

مروری بر روش‌های لایه‌نشانی و خواص لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم

نوع مقاله: علمی پژوهشی

امیر هوشنگ رضانی^{۱*}، امیرحسین ساری^۲، رشا سعد یوسف کریمی^۳

^۱ گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بصره، بصره، عراق

* ramezani.wtiau1400@gmail.com

چکیده:

نیتريد تانتالوم (Tan) به دلیل خواص منحصر به فردی مانند سختی بالا و مقاومت بالا در برابر سایش و همچنین مقاومت الکتریکی پایدار، در صنایع مکانیکی و میکروالکترونیک به طور گسترده استفاده می‌شود. نظر به اهمیت موضوع، در مقاله حاضر، با در نظر گرفتن مراجع معتبر، بررسی جامعی از پیشرفت‌های تحقیقاتی در زمینه روش‌های لایه‌نشانی، روش‌های مشخصه‌یابی، خواص و کاربردهای لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم به عمل آمده است. به این منظور، ابتدا تولید و لایه‌نشانی این لایه‌های نازک توسط روش‌هایی مانند رسوب‌دهی فیزیکی (PVD)، کندوپاش مگنترون DC پالسی و فرکانس رادیویی RF مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین در ادامه، خواص ساختاری، میکروسکوپی، الکتریکی، اپتیکی، مکانیکی و تریبولوژیکی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم به طور جامع مورد بحث قرار گرفته‌اند. به این منظور از تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ نیروی اتمی، میکروسکوپ الکترون روبشی، محاسبه نرخ سایش لایه‌ها، تاثیر تغییر محتوای نیتروژن ولتاژ بایاس بستر بر روی تنش پسماند لایه‌ها، تغییر سختی و مدول الاستیک لایه‌های نیتريد تانتالوم با نسبت جریان نیتروژن، ضریب شکست و ضریب خاموشی لایه‌ها، طیف عبور اپتیکی لایه‌ها، مقاومت الکتریکی لایه در جریان نیتروژن مختلف، مقاومت سطحی نرمال شده برحسب دما و تغییرات مقاومت سطحی لایه‌های نگه داشته شده در دماهای مختلف به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی شده نشان می‌دهد که لایه‌های نازک تولید شده مذکور، پتانسیل بالایی برای کاربرد در زمینه‌های مختلف به خصوص در محیط‌های سخت با دما و فشار بالا دارند. این مقاله مروری، می‌تواند مرجعی مناسب و جامع برای پژوهش‌هایی باشد که در زمینه لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم و فناوری‌های مرتبط با آن انجام خواهد شد. این مطالعه بینش‌های ارزشمندی را در مورد بهینه‌سازی پارامترهای کندوپاش برای تولید لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم با کیفیت بالا بر روی بسترهای مسی ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که دمای زیر لایه یک پارامتر حیاتی است که برای دستیابی به خواص ساختاری و مورفولوژیکی مطلوب لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم باید به دقت کنترل شود.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۹ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۹ دی ۱۴۰۲

صفحه ۱۵ تا صفحه ۳۶

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

کلیدواژه:

نیتريد تانتالوم، کاشت، لایه نازک، خواص ساختاری.

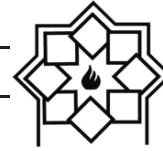
20.1001.1.23222352.1402.0.0.1.2

کد DOR:

نیتريد‌های فلزات واسطه که معمولاً به عنوان فلزات سخت

۱- مقدمه

^۱ Physical vapor deposition



در مقایسه با قلع است که بر اساس سازگاری خون لایه‌های نیتريد تانتالوم، همانطور که با اندازه‌گیری زمان لخته شدن و آزمایش‌های چسبندگی پلاکتی ارزیابی می‌شود، است. همچنین نیتريد تانتالوم به دلیل خواص سایش عالی به عنوان پوشش محافظ روی فولاد استفاده می‌شود [۴]. تانتالوم خالص در دو فاز مکعبی با مرکز حجمی (BCC) با ثبات ترمودینامیکی و فاز تتراگونال فراپایدار وجود دارد. تبدیل فاز از فاز تتراگونال به فاز BCC بین 300°C تا 400°C رخ می‌دهد. سختی ساختار BCC ۷ تا ۱۱ گیگاپاسکال و فاز تتراگونال حدود ۱۴ گیگاپاسکال گزارش شده است [۵]. افزودن نیتروژن سختی لایه‌های تانتالوم را افزایش می‌دهد. در مورد لایه‌های نیتريد تانتالوم، سختی وابستگی ریزساختاری واضحی را نشان می‌دهد به طوری که کاهش اندازه دانه باعث افزایش سختی از ۱۶ به ۲۴ گیگاپاسکال می‌شود. بررسی‌های انجام شده بر روی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم، به وضوح پتانسیل استفاده از آن‌ها را به عنوان پوشش‌های بسیار سخت نشان می‌دهد [۱]. لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم فازهای پایدار و فازهای فراپایدار متفاوتی دارد. نیتريد تانتالوم شش ضلعی فاز پایدار است که معمولاً در دماهای بالای 1300°C تا 1400°C تشکیل می‌شود [۶]. فازهای دیگری از این ترکیب نیز شناسایی شده است که به عنوان مثال در روش کندوپاش واکنشی، گرم کردن بستر تا دمای 300°C و نسبت $30\% \text{N}_2/\text{Ar}$ منجر به تشکیل فاز ارتورمبیک Ta₄N شد [۵]. در این مقاله مروری، به معرفی روش‌های مختلف لایه‌نشانی، مشخصه‌یابی و خواص ساختاری، میکروسکوپی، الکتریکی، اپتیکی، مکانیکی و تریبولوژیکی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم می‌پردازیم.

نسوز شناخته می‌شوند، دارای ترکیبی خاص از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هستند که آن‌ها را برای محققان تجربی و نظری جالب توجه ساخته است. افزودن نیتروژن، سختی فیلم‌های تانتالیوم را با حداکثر سختی (۳۲ گیگاپاسکال) افزایش می‌دهد. در مورد فیلم‌های نیتريد تانتالیوم با نیتروژن کم، سختی وابستگی ریزساختاری واضحی را نشان می‌دهد. کاهش اندازه دانه باعث افزایش سختی از ۱۶ به ۲۴ گیگاپاسکال می‌شود. بررسی‌های انجام شده بر روی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم، به وضوح پتانسیل استفاده از آن‌ها را به عنوان پوشش‌های بسیار سخت نشان می‌دهد [۱]. از میان نیتريد‌های فلزات واسطه می‌توان به نیتريد تانتالوم اشاره نمود که دارای ترکیباتی متنوع بوده و به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است [۲]. نیتريد تانتالوم دارای ویژگی‌های جالب بسیاری مانند مقاومت بالا در برابر سایش، سختی بالا، بی‌اثری شیمیایی و مقاومت الکتریکی پایدار در دما است. این موارد، نیتريد تانتالوم را جهت استفاده گسترده در صنایع مختلف، مناسب ساخته است. به عنوان مثال به یک ماده مانع انتشار بسیار امیدوارکننده در فناوری اتصال مس در میکروالکترونیک تبدیل شده است. در این راستا، تکنیک‌های مختلفی در توصیف کیفی و کمی انتشار مس در نیتريد تانتالوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعه مقاومت سطحی Cu/Ta/N/Si پس از بازپخت در دماهای مختلف نشان داده است که نیتريد تانتالوم می‌تواند تا دمای 800°C بدون شکستن مس مقاومت کند [۳]. خواص زیست‌پزشکی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم سنتز شده توسط کندوپاش مگنترون واکنشی نشان داده است که نیتريد تانتالوم یک ماده عالی برای ساخت دریچه‌های قلب مصنوعی تجاری



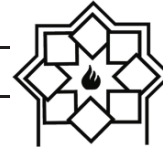
۲- روش‌های لایه‌نشانی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم

