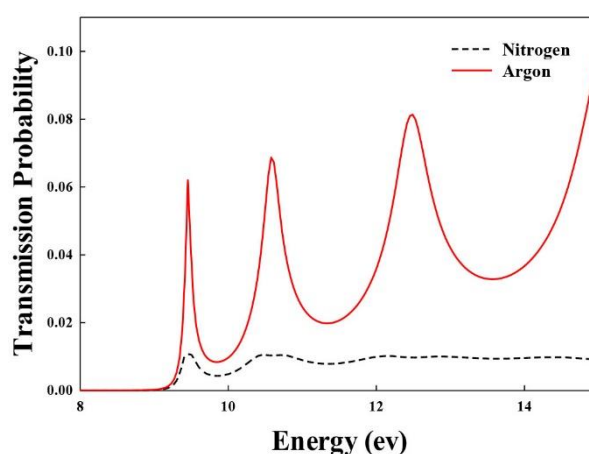
ساختارهایی با فصول مشترک تانتالوم (کاشت نشده) نمایش می‌دهد. با افزایش ولتاژ، مقدار جریان به بیشینه مقدار رسیده و سپس در ولتاژهای بالاتر کاهش می‌یابد که همان ناحیه مقاومت دیفرانسیلی منفی است [۸].

در شکل ۱۰، تأثیر نوع یون استفاده شده در فرایند کاشت یونی فصول مشترک بررسی شده است. این نتایج با نتایج احتمال عبور قابل مقایسه و تفسیر هستند.

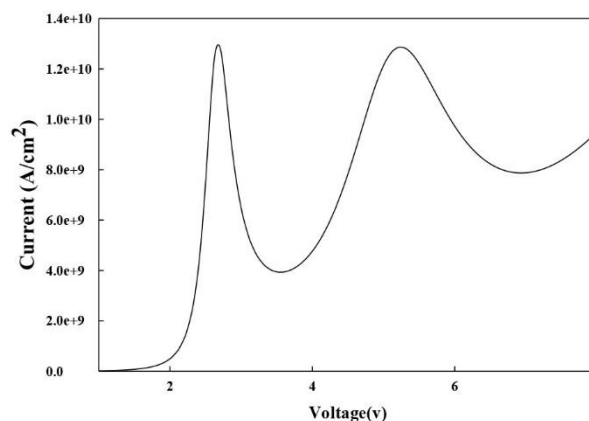
از آنجایی که سهم پراکندگی در مورد کاشت شده با یون آرگون بیشتر از یون نیتروژن است، چگالی جریان برای مورد نیتروژن بیشتر خواهد بود. به علاوه، در هر دو مورد، به عنوان نتیجه‌ای از ناهمواری فصول مشترک، قله تونل‌زنی تشدیدی جریان کاهش یافته است. همچنین نسبت قله به دره جریان به دلیل ناهمواری فصول مشترک کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ چگالی جریان را بر حسب تابعی از ولتاژ اعمالی برای فصول مشترک



شکل ۷. احتمال عبور بر حسب تابعی از انرژی الکترون‌های فرودی برای ساختارهایی با فصول مشترک تانتالوم کاشت نشده.



شکل ۸. احتمال عبور بر حسب تابعی از انرژی الکترون فرودی برای ساختارهایی که فصول مشترک ناهموار آنها با یون نیتروژن (منحنی نقطه چین) ... و آرگون با منحنی پیوسته نمایش داده می‌شود.



شکل ۹. چگالی جریان بر حسب ولتاژ اعمالی برای ساختارهایی با فصول مشترک کاشت نشده.

مشخصه جریان-ولتاژ این ساختارها نیز بررسی شده است. شکل ۹ چگالی جریان را بر حسب تابعی از ولتاژ اعمالی برای

تولید شده با دو چگالی سطحی یونی متفاوت یون نیتروژن نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج به دست آمده، چگالی جریان با افزایش چگالی سطحی یونی یون‌های استفاده شده در فرایند کاشت یونی کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش چگالی سطحی یونی یون‌ها موجب ناهموار شدن فصول مشترک می‌شود. [۲۱-۳۰].

