



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

<https://jmme.um.ac.ir>



Iron&Steel
Society of Iran

Investigating the Effect of Roughness on the Tunneling, Mechanical and Statistical Properties of Tantalum Thin Layers Grown Using Nitrogen ions

Research Article

Amir Hoshang Ramezani¹ , Zhaleh Ebrahimejad²

DOI: 10.22067/jmme.2023.82763.1113

Introduction

In this article, the effect of ion type on the transport properties of the structures whose common phases were created by the tantalum-based ion bombardment process has been investigated. The different doses of nitrogen ions used in the ion seeding process at ambient temperature with an energy of 30 kV. To study the morphology of the surfaces of ion bombarded thin layers, atomic force microscope (AFM) analysis was used and the average roughness amount is determined. AFM results showed that the peak-to-valley ratio decreases. In addition, with the increase of the nitrogen ion dose, the current density has decreased as a function of the voltage, although this decrease is a direct result of the dispersion caused by the existence of roughness, but the process of this decrease does not follow a specific order for different doses.

Improving the surface behaviors of metals generally lead to solving the problems of wear, friction, hardness, wear, corrosion and oxidation [1-5]. Features such as availability, cheapness and relative simplicity of the manufacturing process have caused tantalum to have many applications in the industry. Among these applications, it can be mentioned that it is used in cutting tools, marine structures and ship hulls, medical instruments and machine building industry, in all these applications, the surface properties of this material such as corrosion resistance and hardness are of interest and scientists and researchers to conduct research. More and more in this field has forced. Using the ion bombardment method to improve the quality of the alloy surface is a knowledge that has received attention in the last few decades. The ion bombardment process roughens the resulting interfaces/surfaces [6-10]. Here, various nitrogen ion doses on the transport properties of tantalum-based thin films (used as multilayer structures) have been investigated. For this purpose, the values of passing probability and current density have been checked. In the following, the thin film preparation

and AFM analysis and its results are presented.

Experimental details

In this experiment, tantalum samples with dimensions of 0.5 x 1 x 1 mm were used. The ion bombardment of the samples was done by the plasma research center's ion implantation device. Bombardment conditions on tantalum samples for all samples are given in table 1.

Table 1. Ion bombardment conditions for samples

Ion Current ion/cm^2	Time (S)	Pressure Torr	Current $40\mu A/cm^2$	Energy (keV)	Sample
1 $\times 10^{17}$	360	2/7 $\times 10^{-6}$	40	30	1
3 $\times 10^{17}$	470	2/7 $\times 10^{-6}$	40	30	2
5 $\times 10^{17}$	700	2/7 $\times 10^{-6}$	40	30	3
7 $\times 10^{17}$	1120	2/7 $\times 10^{-6}$	40	30	4
10 $\times 10^{17}$	1600	2/7 $\times 10^{-6}$	40	30	5

Results and Discussion

The main effect of roughness is to reduce the transmission probability due to the electron scattering process. Here the comparison of the effect of the dose in the ion implantation process on the electron scattering rate is discussed and interested. Therefore, in Figures 1 and 2, the scattered components of the transmission probability and current density are shown as a function of the incident electron energy.

*Manuscript received: June 3, 2023, Revised: November 4, 2023, Accepted, December 30, 2023.

¹ Corresponding author: Assistant professor, Department of Physics, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: Ramezani.1972@gmail.com.

², Assistant professor, Department of Physics, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

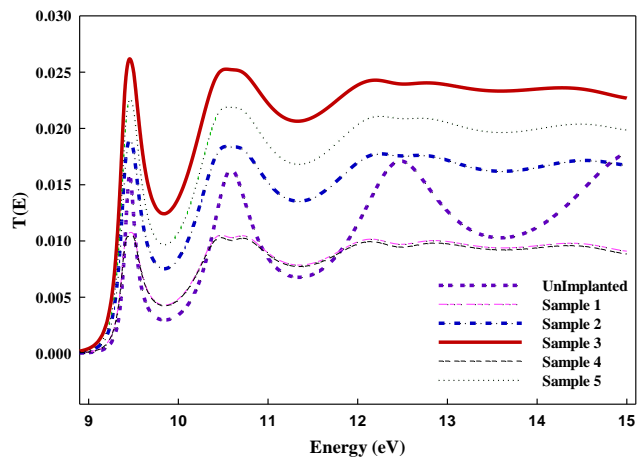


Figure 1. The effect of roughness on the scattered components of the probability of passage for unplanted and planted samples

Conclusion

All existing surfaces produced by the ion implantation process are uneven and lead to changes in the morphology of the produced surfaces. By changing the dose of implanted ions, the produced surfaces are smoother and the amount of electron scattering decreases, which can be considered in the design and optimization of electronic structures.