لایه‌های نیتريد تانتالوم بس‌بلوری با تکنیک‌های مختلفی از جمله رسوب بخار فیزیکی (PVD)، کندوپاش مگنترونی با فرکانس رادیویی RF و DC، رسوب بخار شیمیایی (CVD)^۱ و رسوب لایه اتمی (ALD)^۲ تهیه می‌شوند [۷-۱۱]. خواص لایه‌های نیتريد تانتالوم پلی‌کریستالی با تکنیک‌های مختلف رسوب‌گذاری بسیار متفاوت است. روش PVD معمولاً در ساخت پوشش‌های لایه نازک استفاده می‌شود. روش‌های PVD شامل تبخیر، رسوب پاششی، رسوب‌گذاری قوس کاتدی و رسوب لیزر پالسی است. در تمام روش‌های PVD، گونه‌های تشکیل‌دهنده، اتم‌ها یا مولکول‌ها یا با تبخیر یک منبع جامد یا با استفاده از یون‌های گازی پراثرژی در پلاسما برای از بین بردن یا پاشیدن اتم‌ها از یک هدف منبع تولید می‌شوند. این اتم‌ها از خلاء فاز گاز بسیار کم فشار عبور می‌کنند، به بستر برخورد می‌کنند و در نهایت روی سطح متراکم می‌شوند و فیلم را تشکیل می‌دهند. در کندوپاش واکنشی، گونه‌ها در حضور یک گاز واکنشی (مانند نیتروژن) پراکنده می‌شوند و ترکیبی تشکیل و رسوب می‌کند [۱۲]. در فرآیند کندوپاش، گاز بی‌اثری مانند آرگون با فشار کم وارد محفظه می‌شود. یک ولتاژ بایاس در دو الکترود اعمال می‌شود و پلاسما ایجاد می‌شود. پلاسما حاوی اتم‌های خنثی آرگون، یون‌های آرگون و الکترون‌های آزاد است و یک محیط رسانا است. الکترون‌های آزاد موجود در محفظه از کاتد با بار منفی (هدف) دور می‌شوند. برخی از این الکترون‌ها با گاز

پراکنده مانند آرگون برخورد می‌کنند و در نتیجه یک یون آرگون و یک الکترون ایجاد می‌شود. سپس یون‌های مثبت به سمت هدف با بایاس منفی شتاب می‌گیرند و اتم‌های هدف را از جای خود خارج می‌کنند یا کندوپاش می‌کنند. سپس این اتم‌ها آزاد هستند تا بصورت بخار در پلاسما حرکت کنند و به سطح ویفرها برخورد کنند و فیلم رسوب شده را تشکیل دهند. اگر هدف رسانا باشد، از حالت DC رسوب کندوپاش استفاده می‌کنیم و برای رسوب نارسانهایی مانند سیلیکون کم نفوذ داده شده شده، از روش RF استفاده می‌کنیم. در طی این فرآیند، تعدادی از الکترون‌های آزاد با یون‌های آرگون برخورد می‌کنند و اتم‌های خنثی آرگون را تشکیل می‌دهند. هنگامی که الکترون پراثرژی به حالت پایه برمی‌گردد، یک فوتون در واکنش آزاد می‌شود و در نتیجه پلاسما درخشش پیدا می‌کند [۱۲]. در رسوب کندوپاش، سرعت کندوپاش هدف یا منبع مهم است. کندوپاش زمانی اتفاق می‌افتد که یون ورودی انرژی کافی را به سطح هدف منتقل می‌کند تا پیوندهایی را که اتم هدف را در جای خود نگه می‌دارد، بشکند. این بستگی به انرژی و جرم یون‌ها و ماده هدف دارد. بازده، که تعداد اتم‌های هدف در هر یون فرودی است، به انرژی یون، ولتاژ در سراسر غلاف و جهت برخورد یون‌ها بستگی دارد. چندین هدف نیز ممکن است در این سیستم‌ها برای لایه نشانی همزمان استفاده شود. در روش رسوب کندوپاش واکنشی یک گاز راکتیو همراه با گاز کندوپاش وارد محفظه می‌شود. در مورد نیتريد تانتالوم، پلاسما می‌تواند انرژی را به نیتروژن بدهد تا به نیتروژن اتمی تجزیه شود، که

^۲ Atomic Layer Diposition

^۱ chemical vapor deposition



RF، الکترون‌ها مستقیماً از میدان‌های RF در حال نوسان انرژی دریافت می‌کنند و بازده یونیزاسیون را تا حدی افزایش می‌دهند. با این حال، نرخ رسوب کلی هنوز پایین است. در این تکنیک از آهنربا برای افزایش درصد الکترون‌هایی که در یونیزاسیون شرکت می‌کنند استفاده می‌شود. یک میدان مغناطیسی اعمال می‌شود که الکترون‌ها را در نزدیکی سطح هدف به دام می‌اندازد و باعث می‌شود که آن‌ها در یک حرکت مارپیچی حرکت کنند تا زمانی که با اتم آرگون برخورد کنند. از مزایای این روش می‌توان به کاهش گرمایش ناخواسته ویفر اشاره کرد، زیرا پلاسما متراکم در نزدیکی هدف محدود می‌شود. علاوه بر این، فشار آرگون کمتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد زیرا راندمان یونیزاسیون بالا است و کیفیت فیلم بهتر است، زیرا آرگون کمتر در آن‌ها گنجانده شده است [۱۲].

۳- خواص لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم

۳-۱- خواص ساختاری

شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم را که به روش کندوپاش تهیه شد را نشان می‌دهد [۷]. هدف شناسایی آهنگ شار گاز بهینه بود که کم‌ترین تغییر در مقاومت سطحی و ضریب دمایی مقاومت (TCR)^۱ را ایجاد کند. همه نمونه‌ها دارای فاز مکعبی نیتريد تانتالوم با پیک‌های (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) هستند. مقادیر اندازه بلورک نیز به ترتیب برابر با ۷/۵۹، ۹/۱۷، ۷/۵۷ و ۹/۲۰ نانومتر برای شار گاز ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ sccm گزارش شد که به‌طور قابل توجهی کمتر از مقادیر گزارش شده در دیگر

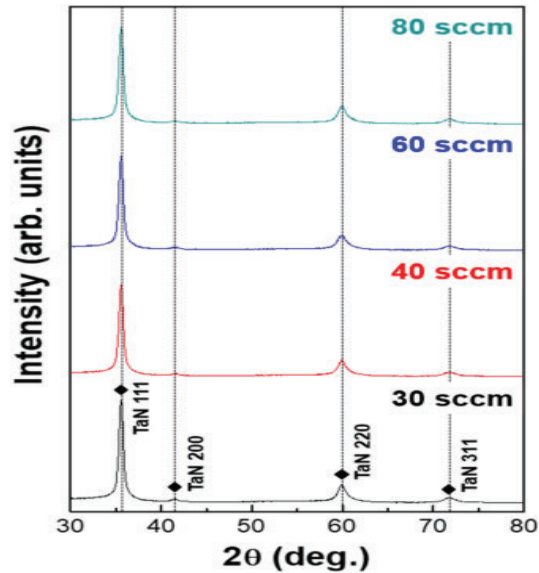
سپس می‌تواند به راحتی با تانتالوم واکنش دهد. واکنش معمولاً یا روی سطح ویفر یا نزدیک خود هدف رخ می‌دهد و نه در پلاسما. کنترل استوکیومتری فیلم‌های پراکنده واکنشی گاهی دشوار است. در روش کندوپاش بایاس است که در آن رسوب‌گذاری و کندوپاش ویفر به طور همزمان انجام می‌شود. یک سوگیری منفی نسبت به پلاسما به بستر اعمال می‌شود که از نظر الکتریکی از دیواره‌های محفظه جدا شده است. اتم‌های آرگون مثبت از پلاسما اکنون به سمت ویفرها به زیرلایه شتاب داده می‌شوند و اتم‌ها را پاشش می‌کنند. انرژی یون‌ها را می‌توان با کنترل بایاس بستر کنترل کرد. در تمیز کردن اسپاتر، معمولاً با استفاده از یک دریچه برای مسدود کردن مواد پراکنده شده از هدف، هیچ رسوبی روی سطح ویفر ایجاد نمی‌شود. ضخامت کنترل‌شده‌ای از مواد از ویفر پاشیده می‌شود و هر گونه آلودگی و اکسید را از بین می‌برد. در کندوپاش بایاس، شرایط به گونه‌ای انتخاب می‌شود که رسوب بیش‌تری نسبت به کندوپاش رخ دهد. یک فیلم مسطح‌تر بدلیل کندوپاش بایاس به دست می‌آید. همچنین، با تغییر بایاس بستر، می‌توان خواص فیلم رسوب‌شده را تغییر داد. این خواص شامل تنش پسماند، چگالی، مقاومت و خواص مکانیکی است. یکی از معایب این روش این است که نرخ خالص رسوب آهسته است [۱۲]. در دو روش کندوپاش مگنترون DC و RF، بازده یونیزاسیون ناشی از برخوردهای پرا انرژی بین الکترون‌ها و اتم‌ها بسیار کم است. اکثر الکترون‌ها انرژی خود را در برخوردهای غیر یونیزه از دست می‌دهند و در نتیجه تنها درصد کمی از آن‌ها در فرآیند یونیزاسیون با اتم‌های ar شرکت می‌کنند. در پلاسما

^۱ Thermal Coefficient of Resistant

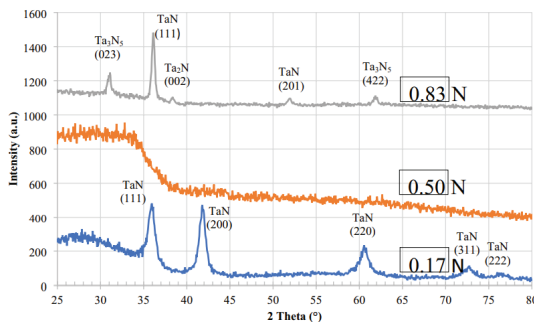


کارهای پژوهشی بود [۱۳ و ۱۴].