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تانتالوم به عنوان نمونه خام در نظر گرفته شد و فرایند کاشت یونی بر روی آن انجام شده است. یون‌های در نظر گرفته شده برای فرایند کاشت، نیتروژن و آرگون در انرژی

مشخص و با چگالی سطحی یونی متفاوت هستند. به منظور بررسی سطوح تولید شده از تصاویر AFM استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان پراکندگی به واسطه فصول مشترک ناهموار تولید شده با کاشت یون آرگون بیشتر از مورد نیتروژن است. به علاوه محاسبات چگالی جریان نتایج مذکور را تأیید کرده و میزان چگالی جریان مؤلفه‌های پراکنده شده فصول مشترک ناهموار تولید شده با کاشت یون نیتروژن کمتر است. این امر نشان می‌دهد سطوح تولید شده ناشی از کاشت یون آرگون بر روی تانتالوم ناهموارتر از حالت تولید شده با یون‌های نیتروژن است. همچنین با افزایش چگالی سطحی یونی یون‌های استفاده شده، سطوح تولید شده هموارتر بوده و میزان پراکندگی الکترون از آنها کاهش می‌یابد.

#### مراجع

1. S S Patila, et al., *Surface & Coatings Technology* **196** (2005) 284.
2. P Budzynskia et al., *Vacuum* **78** (2005) 658.
3. C M Fang, et al., *Journal of Materials Chemistry* **11** (2001) 1248.
4. Zh-H Cui and H Jiang, *J. Phys. Chem. C* **121** (2017) 3241.
5. K Panda, *Journal of Applied Physics* **110** (2011) 044304.
6. Y Z Liu, et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **237** (3-4) (2005) 543.
7. S S Patila, et al., *Surface & Coatings Technology* **196** (2005) 284.
8. P Budzynskia, et al., *Vacuum* **78** (2005) 685.
9. A K De, et al., *Mater. Trans. A* **37** (2006) 1875.
10. Z W Kowalski, et al., *Vacuum* **83** (2009) S208.
11. R Skomski, *Journal of Physics Condensed Matter* **15** (2003) R841.
12. C L Dennis, et al., *Journal of Physics Condensed Matter* **14** (2002) R1175.
13. A Czir aki, et al., *Thin Solid Films* **433** (2003) 237.
14. Y Shiota, et al., *Nature Materials* **11** (2012) 39.
15. P Zahn and I Mertig, *Materials Physics* **63** (2001) 104412.
16. P X Xu, *Physical Review B* **73** (2006) 180402R.
17. Y Li and Ch.-Ray Chang, *Physics Letters A* **287** (2001) 415.
18. A Koley, et al., *Applied Sciences* **11** (2021) 2309.
19. V D Costa, et al., *Physical Review Letters* **85** (2000) 876.
20. R V Hariwal, et al., *Applied Surface Science Advances* **100** (2022) 189.
21. FRoccaforte, et al., *Micro* **2** (2022) 23.
22. A El Hassanin, et al., *Materials (Basel). Nov* **14**, 22 (2021) 6800.
23. A H Ramezani, et al., *International Nano Letters* **7** (2017) 51.
24. A H Ramezani, et al., *Modern Physics Letters B* **34**, 15 (2020) 2050163.
25. S Hoseinzadeh and A H Ramezani, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers* **39**, 5 (2018) 501.
26. A H Ramezani, et al., *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* **14**, 3 (2019) 425.
27. A H Ramezani, et al., *Applied Physics A* **122** (2016) 1.
28. A H Ramezani, et al., *Optik* **225** (2021) 165628.
29. A H Ramezani, et al., *Applied Physics A* **126** (2020) 1.
30. A H Ramezani, et al., *Electronics* **10**, 23 (2021) 2941.
31. A H Ramezani, et al., *Corrosion Engineering, Science and Technology* **51**, 6 (2016) 393.