بررسی تأثیر ناهمواری بر خصوصیات تونل زنی و آماری تانتالوم کاشت شده با استفاده از یون نیتروژن*

مقاله پژوهشی

امیر هوشنگ رمضانی^(۱) ID و ژاله ابراهیمی نژاد^(۲)

DOI: 10.22067/jmme.2023.82763.1113

چکیده در این مقاله، اثر نوع یون بر خصوصیات ترابردی از میان ساختارهایی که فصول مشترک آنها توسط فرآیند بمباران یون بر پایه تانتالوم ایجاد گردیده، بررسی شده است. یون نیتروژن استفاده شده در فرآیند کاشت یونی با انرژی ۳۰ کیلوکترن ولت و در دوزهای مختلف در دمای محیط در نظر گرفته شده‌اند. برای مطالعه ریخت شناسی سطوح لایه های نازک بمبارانه شده یونی، از آنالیز میکرو سکوپ نیروی اتمی (AFM) (Atomic Force Microscopic) استفاده شده و مقدار متوسط ناهمواری تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که فصول مشترکی‌هایی که با بمباران یون نیتروژن تولید شده‌اند تأثیرات بیشتری بر خصوصیات ترابردی دارند. همچنین نسبت پیک به دره کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش دوز یون نیتروژن، چگالی جریان به عنوان تابعی از ولتاژ کاهش یافته است هرچند این کاهش، نتیجه مستقیمی از پراکندگی ناشی از وجود ناهمواریست اما روند این کاهش برای دوزهای مختلف از نظم خاصی پیروی نمی‌کند. نمونه شماره یک مقدار احتمال عبور بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که تعیین میزان دوز در تعیین مقدار خصوصیات ترابردی از میان لایه های نازک ناهموار نقشی مهم ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی تانتالوم، ناهمواری سطح، لایه نازک، کاشت یونی.

Investigating the Effect of Roughness on the Tunneling and Statistical Properties of Tantalum thin Layers Grown Using Nitrogen Ions

Amir Hoshang Ramezani

Zhaleh Ebrahiminezhad

Abstract In this article, the effect of ion type on the transport properties of the structures whose common phases were created by the tantalum-based ion bombardment process has been investigated. The nitrogen ions used in the ion seeding process are considered with an energy of 30 kV and in different doses at ambient temperature. To study the morphology of the surfaces of ion bombarded thin layers, atomic force microscope (AFM) analysis was used and the amount Average roughness is determined. The results show that the common seasons produced by nitrogen ion bombardment have more effects on the transport characteristics. Also, the peak-to-valley ratio decreases. In addition, with the increase of the nitrogen ion dose, the current density has decreased as a function of the voltage, although this decrease is a direct result of the dispersion caused by the existence of unevenness, but the process of this decrease does not follow a specific order for different doses, example sample number one indicates a higher probability of passing. The results show that determining the amount of dose plays an important role in determining the amount of transport characteristics through uneven thin layers.

Keywords Tantalum, Surface Roughness, Thin film, Ion Implantation.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۳/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۰/۹ می‌باشد.

Email: ramezani.1972@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

(۲) استادیار، گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

مقدمه

رفتارهای سطح فلزات، عموماً منجر به حل مسائل سائیدگی، اصطحکاک، سختی، فرسودگی، خوردگی و اکسیداسیون می‌شود. استفاده از کاشت یون، در این زمینه نسبتاً جدید است. یک روش مستقیم برای تشکیل آلیاژهای فلزی با دقت مکانی کنترل شده استفاده از باریکه یون است. به این روش می‌توان موادی با خصوصیات جدید تولید نمود. با توجه به این روش‌ها ممکن است آلیاژهای خارجی مطلوبی توسط کاشت یون در ابر رساناها به دست آید که به کار آن در تکنولوژیهای دیگر با ارزش است. تغییر ابعاد فیزیکی در کاشت یون فلزات، تغییر مختصر سطح قابل صرف نظر کردن می‌باشد [5-1]. انتخاب اولیه یونها به قابلیت چشمه‌های دستگاه کاشت یون و داشتن دانش قبلی در مورد آن دسته از یونهایی که اثرات مفیدی روی رفتار قراردادی فلزات دارند، بستگی دارد.

ویژگی‌های از قبیل در دسترس بودن، ارزان بودن و سادگی نسبی فرایند ساخت، باعث شده است که تانتالوم دارای کاربردهای فراوانی در صنعت باشد. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده در ابزار برشی، سازه‌های دریایی و بدنه‌کشتی‌ها، ابزار پزشکی و صنعت ماشین سازی اشاره کرد که در همه این کاربردها خواص سطحی این ماده همچون مقاومت در برابر خوردگی و سختی مورد توجه بوده و دانشمندان و محققین را به انجام تحقیقات روز افزون در این زمینه واداشته است. استفاده از روش بمباران یون جهت بهبود کیفیت سطح آلیاژ دانشی است که در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

به دلیل خواص مختلفی مانند مقاومت در برابر خوردگی بالا، خواص مکانیکی و چگالی کم، لایه‌های نازک مبتنی بر تانتالوم در زمینه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند [8-6]. بمباران یون‌های اکسیژن، آرگون، کربن و نیتروژن سطح تانتالوم را بهبود بخشید [27,28]. پارامترهایی مانند دما، انرژی یون، چگالی جریان و تابش در ویژگی فیلم‌های بمباران‌شده یونی مهم هستند. فرآیند بمباران یون و شرایط رشد بر مورفولوژی رابط‌های بمباران‌شده و نمونه‌های تولید شده مکانیکی، الکتریکی و نوری تأثیر می‌گذارد [9-7]. آثار تجربی و نظری زیادی وجود دارد که آنها خواص انتقال را از طریق لایه‌های نازک مبتنی بر تانتالوم مورد مطالعه قرار دادند [10]. همچنین، تأثیر زبری و مورفولوژی سطوح مبتنی بر تانتالوم بر عملکرد

دستگاه‌های الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است [11,12]. روش‌های مختلفی برای تولید رابط‌های ناهموار وجود دارد و تأثیر سطوح/رابط‌های ناهموار بر رسانایی الکتریکی سازه‌ها بررسی شده است [33]. فرآیند بمباران یون باعث زبر شدن سطوح مشترک / سطوح حاصل می‌شود [28-22].