است [۸]. نمونه‌ها با کسر نیتروژن پایین‌تر فاز نیتريد تانتالیوم را نشان می‌دهند در حالی که نمونه‌ها با کسر نیتروژن بالاتر دارای فاز غالب Ta_3N_5 هستند. در دمای پایین زیرلایه و کسر نیتروژن کم، لایه‌های بیش از حد استوکیومتری ($Ta:N=1/32$) تشکیل می‌شوند، زیرا انرژی کافی وجود ندارد و اتم‌های نیتروژن کافی برای پیوند با اتم‌های تانتالوم وجود ندارد که منجر به تشکیل یک لایه با مقداری تانتالوم غیرپیوندی می‌شود. با افزایش کسر نیتروژن و دمای زیرلایه، این تمایل به پیوند بهبود می‌یابد. به نظر می‌رسد که نسبت نیتروژن بالای $0/83$ ، اتم‌های نیتروژن کافی را برای اتصال شیمیایی حتی بدون کمک حرارت‌دهی زیرلایه ایجاد می‌کند.



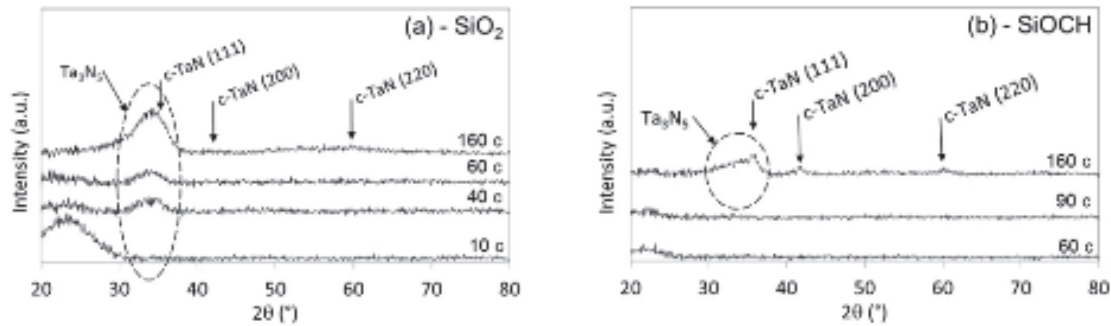
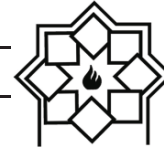
شکل ۱- الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های TaN با آهنگ شار گاز کل از ۳۰ تا ۸۰ sccm [۷]



شکل ۲- الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های تهیه شده با مقادیر مختلف کسر نیتروژن در دمای زیرلایه ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد [۸]

نتایج پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم تهیه شده بر روی زیرلایه‌های SiO_2 و $SiOCH$ نانومتخلخل به روش ALD (شکل ۳) تشکیل فازهای ارتورومبیک Ta_3N_5 و مکعبی نیتريد تانتالیوم روی زیرلایه $SiOCH$ و فاز ارتورومبیک Ta_3N_5 روی زیرلایه SiO_2 را نشان داد که در هر دو مورد لایه‌های TaN_x به طور کامل متبلور نشدند [۱۱].

الگوهای پراش پرتو x- لایه‌های نیتريد تانتالیوم تهیه شده با روش کندوپاش RF در دمای $300^\circ C$ و تحت نسبت‌های مختلف گاز نیتروژن به ar در شکل ۲ نشان داده شده است. نیتريد تانتالیوم با کندوپاش واکنشی تانتالیوم در مخلوط گاز نیتروژن/ar در سه نسبت گاز مختلف و دو درجه حرارت زیرلایه مختلف نهشته شده است. اندازه‌گیری‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی، EDS، پراش پرتو ایکس و اسپکتروفتومتری نوری برای ارزیابی این تکنیک رسوبی به عنوان بخشی از کار در حال انجام است. نتایج نشان داد که افزایش دمای زیر لایه و کاهش نیتروژن در مخلوط گاز، کندوپاش منجر به مورفولوژی دانه‌های کوچک‌تر و ساختار لایه متراکم‌تر شده است. برای دمای زیرلایه ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، نیتريد تانتالوم برای کاهش نیتروژن آمورف بوده



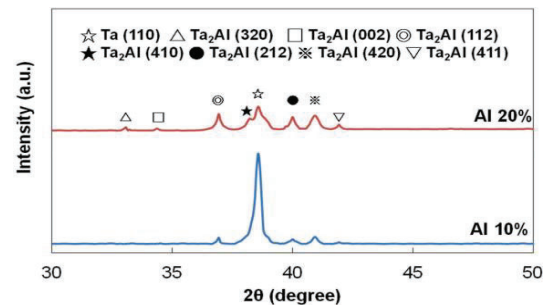
شکل ۳- الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نیتريد تانتالیوم جایگذاری شده روی سطوح: (a) SiO₂ و (b) SIOCH [۱۱]

ساختار کریستالی فیلم پراکنده شده از β -Ta به α -TaN (۱۱۱) تغییر می‌کند. وقتی جریان نیتروژن افزایش می‌یابد، قله‌های پراش به تدریج گسترده می‌شود، که نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها در حال کاهش است که منجر به مقاومت بیشتر می‌شود. در بخش بررسی خواص نوری می‌توانیم مشاهده کنیم که هم ضخامت و هم سرعت جریان نیتروژن بر ضریب شکست تأثیر می‌گذارد [۱۵]. طیف پراش پرتو ایکس لایه‌های Ta (نرخ جریان نیتروژن، صفر است) فاز مخلوطی از β -Ta (۲۲۱)، β -Ta (۰۰۲)، β -Ta (۳۳۰) و Ta (۱۱۰) را نشان می‌دهد.

۲-۳- خواص میکروسکوپی: مورفولوژی و توپوگرافی سطح

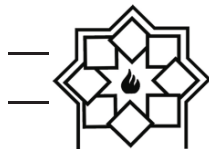
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم پس از ۱۶۰ چرخه ALD را نشان می‌دهد [۱۱]. در سطح SiO₂، تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی لایه نیتريد تانتالیوم (شکل ۶a) نشان می‌دهد که از جزایر نانومقیاس تشکیل شده است که به‌طور کامل و پیوسته سطح را می‌پوشانند که توسط عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۶b) تأیید می‌شود، جایی که هیچ کنتراست شیمیایی مشاهده نمی‌شود.

شکل ۴ الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های Ta-N-Al تهیه شده به روش کندوپاش RF با دو آلیاژ مختلف TaAl (۱۰ at و ۲۰ at) را نشان می‌دهد که حضور فاز کریستالی Ta₂Al در هر دو نمونه را تأیید می‌کند، با این تفاوت که در نمونه با درصد Al بالاتر بلورینگی فاز Ta₂Al بیشتر است [۹].

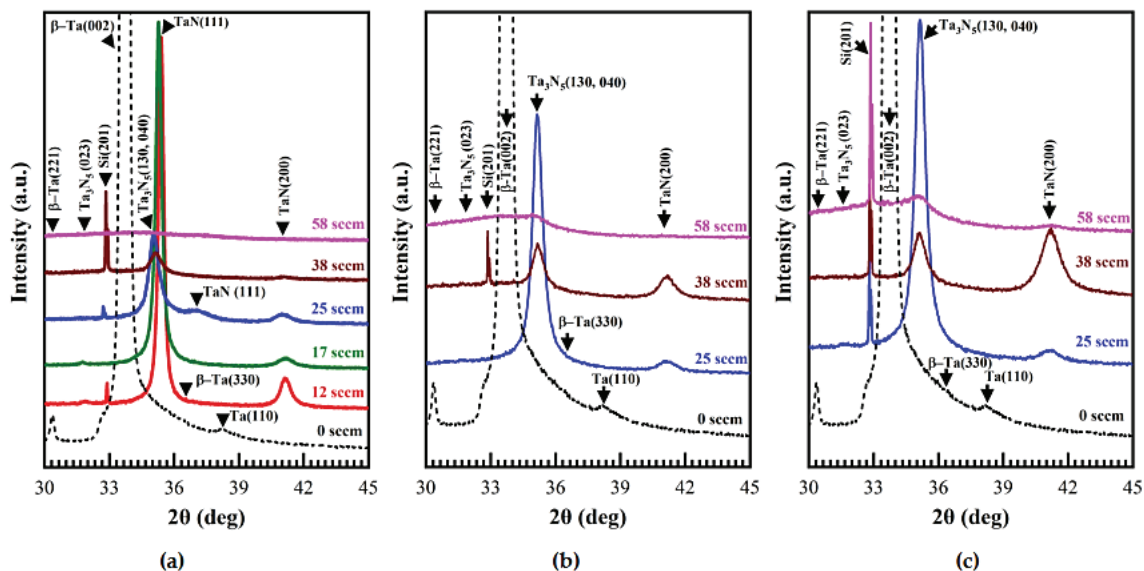


شکل ۴- الگوهای پراش پرتو ایکس هدف آلیاژ TaAl با ۱۰ و ۲۰ درصد Al [۹]

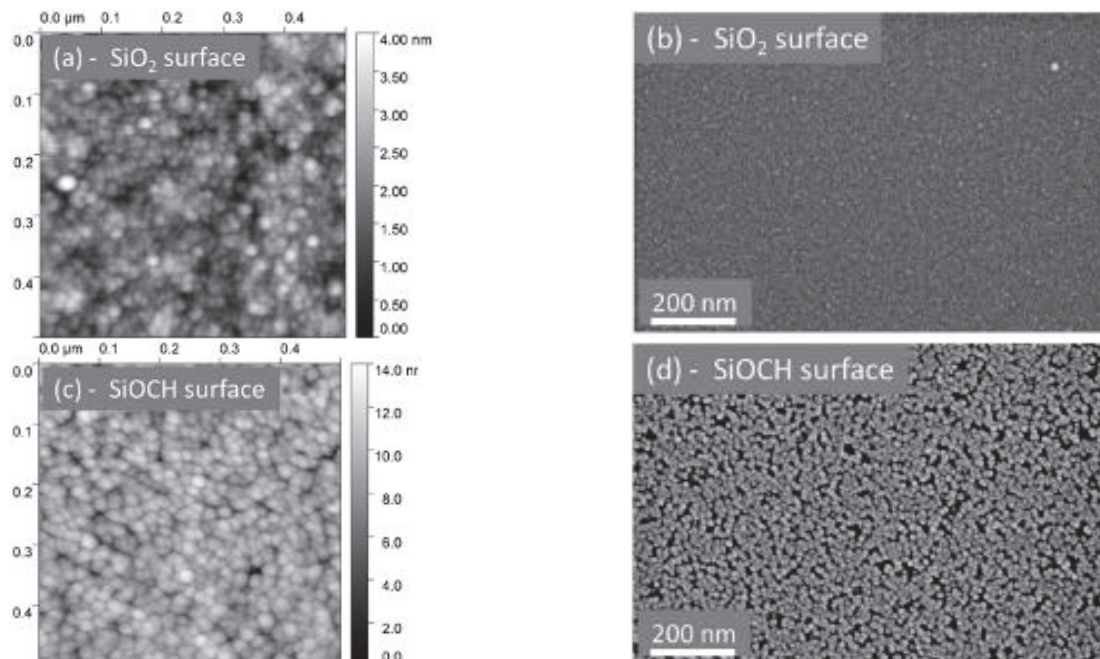
الگوهای پراش اشعه ایکس لایه‌های نیتريد تانتالیوم که به مدت ۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه و ۳۰ دقیقه با جریان‌های مختلف نیتروژن در مخلوط گاز متفاوت از ۰ تا ۵۸ sccm تهیه شدند (شکل ۵)، متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد که خواص نوری به نرخ جریان نیتروژن بستگی دارد. همان‌طور که نرخ جریان نیتروژن افزایش می‌یابد.



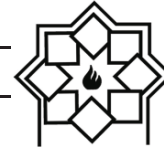
جایگذاری بر روی سطح SiOCH منجر به یک ریزساختار دانهای با جزایر کاملاً مشخص و مجزا شد (شکل ۶د).



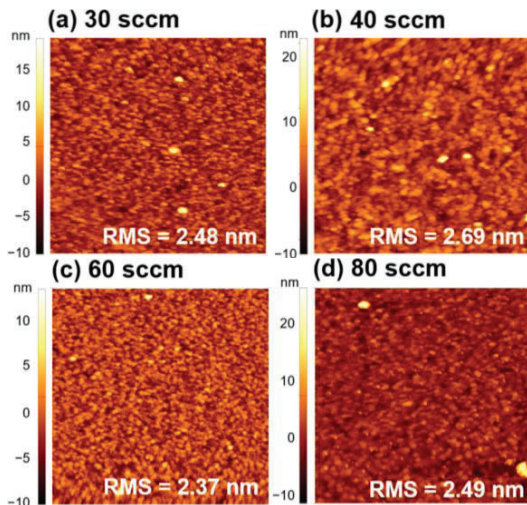
شکل ۵- الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های Ta (۲۰ دقیقه) و نیتريد تانتالیوم به مدت (a) ۱۰ دقیقه، (b) ۲۰ دقیقه، و (c) ۳۰ دقیقه با جریان‌های مختلف نیتروژن رسوب کردند [۱۵].



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های TaN پس از ۱۶۰ چرخه ALD و جایگذاری شده بر روی سطوح SiOCH (c-d) و SiO2 (a-b):



حالت بدون حرارت‌دهی زیرلایه و دمای زیرلایه 300°C را نشان می‌دهد [۸]. لایه‌ها حاوی برجستگی‌های کروی شکل از دانه‌های نامنظم گل‌کلم مانند هستند. دانه‌ها وقتی که کسر گاز نیتروژن کم است، نسبتاً بزرگ هستند و زبری سطح بالاست. با افزایش کسر نیتروژن، دانه‌ها یکنواخت‌تر و سطح لایه‌ها صاف‌تر می‌شود که با گزارش‌های دیگران مطابقت دارد [۱۹-۲۱]. در دمای زیرلایه 300°C ، اندازه دانه‌ها تا حدودی کوچک‌تر و سطوح لایه یکنواخت‌تر مشاهده می‌شود [۲۲ و ۲۳]. ضخامت لایه‌ها نیز در شکل مشخص است.

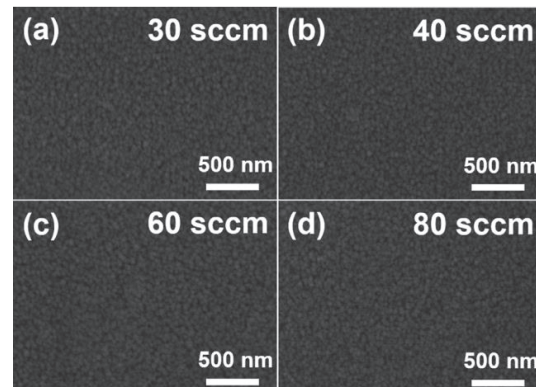


شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نیتريد تانتالیوم با آهنگ شار گاز کل (a) 30 sccm ، (b) 40 sccm ، (c) 60 sccm و (d) 80 sccm [۷]

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نازک Ta-N-Al ($0/064$) و Ta-N-Al ($0/176$) قبل و بعد از بازپخت در دمای 700°C (شکل ۱۰) نشان داد که پس از بازپخت مقدار دانه‌های کریستالی در لایه نازک Ta-N-Al ($0/176$) که تحت 16% تهیه شده کمتر از لایه نازک Ta-N-Al ($0/064$) است که تحت 16% لایه‌نشانی شده است [۹].