فرایند آزمایشگاهی بمباران یون

در این آزمایش از نمونه‌های تانتالوم در ابعاد $5 \times 10 \times 1$ mm استفاده شده، بمباران یونی نمونه‌ها در آزمایش توسط دستگاه کاشت یون مرکز تحقیقات پلاسما دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات با انرژی ۲۵۰ کیلو الکترون ولت با چگالی جریان یونی $40 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ و شار یونی از 1×10^{17} تا 7×10^{17} ion/cm^2 انجام گرفت. شرایط بمباران بر روی نمونه‌های تانتالوم برای تمام نمونه‌ها در جدول دو آورده شده است. برای بمباران یون، نیاز به یک منبع یون است که با به‌کاربردن شتاب‌دهنده ذره‌ای یون‌ها را می‌توان با سرعت زیاد روی سطح مورد نیاز بمباران می‌شود. در این فرآیند، یون‌های پر انرژی که به سطح جامد برخورد میکنند، می‌توانند برای به وجود آوردن تغییرات فیزیکی، شیمیایی و متالورژیکی سطوح جامدات مفید باشند. زمان انجام بمباران هر نمونه از رابطه زیر محاسبه شده است:

نتایج و بحث

یکی از مشخصاتی که بعد از بمباران یون تغییر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت دانه‌بندی سطح نمونه تحت بمباران می‌باشد. تغییرات دانه‌بندی از این نظر مورد توجه می‌باشد 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 استفاده شده است. در ذیل نتایج آنالیز میکروسکوپ نیروی اتمی برای نمونه‌های بمباران شده و نمونه بمباران نشده آورده شده است.

آنالیز سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

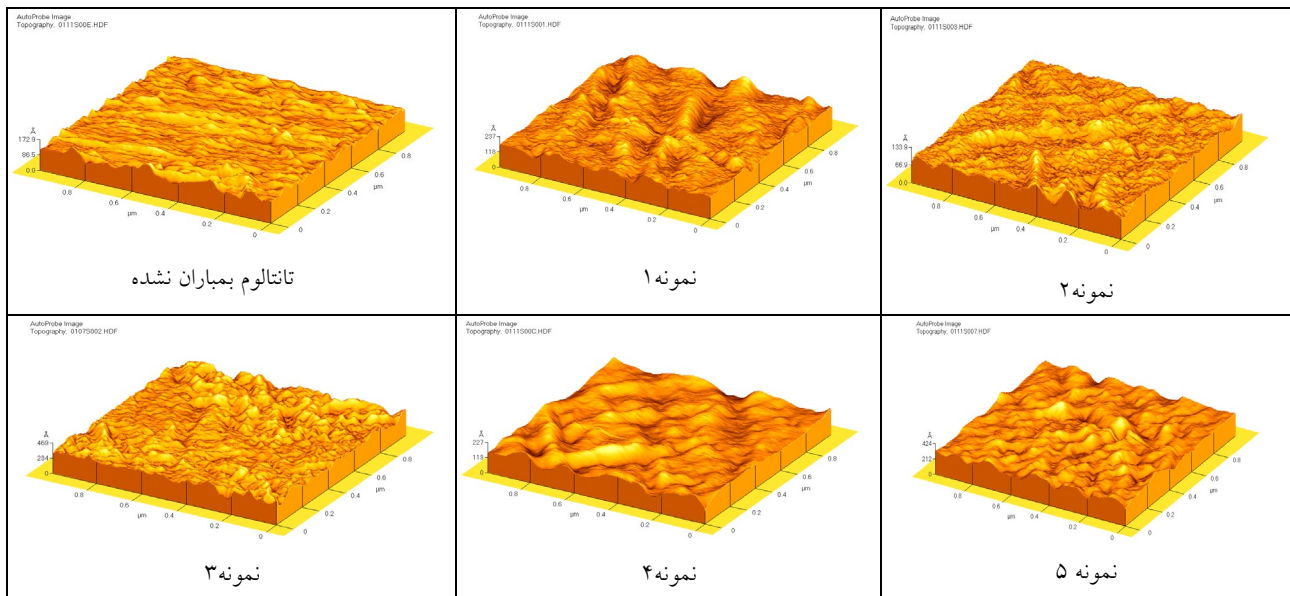
در این تحقیق بر روی سطوح تانتالوم توسط یون نیتروژن با جریان یونی 1×10^{17} تا 10×10^{17} (یون بر سانتی متر مربع) فرآیند کاشت انجام شده است. فرآیند کاشت یونی منجر به

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، تاثیر ناهمواری فصول مشترک (ناشی از فرآیند کاشت یونی با نیتروژن با دوزهای متفاوت)، بر خواص تراپردی ساختارهای چندلایه‌ای بررسی می‌شود که این فصول مشترک در آن‌ها استفاده شده‌اند. محاسبات این خواص بر اساس روش ماتریس انتقال و تقریب الکترون نسبتاً آزاد انجام شده است. تصاویر و تحلیل میکروسکوپ نیروی اتمی شکل و اندازه دانه‌ها را در سطحی به اندازه یک میکرومتر در یک میکرومتر تحت تاثیر یون‌های نیتروژن و آرگون نشان می‌دهد. در ادامه، به بررسی تاثیر نوع یون‌های به کار گرفته شده در فرآیند کاشت یونی بر خصوصیات تراپردی ساختارهای چندلایه پرداخته می‌شود.