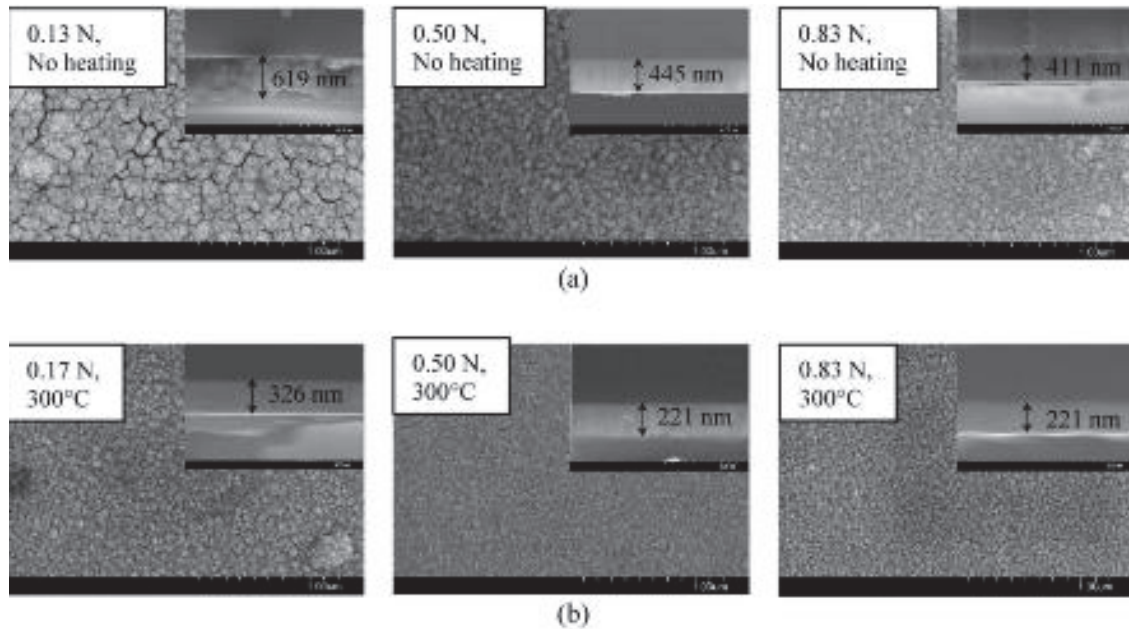
مشاهدات میکروسکوپ نیروی اتمی (شکل ۶c) نسبت ابعاد بزرگ‌تر این جزایر نیتريد تانتالیوم را نشان می‌دهد که در توافق با مورفولوژی جزیره مجزای مشاهده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی است [۴۴ و ۴۵].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نازک TaN که با آهنگ‌های شار گاز مختلف و به روش کندوپاش تهیه شده‌اند، به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است [۷]. همه نمونه‌ها تقریباً مورفولوژی سطحی مشابهی دارند و آهنگ شار گاز تاثیر چندانی بر روی مورفولوژی لایه‌ها ندارد. مقادیر زبری سطح متوسط RMS برابر با $2/48$ ، $2/37$ ، $2/69$ ، $2/48$ و $2/49$ نانومتر به ترتیب برای آهنگ‌های شار گاز 30 ، 40 ، 60 و 80 به دست آمد که نظم خاصی را با توجه به آهنگ شار گاز ندارند. این مقادیر کمتر از مقادیر گزارش شده در کارهای تحقیقاتی دیگر بود [۱۸].



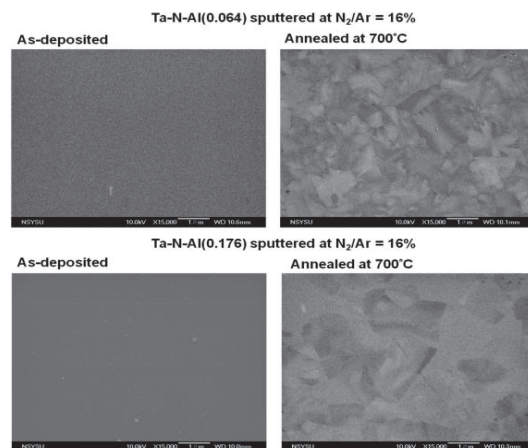
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نیتريد تانتالیوم تهیه شده به روش کندوپاش مگنترون DC با آهنگ شار گاز کل (a) 30 sccm ، (b) 40 sccm ، (c) 60 sccm و (d) 80 sccm [۷]

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نیتريد تانتالوم تهیه شده با کسرهای مختلف نیتروژن و در



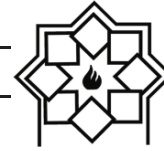
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های تهیه شده بر روی Si با نسبت گاز متفاوت در (a) بدون حرارت و (b) $T_s = 300^\circ\text{C}$ درجه سانتی‌گراد [۸]

بر روی بسترهای سیلیکونی، لایه‌های نیتريد تانتالیوم با توزیع جریان یونی متفاوتی بر روی خواص الکتریکی، ساختار بلوری، ترکیب عنصری، و خواص نوری نیتريد تانتالیوم مورد مطالعه قرار گرفتند. این خواص با روش چهار پروب، پراش اشعه ایکس طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس (XPS) و بیضی‌سنجی طیف‌سنجی (SE). مشخص شده است. پراش پرتو ایکس، نتایج نشان می‌دهد که نرخ رسوب با افزایش جریان نیتروژن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش مقاومت، اندازه کریستال کاهش می‌یابد. فاز غنی از $(\text{Ta}_3\text{N}_5, 0.40\text{N})$. با مطالعه خواص نوری، مشخص شد که تفاوت‌هایی وجود دارد در ضریب شکست (n) و ضریب خاموشی Ta(N) (k) با ضخامت‌های مختلف و نرخ‌های مختلف جریان نیتروژن، بسته به اندازه بلور و ساختار فاز کریستالی تانتالیوم دارد.



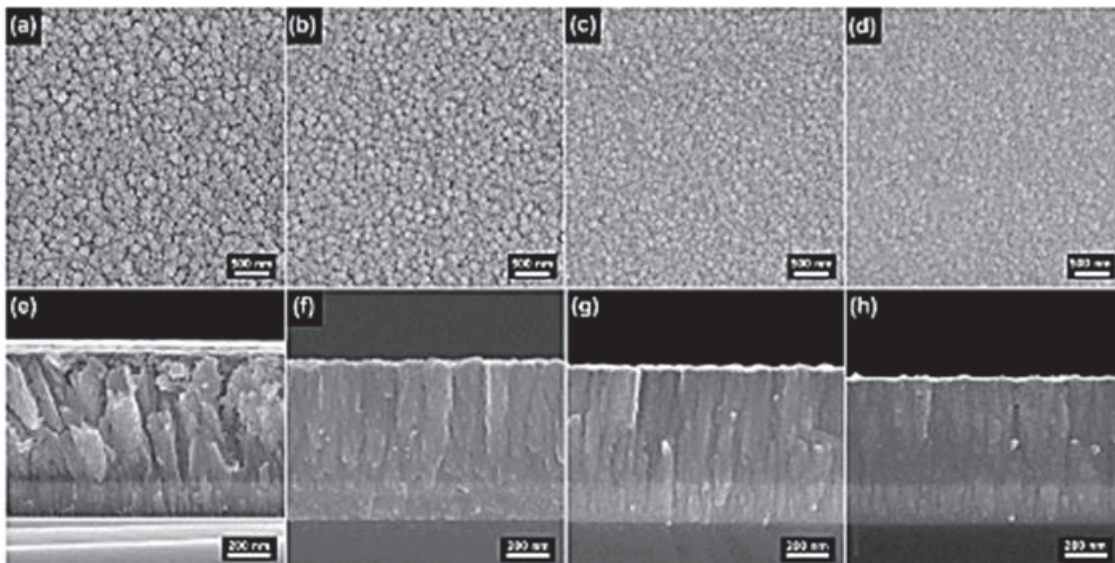
شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نازک Ta-N-Al (۰/۰۶۴) و Ta-N-Al (۰/۱۷۶) قبل و بعد از بازپخت در 700°C [۹]

شکل ۱۱ مورفولوژی سطحی و سطح مقطع پوشش‌های Ta_xN_x را نشان می‌دهد که با ولتاژهای بایاس مختلف رسوب کرده‌اند. با کندپاش مگنترون DC واکنشی از یک هدف Ta خالص



با افزایش ولتاژ بایاس اندازه ستونی و دانه‌ای کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکافها در حال تخریب هستند و ساختار پوشش با افزایش ولتاژ بایاس فشرده می‌شود. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم که در فشار جزئی نیتروژن ۱۵ درصد رشد کرده‌اند، به صورت تابعی از دما در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۲۵]. رگه‌هایی روی سطوح این لایه‌ها مشاهده می‌شود که جهت خود را از [۰۳۴] دمای اتاق به [۰۴۵] در ۱۵۰°C ، [۰۲۱] در ۲۰۰°C و سپس به [۰۲۳] در ۲۵۰°C تغییر می‌دهند. میانگین ارتفاع دانه‌های لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم، هنگامی که دمای رشد از دمای اتاق به ۱۵۰°C افزایش می‌یابد، ناگهان کاهش می‌یابد. سپس با افزایش بیش‌تر دما تقریباً ثابت می‌ماند، در نهایت یک افزایش ناگهانی رخ می‌دهد، که نشان‌دهنده سطح ناهموار فیلم نیتريد تانتالوم است که در دمای زیر لایه ۲۵۰°C به دست آمده است.

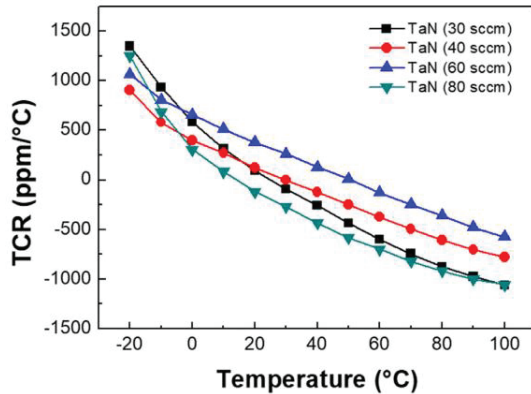
لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم با جریان یونی نیتروژن و زمان کندوپاش ۱۰ تا ۳۰ دقیقه با روش کندوپاش مگنترون راکتیو DC رسوب داده شد و دریافتند که نرخ لایه‌نشانی و رسوب نیتريد تانتالوم، خواص الکتریکی، ساختاری، شیمیایی و نوری به سرعت جریان نیتروژن بستگی دارد. با افزایش نرخ جریان نیتروژن از ۰ به ۵۸، کریستال ساختار لایه پراکنده شده از $\beta\text{-Ta}$ به TaN تغییر می‌کند (۱۱۱) و در نهایت تبدیل به فاز غنی از Ta_3N_5 (۰۴۰) می‌شود. هنگامی که نرخ جریان نیتروژن افزایش می‌یابد، پراش قله‌ها به تدریج گسترده می‌شوند که نشان‌دهنده کاهش اندازه دانه است که منجر به افزایش می‌شود. الگوها کریستالوگرافیک و در نتیجه بی‌شکل می‌شوند. در مطالعه خواص نوری، می‌توان دید که هم ضخامت و هم نرخ جریان نیتروژن بر ضریب شکست تأثیر می‌گذارند [۲۴]. لایه تهیه شده در ولتاژ صفر (شکل ۱۱a و e) ساختار ستونی درشت و سطح دانه‌ای را نشان می‌دهد.



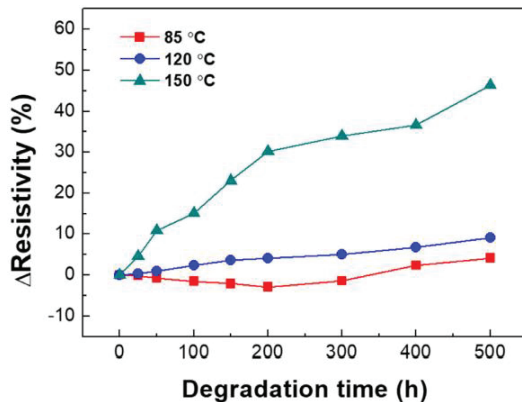
شکل ۱۱- (a-d) مورفولوژی سطح معمولی پوشش‌های TaN_x که با ولتاژهای بایاس مختلف رسوب می‌کنند: به ترتیب ۰ ولت، ۱۰۰- ولت، ۲۰۰- ولت و ۳۰۰- ولت هستند. (e-h) سطح مقطع مربوط به (a-d) [۲۴].



در مقاومت سطحی در دمای 150°C ، برخلاف دمای 85°C و 120°C مشاهده شد که به دلیل افزایش چگالی ناخالصی بود که مسیر آزاد میانگین الکترون‌ها و رسانایی نیتريد تانتالیوم را کاهش می‌دهد [۷].



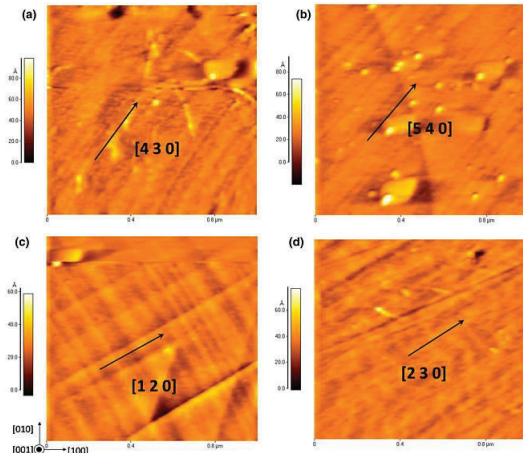
شکل ۱۳- تغییرات دمایی TCR برای لایه‌های TaN با آهنگ شار گاز کل از ۳۰ تا ۸۰ sccm [۷]



شکل ۱۴- تغییرات مقاومت سطحی لایه‌های TaN ننگه داشته‌شده در دماهای ۸۵، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان تخریب ۵۰۰ ساعت [۷]

جدول ۱- تغییرات مقاومت سطحی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم در آهنگ‌های شار گاز مختلف [۷]

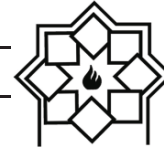
آهنگ شار نیتروژن (sccm)	۳۰	۴۰	۶۰	۸۰
مقاومت سطحی ($\Omega/\text{sq.}$)	654 ± 70	413 ± 46	364 ± 34	560 ± 63



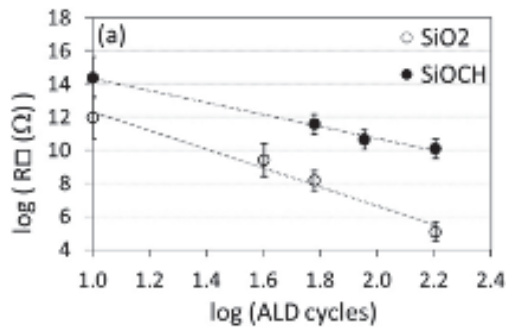
شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم در دمای رشد (a) دمای اتاق، (b) 150°C ، (c) 250°C و (d) 250°C .

۳-۳- خواص الکتریکی

جدول ۱ انحراف استاندارد مقاومت سطحی را با توجه به تغییر در حجم کل گاز (۳۰-۸۰ sccm) نشان می‌دهد [۷]. بر اساس این گزارش تغییرات TCR نیز همان روند مقاومت سطحی را نشان می‌دهد. این گروه از محققان به این نتیجه رسیدند که لایه‌های نیتريد تانتالیوم تولید شده با آهنگ شار کل گاز ۶۰ sccm دارای بهترین ویژگی‌ها از جمله کم‌ترین انحراف در مقاومت سطحی و TCR به دلیل سطح صاف با زبری ۲/۳۷ نانومتر و اندازه دانه کوچک برابر با ۷/۵۷ نانومتر هستند. بررسی پایداری حرارتی لایه‌های نیتريد تانتالیوم در دماهای مختلف و به مدت ۵۰۰ ساعت (شکل ۱۴) نشان‌دهنده تغییرات مقاومت سطحی لایه‌ها به ترتیب برابر ۱/۴٪، ۱/۹٪ و ۳/۴۶٪ با افزایش دمای بازپخت بود. یک تغییر غیرخطی