تغییر ریخت شناسی سطوح می‌گردد و تمامی سطوح ناشی از این فرآیند ناهموار هستند. این سطوح ناهموار به عنوان فصل مشترک در ساختارهای چندلایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته و بر خواص تراپردی این ساختارها اثر می‌گذارند. در ادامه تاثیر ناهمواری فصول مشترک خام (کاشت نشده) و کاشت شده بر احتمال عبور و رسانندگی الکتریکی ساختارهای چندلایه‌ای بررسی خواهد شد.

در شکل (۱) تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی سطوح کاشت نشده و کاشت شده به منظور بررسی بهتر نشان داده شده است. جدول (۳)، مقایسه‌ای از میزان ناهمواری نمونه‌های کاشت شده با یون‌های آرگون و نیتروژن را ارائه می‌دهند. جدول (۱) ناهمواری نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند کاشت یونی با یون نیتروژن را نمایش می‌دهد.

میانگین ناهمواری یکی از کمیت‌هایی است که در توصیف



شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از تانتالوم بمباران شده با نیتروژن و بمباران نشده

جدول ۱ ناهمواری نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند کاشت یونی با یون نیتروژن

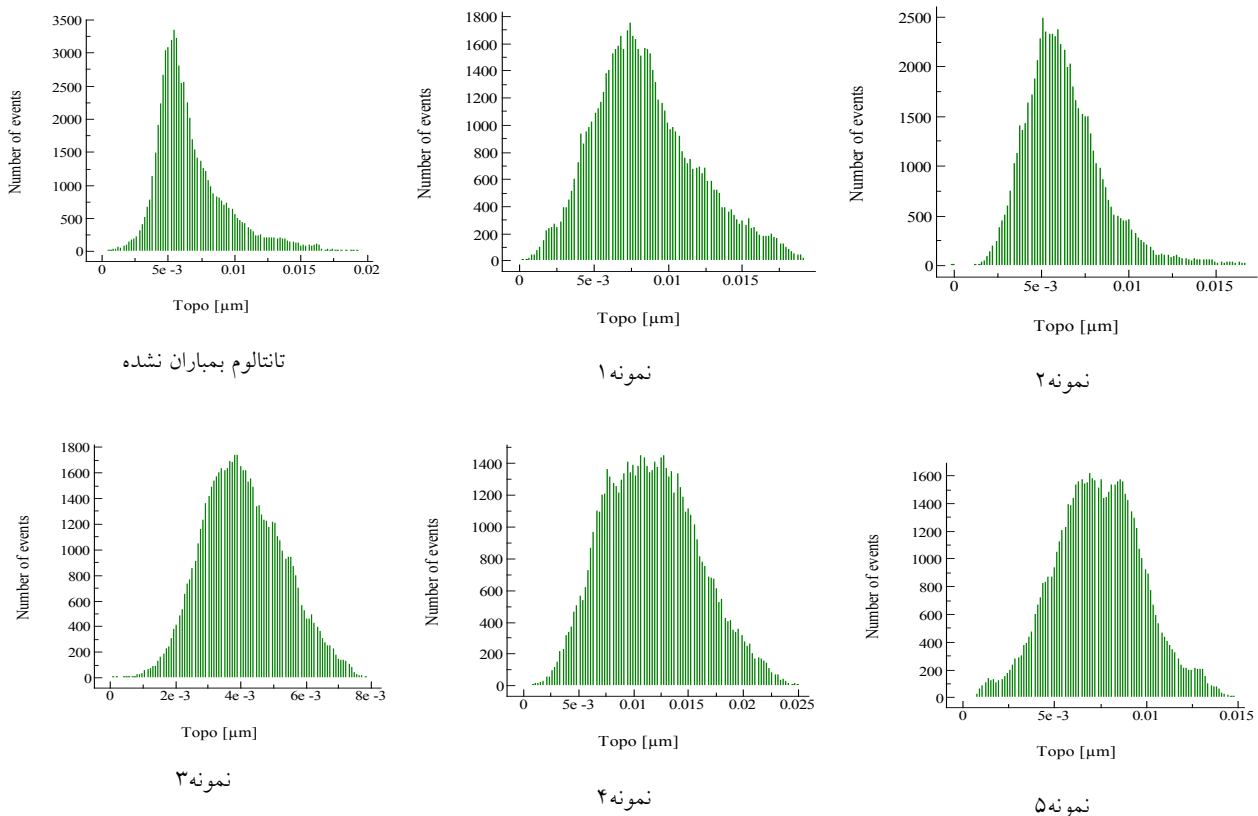
ناهمواری میانگین A°	ناهمواری ریشه میانگین مربعی A°	جریان یونی نیتروژن	نمونه
۴۱,۹	۱۴,۱	۰	بمباران نشده
۶۱,۹	۲۲,۱	1×10^{17}	۱
۵۰,۳	۱۸,۹	3×10^{17}	۲
۱۷,۱	۵۹,۹	5×10^{17}	۳
۷۶,۳	۲۳,۶	7×10^{17}	۴

بررسی تغییرات توپوگرافی سطح

مقایسه نتایج زبری با توپوگرافی سطح که از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی 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 می‌باشد 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. در شکل (۲) تغییرات توپوگرافی سطح برای تانتالوم پس از کاشت یون نیتروژن با دزهای مختلف را نشان می‌دهد. در هر یک از این شکل‌ها محور عمودی نمایش تعداد ذرات و محور افقی نمایش منطقه‌بندی بر روی سطح می‌باشند. این شکل نمایش میزان دانه‌بندی را بر روی محدوده انتخاب شده سطح نمایش می‌دهد.