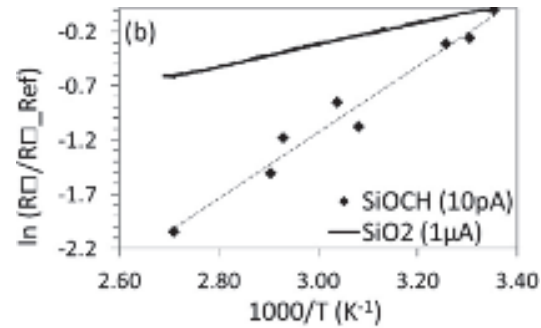


Ta-N-Al (0/0.64) برابر مقاومت Ta-N-Al (0/0.176) تحت ۲۰٪ نیتروژن به ar بود. مقاومت الکتریکی لایه‌های نیتروژن به ar تهیه شده با جریان‌های مختلف نیتروژن (شکل ۱۷) نشان داد که مقاومت نیتروژن به ar بالاتر از مقاومت تانتالیوم خالص است که در جریان نیتروژن صفر مشاهده می‌شود. معرفی نیتروژن باعث افزایش مقاومت می‌شود؛ اولاً به صورت خطی تغییر می‌کند و لایه نازک‌تر مقاومت کم‌تری دارد. روند افزایش مقاومت را می‌توان به کاهش فاز Ta با مقاومت کم در لایه‌های Ta-N رسوب کرده و به افزایش فاز نیتروژن به ar غنی از نیتروژن با مقاومت کم نسبت داد [۱۵].

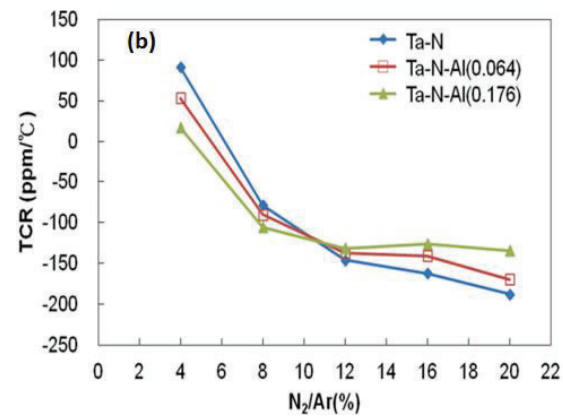
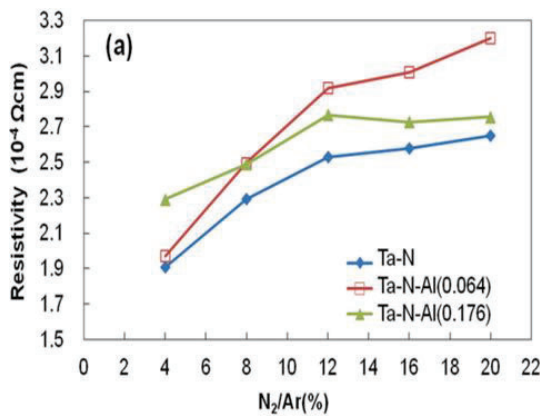


نتایج اندازه‌گیری‌های الکتریکی نمونه‌ها در دمای اتاق و پس از ۱۶۰ چرخه ALD (شکل ۱۵) نشان می‌دهد که صرف‌نظر از چرخه ALD، لایه‌های نیتريد تانتالیوم جایگذاری شده روی SiO₂ همیشه چندین مرتبه رساناتر از لایه مربوطه روی سطح SiOCH هستند [۱۱].

شکل ۱۶ مقاومت لایه‌های Ta-N، Ta-N-Al (0/0.64) و Ta-N-Al (0/0.176) تهیه شده تحت مقادیر مختلف N₂/ar را نشان می‌دهد [۹]. TCR برای همه لایه‌های نازک به نسبت نیتروژن به ar مقاومت افزایش و TCR کاهش یافت. مقاومت Ta-N-Al (0/0.64) و Ta-N-Al (0/0.176) بالاتر از Ta-N تحت همان نسبت نیتروژن به ar بود. مقاومت لایه نازک



شکل ۱۵ - نتایج اندازه‌گیری‌های الکتریکی الف): مقاومت سطحی برحسب چرخه‌های ALD ب): مقاومت سطحی نرمال شده برحسب دما در لایه‌های با ۱۶۰ چرخه ALD [۱۱]

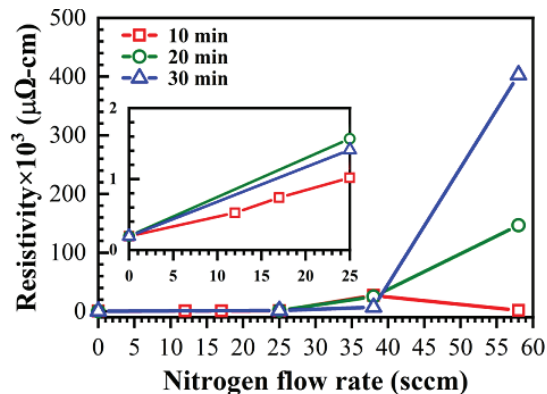


شکل ۱۶ - مقاومت (a) و TCR لایه‌های Ta-N، Ta-N-Al (0/0.64) و Ta-N-Al (0/0.176) تحت مقادیر مختلف N₂/ar [۹]



غیرپیوندی در لایه. مقادیر گاف نواری لایه‌ها (جدول ۲) با افزایش کسر نیتروژن در مخلوط گازهای کندپاش برای هر دو حالت دمای زیرلایه افزایش می‌یابد. در دمای زیرلایه 300°C گاف نواری لایه‌ها کمتر است که نشان‌دهنده نرخ بالاتر پیوند اتم‌های تانتالیوم و نیتروژن در دمای بالای زیرلایه است [۸].

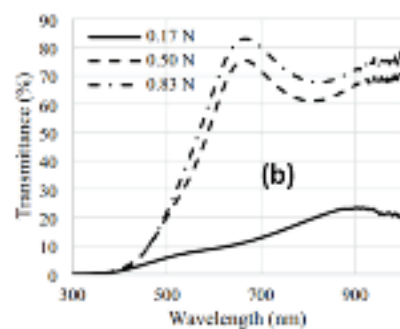
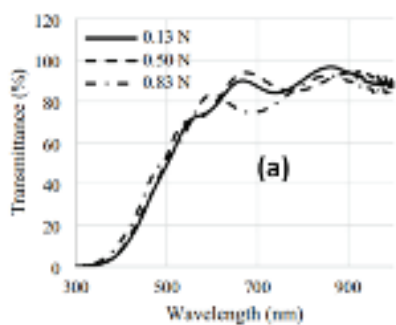
در شکل ۱۹ ضریب شکست (n) و ضریب خاموشی (k) لایه نازک نیتريد تانتالیوم تهیه شده با نرخ جریان نیتروژن ۵۸-۱۲ sccm با داده‌های دو گزارش دیگر مقایسه می‌شود. مشخص شد که وقتی نرخ جریان نیتروژن ۱۲ و ۱۷ sccm باشد، n و k لایه نیتريد تانتالیوم به مقادیر دیگر گزارش‌ها نزدیک است. اما با افزایش نرخ جریان نیتروژن، از مقادیر آن‌ها فاصله می‌گیرد [۱۵]. تاثیر نرخ جریان نیتروژن بر طیف عبوری و بازتابی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم رشد یافته به روش کندپاش مگنترون DC در شکل ۲۰ نشان داده شده است [۲۶].