نمایش توپوگرافی نمونه کاشت نشده باریک بودن توپوگرافی را نمایش می‌دهد که این سطح رافنس (پستی و بلندی) کمتر و یکنواختی بیشتر دارد. نمایش توپوگرافی نمونه های بمباران شده با جریان یونی $10^{17} \times 1$ و بمباران شده با جریان یونی $10^{17} \times 3$ نمودار پهن‌تری را نسبت به نمونه کاشت نشده نمایش می‌دهد. این منحنی‌های گاوسی غیریکنواخت بودن سطح را نمایش می‌دهد و تغییرات زبری سطح نسبت به نمونه اول افزایش داشته است.

تغییرات توپوگرافی سطح برای نمونه‌های کاشته شده با دز $5 \times 10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ و $7 \times 10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ نمایش پهنای این منحنی‌ها نسبت به نمونه کاشت نشده غیریکنواخت بودن سطح و در نتیجه افزایش زبری سطح را نمایش می‌دهد. توپوگرافی سطح نمونه کاشته شده با دز $10 \times 10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ نشان می‌دهد که پهنای منحنی نسبت به نمونه کاشت نشده افزایش یافته و زبری سطح نیز افزایش یافته است و سطح را غیریکنواخت نشان می‌دهد.



شکل ۲ تغییرات توپوگرافی سطح تانتالوم قبل و بعد از کاشت یون

بررسی احتمال عبور از میان لایه ها

کاهش بیشترین مقدار قابل دسترس احتمال عبور یکی از نتایج اصلی وجود ناهمواری در نمونه ها به شمار می رود. بنابراین با استفاده از روش ماتریس انتقال، تاثیر فرآیند کاشت یونی بر خصوصیات تراپردی نمونه ها بررسی شده است. به این منظور، تابع موج در هر ناحیه به شکل زیر در نظر گرفته شده است.

$$\psi_j = \sum (a_j^Y(q)e^{ik_n z} + b_j^Y(q)e^{-ik_n z})e^{i(q \cdot (x,y))}, \quad (1)$$

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

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ 0 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

بر طبق این تعریف، رابطه عبور به شکل زیر است [16]:

$$T(E, V_{app}) = \frac{k_3 m_3}{k_1 m_1} \left(\frac{a_3}{a_1}\right)^2, \quad (3)$$

بنابراین، چگالی جریان به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی به

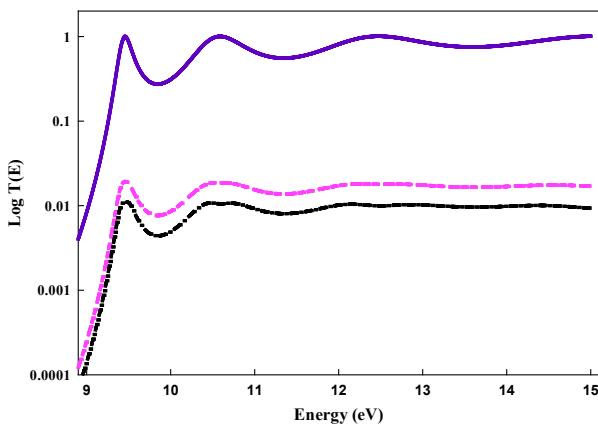
صورت زیر نوشته می شود [3]:

$$j(V_{app}) = \frac{em^*k_B T}{4\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty T(E, V_{app}) \ln \left[\frac{1 + \exp[(E_F - E)/k_B T]}{1 + \exp[(E_F - E - eV_{app})/k_B T]} \right] dE, \quad (4)$$

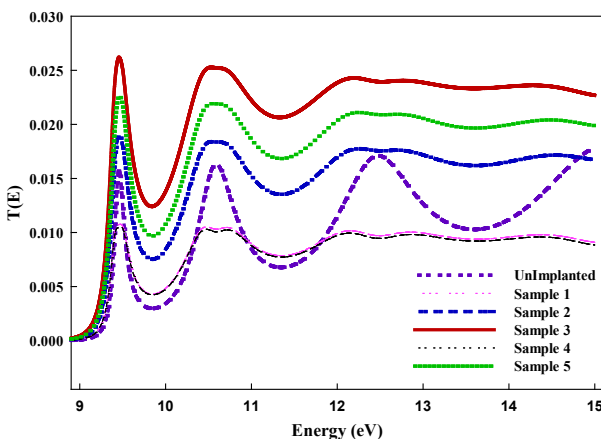
فصول مشترک اول و سوم ساختار، های ناهموار در نظر گرفته شده و بنابراین مقدار کمیت های فوق را تحت تاثیر قرار می دهند. همان طور که ذکر شد، نمونه های مذکور یا کاشت نشده هستند و یا با استفاده از روش کاشت با یون نیتروژن بر روی تانتالوم رشد یافته اند. ضخامت نمونه ها یک نانومتر و سطح آن ها 50×50 نانومتر مربع است. جرم موثر الکترونی به صورت m_e جرم الکترون در نظر گرفته شده است [29,30].

اکنون می توان احتمال عبور را بر حسب انرژی الکتون های فرودی برای نمونه کاشت نشده (با و بدون در نظر گرفتن ناهمواری) و نمونه شماره یک، در شکل (۳) رسم نمود.

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، تاثیر عمده ناهمواری کاهش احتمال عبور به واسطه فرآیند پراکندگی الکترون است. می توان منحنی مشابه برای سایر نمونه ها نیز رسم نمود اما در این جا مقایسه ی تاثیر میزان دوز در فرآیند کاشت یونی بر روی میزان پراکندگی الکترون ها مورد بحث و علاقه است. بنابراین، در شکل (۴)، مؤلفه های پراکنده شده احتمال عبور به صورت تابعی از انرژی الکترون فرودی نمایش داده شده اند.



شکل ۳ تاثیر ناهمواری بر احتمال عبور ب ترتیب از بالا: نمونه کاشت نشده بدون در نظر گرفتن ناهمواری، نمونه کاشت نشده و نمونه کاشت نشده اول



شکل ۴ تاثیر ناهمواری بر مؤلفه های پراکنده شده احتمال عبور برای نمونه کاشت نشده و نمونه های کاشت شده

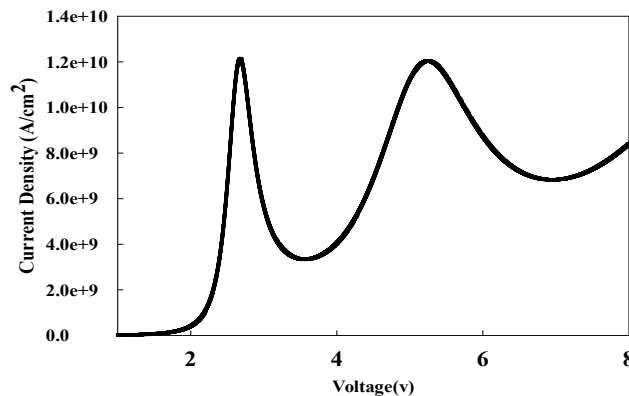
در مقایسه حالت واقعی نسبت به حالت (ایده ال) بدون ناهمواری، فرآیند پراکندگی، مانع از رسیدن مقدار احتمال عبور به بیشینه مقدار ممکن یعنی عدد یک می شود. همچنین تغییرات احتمال عبور به عنوان تابعی از میزان ناهمواری (برای نمونه های

در قله مشخصات I-V خواهد شد.

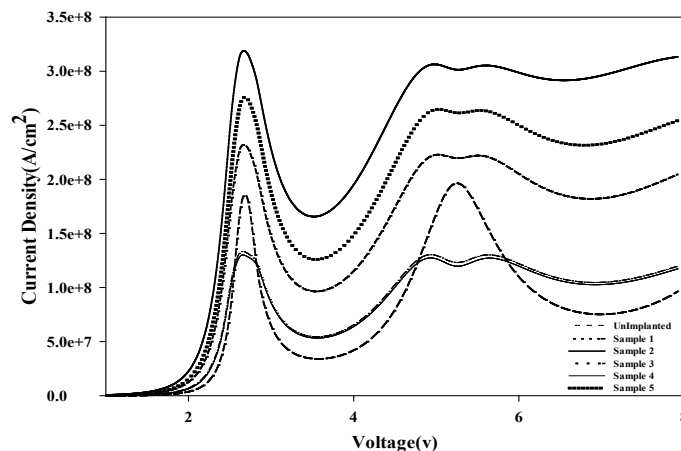
هرچقدر میزان ولتاژ اعمالی افزایش یابد، در ابتدا، مقدار جریان به بیشینه مقدار رسیده و سپس با افزایش ولتاژ، جریان در یک منطقه مقاومت دیفرانسیلی منفی کاهش می‌یابد. ادوات الکترونیکی با این مشخصات در سوئیچ‌های الکترونیکی سریع، تولید نوسانات میکروویو و به عنوان تشدید کننده فرکانس برای فرکانس‌های بالا استفاده می‌شوند [8-10]. به همین ترتیب منحنی‌های دیگری برای نمونه‌های کاشت شده رسم شده است. به‌عنوان هدف مهمی در این مطالعه، تأثیر میزان دوز یون‌های استفاده شده در فرآیند کاشت یونی بر روی ناهمواری یا هموار نمودن فصول مشترک (نمونه‌ها) بررسی شده است. بنابراین، مشخصه I-V نمونه‌های کاشت شده (مولفه‌های پراکنده شده) در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند.

کاشت شده با دوزهای مختلف) نشان می‌دهد که با افزایش میزان دوز یونی، سطوح از نظر هموارتر شدن یا زبرتر شده رفتارهای متفاوتی نان می‌دهند. به عنوان مثال نمونه شماره سه بیشترین میزان مولفه پراکندگی احتمال عبور را نشان می‌دهد. و در ادامه، دوز یون‌های استفاده شده در فرآیند کاشت بیشتر باشد، سهم پراکندگی ناشی از ناهمواری کاهش می‌یابد.

به منظور بررسی تأثیر پراکندگی ناشی از ناهمواری بر رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها، در شکل (۵)، مشخصه جریان-ولتاژ، I-V (طبق رابطه شماره ۴) نمونه کاشت نشده نشان داده شده است. منحنی‌های برای حالت ایده‌آل (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 دارا خواهد بود اگر فصول مشترک ایده‌آل و بدون ناهمواری لحاظ شوند. این امر منجر به بیشترین مقدار



شکل ۵ چگالی جریان بر حسب ولتاژ برای نمونه کاشت نشده با حالت ایده‌آل (بدون در نظر گرفتن ناهمواری)



شکل ۶ چگالی جریان نمونه کاشت نشده و نمونه‌های کاشت شده بر حسب ولتاژ اعمالی

نظر گرفته شده و فرآیند کاشت یونی بر روی آن ها انجام شده است. یون‌های در نظر گرفته شده برای فرآیند کاشت، نیتروژن در انرژی مشخص و با دوزهای متفاوت هستند. به منظور بررسی سطوح تولید شده از تحلیل تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده است. تمامی سطوح موجود تولید شده ناهموار بوده و به علاوه فرآیند کاشت یونی منجر به تغییر ریخت شناسی سطوح تولید شده می‌شوند. از طرفی این سطوح تولید شده ناهموار در ساخت ادوات الکترونیکی متفاوت به کار گرفته می‌شوند. احتمال عبور و چگالی جریان این ساختارهای چند لایه‌ای که سطوح مشترکشان با استفاده از نمونه خام و همچنین نمونه های تولید شده از فرآیند کاشت یونی تولید شده‌اند، محاسبه شده است. یکی از اثرات اصلی ناهمواری، کاهش احتمال عبور از میان ساختارهای چند لایه است. نتایج نشان می‌دهد که میزان پراکندگی به دلیل حضور فصول مشترک ناهموار تولید شده با کاشت یون بیشتر است. به علاوه محاسبات چگالی جریان این نتایج بدست آمده را تأیید می‌کند. همچنین با افزایش دوز یون‌ها و در برخی موارد، سطوح تولید شده هموارتر بوده و میزان پراکندگی الکترون از آن‌ها کاهش می‌یابد که این نکته می‌تواند در طراحی و بهینه سازی ساختارهای الکترونیکی مدنظر قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه ازاد اسلامی واحد تهران غرب انجام شده است.

نتایج نشان می‌دهند که پراکندگی ناشی از ناهمواری فصول مشترک، قله تونل‌زنی تشدید یونی جریان را کاهش داده و دره جریان را افزایش می‌دهد. بنابراین، نسبت قله به دره در جریان نسبت به حالت با فصول مشترک ایده‌آل کاهش یافته است. به علاوه، سهم مولفه‌های پراکنده شده چگالی جریان با افزایش دوز یون‌ها بخصوص برای نمونه دوم افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن نتایج فوق می‌توان به این جمع بندی رسید که پدیده ترابرد و تونل‌زنی در ادوات الکترونیکی که سطوح مشترکشان با فرآیند کاشت یونی تولید می‌گردند قابل کنترل بوده و این روش می‌تواند در ساخت این ادوات بسیار کمک کننده باشد. شکل ۶، سهم پراکنده احتمال عبور را از ساختارهای پنج لایه ای را نشان می‌دهد که فصول مشترک کاشت نشده هستند. فصل مشترک اول و سوم این ساختار ناهموار در نظر گرفته شده است. تونل‌زنی تشدید یونی رخ می‌دهد که انرژی الکتون‌های فرودی با انرژی پایین ترین سطح انرژی نیمه مقید در چاه برابر باشد [25]. این امر منشا قله‌ها و دره‌های ظاهر شده در نمودار احتمال عبور است. بر اساس نتایج به دست آمده، چگالی جریان با افزایش دوز یون‌های استفاده شده در فرآیند کاشت یونی کاهش می‌یابد زیرا افزایش دوز یون‌ها موجب ناهموار شدن فصول مشترک می‌شود. نتایج فوق با نتایج به دست آمده از کارهای تجربی دیگر قابل مقایسه بوده و در طراحی ادوات الکترونیکی مفید هستند [9-13].

نتیجه گیری

در مقاله حاضر، لایه های نازک تانتالوم به عنوان نمونه خام در

مراجع

- [1] N. Kalyanasundaram, M.C. Moore, J.B. Freund and H.T. Johnson, "Stress evolution due to medium-energy ion bombardment of silicon," *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 483–491, (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.028>
- [2] S.S. Patil, R.P. Fernandes, N. K. Patel, P. A. Rayjada, P. M. Raole and D. C. Kothari, "Corrosion resistance study of argon implanted and ion-beam-mixed 316 SS," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 196, no. 1-3, pp. 284–287, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.111>
- [3] A. K. De, J. G. Speer, D. K. Matlock, D. C. Murdock, M. C. Mataya, R. J. Comstock, "Deformation-induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37, pp. 1875–1886, (2006). <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0130-y>

- [4] G.S.Chen, S.T.Chen, "Diffusion barrier properties of single- and multilayered quasi-amorphous tantalum nitride thin films against copper penetration," *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, no. 12, pp. 8473 - 8482, (2000).
<https://doi.org/10.1063/1.373566>
- [5] J.C. Chuang, M. C. Chen, "Properties of thin Ta-N films reactively sputtered on Cu/SiO₂/Si substrates," *Thin Solid Films*, Vol. 322, no. 1-2, pp. 213-217, (1998).
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00914-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00914-0)
- [6] M. Stavrev, D. Fischer, C. Wenzel, K. Drescher and N. Mattern, "Crystallographic and morphological characterization of reactively sputtered Ta, Ta-N and Ta-N-O thin films," *Thin Solid Films*, Vol. 307, no. 1-2, pp.79–88,(1997).
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00319-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00319-2)
- [7] A. H. Ramezani, A. H. Sari and A. Shokouhy, "The effects of argon ion bombardment on the corrosion resistance of tantalum," *International Nano Letters*, Vol. 7, pp. 51–57, (2017).
<https://doi.org/10.1007/s40089-017-0201-7>
- [8] Y. Li, S. Wei, X. Cheng, T. Zhang and G. Cheng, "Corrosion behavior and surface characterization of tantalum implanted TiNi alloy," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, no. 13, pp. 3017–3022, (2008).
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.11.003>
- [9] K. Ghosh, R. K. Pandey, "Assessment of fractal and multifractal features of sol-gel spin coated ZnO thin film surface," *Materials Research Express*, Vol. 6, no. 7, (2019).
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab25d7>
- [10] T. G. Bifano, H. T. Johnson, P. Bierden and R. K. Mali, "Elimination of stress-induced curvature in thin-film structures," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, no. 5, pp. 592–597, (2002).
<https://doi.org/10.1109/JMEMS.2002.802908>
- [11] Zh. Ebrahiminejad, S. F. Masoudi, G. R. Jafari and R. S. Dariani, "Effects of self-affine roughness characteristics on electron transmission through tunneling structures," *Thin Solid Films*, Vol. 522, pp. 233–237, (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.08.042>
- [12] D. Raoufi, F. Hosseinpanahi, " The effect of film thickness on surface morphology of ITO thin films," *Journal of Theoretical and Applied Physics*, Vol. 7, no.1, pp. 21, (2013).
<https://doi.org/10.1186/2251-7235-7-21>
- [13] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and Zh. Ebrahiminejad, "Statistical and fractal analysis of nitrogen ion implanted tantalum thin films," *Applied Physics A*, Vol. 126, pp. 481, (2020).
<https://doi.org/10.1007/s00339-020-03671-7>
- [14] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and Zh. Ebrahiminejad, "Structural and mechanical properties of tantalum thin films ected by nitrogen ion implantation," *Modern Physics Letters B*, Vol. 34, no. 15, pp. 2050163, (2020).
<https://doi.org/10.1142/S0217984920501638>
- [15] Z.W. Kowalski, J. Wilk and J. Martan, "Surface morphology of steel and titanium induced by ion beam bombardment - Comprehensive analysis," *Vacuum*, Vol. 83, pp. 208–213, (2009).

- <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.01.065>
- [16] A. H. Ramezani, A. H. Sari and A. Shokouhy, "The effects of argon ion bombardment on the corrosion resistance of tantalum," *International Nano Letters*, Vol. 7, pp. 51-57, (2017).
<https://doi.org/10.1007/s40089-017-0201-7>
- [17] A.H. Ramezani, S. Hoseinzadeh, Z. Ebrahiminejad, "Structural and mechanical properties of tantalum thin films etched by nitrogen ion implantation" *Modern Physics Letters B* "Vol.34, no. 15, p.2050163 ,(2020).
<https://doi.org/10.1142/S0217984920501638>
- [18] S. Hoseinzadeh, A. H. Ramezani, "Corrosion Performance of Ta/Ni Ions Implanted with WO₃/FTO," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol. 39, no. 5, pp. 501-507, (2018).
<https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/02579731-201810-201812100006-201812100006-501-507>
- [19] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi, "Structural modification of tantalum crystal induced by nitrogen ion implantation," *Bulletin of Materials Science*, Vol. 39, pp. 633-640, (2016).
<https://doi.org/10.1007/s12034-016-1212-0>
- [20] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and A. H. Sari, "Experimental Investigation of Corrosion Improvement Implanted Ta by Ar-Ni Ions," *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, Vol. 14, no. 3, pp. 425-430, (2019).
<https://doi.org/10.1166/jno.2019.2527>
- [21] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi, "Corrosion resistance behavior of nitrogen ion-implanted in tantalum," *Applied Physics A*, Vol. 122, pp. 179, (2016).
<https://doi.org/10.1007/s00339-016-9712-8>
- [22] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh, Z. Ebrahiminejad and M. R. Hantehzadeh, "The study of mechanical and statistical properties of nitrogen ion-implanted Tantalum bulk," *Optik*, Vol. 225, pp. 165628, (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165628>
- [23] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and Z. Ebrahiminejad, "Statistical and fractal analysis of nitrogen ion implanted tantalum thin films," *Applied Physics A*, Vol. 126, pp. 1-6 ,(2020).
<https://doi.org/10.1007/s00339-020-03671-7>
- [24] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh, Z. Ebrahiminejad and M. Sangashekan, "Microstructural and energy-dispersive X-ray analyses on argon ion implantations in tantalum thin films for microelectronic substrates," *Electronics*, Vol. 10, no. 23, pp. 2941, (2021).
<https://doi.org/10.3390/electronics10232941>
- [25] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi, "Microstructure and corrosion resistance of tantalum after nitrogen ion implantation," *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Vol. 51, no. 6, pp. 393-399 ,(2016).
<https://doi.org/10.1080/1478422X.2015.1124503>
- [26] A. H. Ramezani, M. Ghoranneviss, A. Shokouhy and A. H. Sari, "Corrosion resistance modification of AISI 304 stainless steel using argon ion bombardment," *Journal of fusion energy*, Vol. 30, pp. 64-67, (2011).
<https://doi.org/10.1007/s10894-010-9345-4>

- [27] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi, "Mechanical and electrochemical properties of tantalum implanted by nitrogen ions," *High Temperature Material Processes, An International Quarterly of High-Techonology Plasma Processes*, Vol. 18, no. 1-2, pp. 143-153, (2014).
<https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2015015478>
- [28] S. Hoseinzadeh, A. H. Ramezani, "Tantalum/Nitrogen and n-type WO₃ semiconductor/FTO structures as a cathode for the future of Nano devices," *Journal of Nanostructures*, Vol. 9, no. 2, pp. 276-286, (2019).
<https://doi.org/10.22052/JNS.2019.02.010>