شکل ۱۷- مقاومت لایه TaN در جریان نیتروژن مختلف [۱۵]

۳-۴- خواص اپتیکی

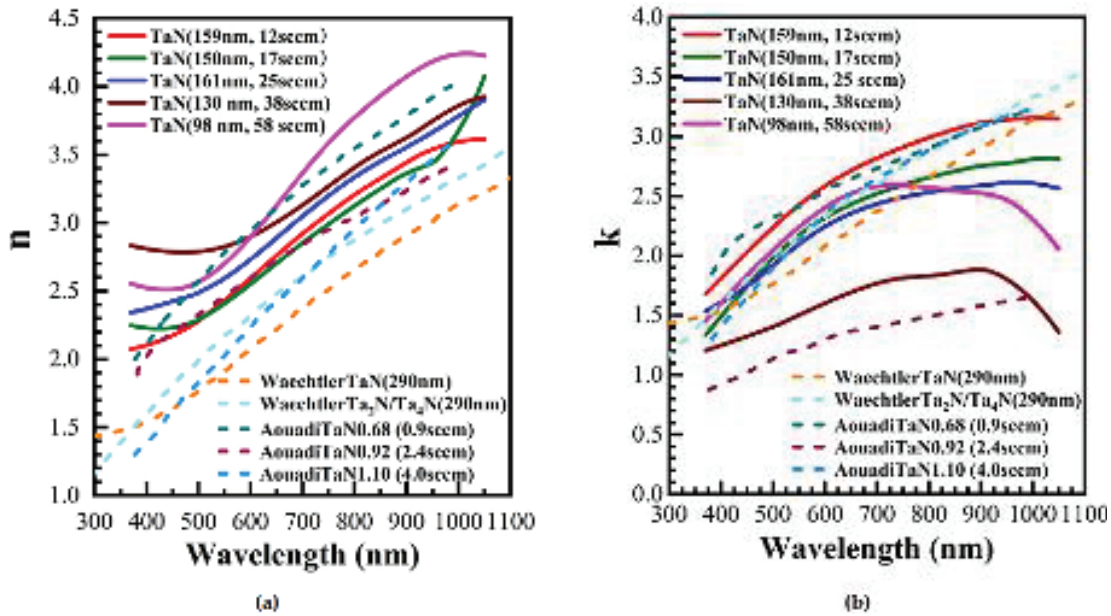
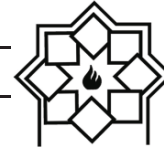
طیف عبور اپتیکی لایه‌های نازک نیتروژن به ar تهیه شده به روش کندپاش در شکل ۱۸ نشان می‌دهد که عبور در محدوده ۳۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر افزایش می‌یابد. برای حالت بدون حرارت‌دهی زیرلایه، نمونه‌های با کسر نیتروژن پایین کمترین عبور را دارند، یعنی جذب بالاتر به دلیل محتوای فلز تانتالوم



شکل ۱۸- عبور لایه‌های نیتريد تانتالیوم در مقادیر مختلف کسر نیتروژن (a) بدون دمای زیرلایه و (b) دمای زیرلایه 300°C [۸]

جدول ۲- گاف نواری لایه‌ها [۸]

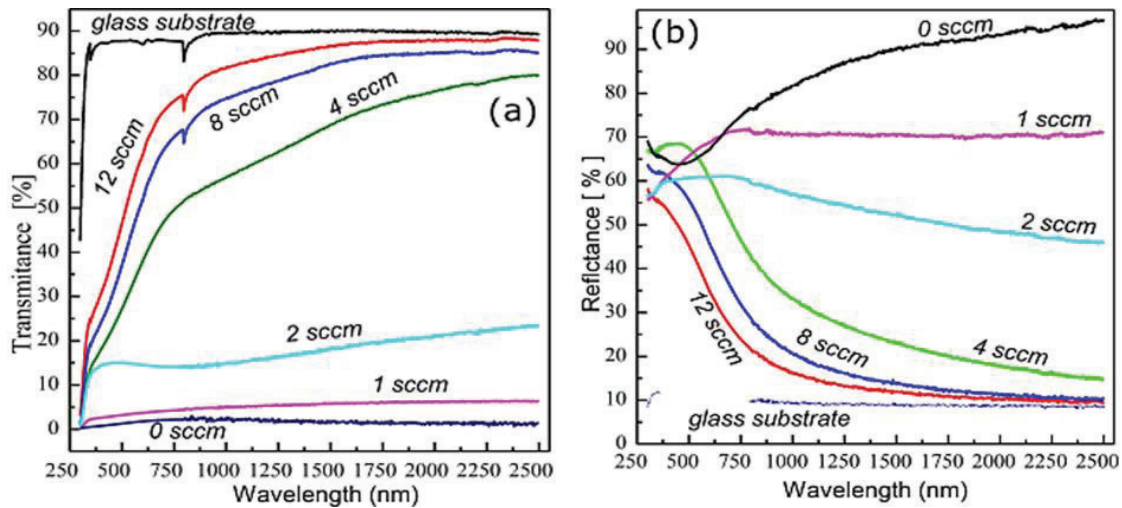
دمای زیرلایه 300°C		بدون حرارت‌دهی زیرلایه	
گاف نواری (eV)	کسر N	گاف نواری (eV)	کسر N
1.62 ± 0.02	۰/۱۷	2.02 ± 0.02	۰/۱۳
1.75 ± 0.02	۰/۵	2.05 ± 0.02	۰/۵
1.77 ± 0.02	۰/۸۳	2.10 ± 0.02	۰/۸۳



شکل ۱۹- ضریب شکست (n) و ضریب خاموشی (k) لایه‌های نیتريد تانتالیوم (۵۸-۱۲) [۱۵]

افزودن نیتروژن باعث افزایش عبور می‌شود. بالاترین عبور مربوط به پوشش‌هایی با مقدار جریان نیتروژن بالاتر (۱۲ sccm) است که از حدود ۲۵ درصد در ناحیه فرا بنفش و مرئی تا حدود ۷۵ درصد در مادون قرمز متغیر است و برای طول موج‌های بالاتر به بیش از ۸۵ درصد می‌رسد.

لایه تانتالوم خالص در محدوده ۲۶۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر غیرشفاف است. جذب بیش از ۲۰ درصد در این گستره نشان می‌دهد و فراتر از ۱۵۰۰ نانومتر بازتاب بالایی دارد. نمونه‌های تهیه شده با جریان گاز ۱ و ۲ sccm عبور کمتری دارند که نشان‌دهنده رفتاری مشابه با نمونه‌های فلزی است.



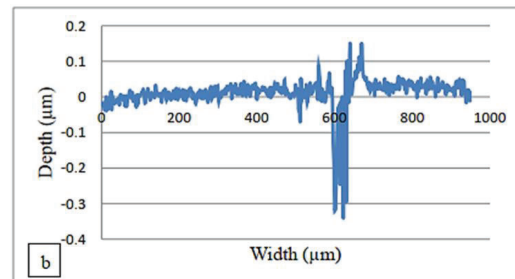
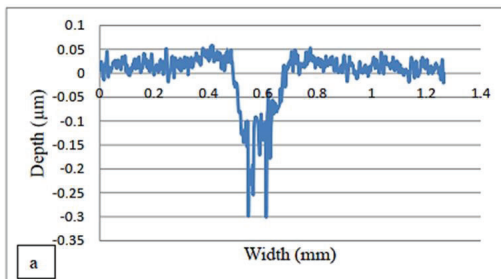
شکل ۲۰- (a) عبور و (b) بازتاب لایه نازک نیتريد تانتالیوم تحت جریان نیتروژن مختلف [۲۶]



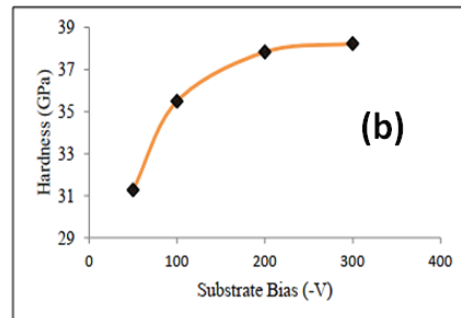
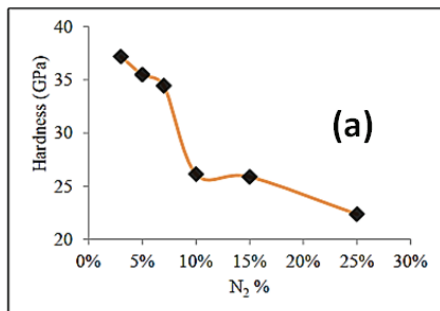
۳-۵- خواص مکانیکی و تریبولوژیکی

تاکنون کار زیادی در زمینه توصیف تریبولوژیکی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم انجام نشده است. چنین تحلیلی به منظور ایجاد یک پوشش سخت و مقاوم در برابر سایش مهم است. در یک کار تحقیقاتی مشخص شد که نرخ سایش پوشش نیتريد تانتالوم بین ۱۴ و $62 \text{ mm}^3 \text{ N mm}^{-1}$ در مقایسه با نرخ سایش پوشش قلع که برابر $220 \text{ mm}^3 \text{ N mm}^{-1}$ می‌باشد، کوچک است [۱۲]. نتایج آزمایش پین روی دیسک بر روی لایه‌های TaN (شکل ۲۱) که در بایاس بستر ۱۰۰- ولت، دمای 550°C ، توان ۵۰ وات به هدف Ta و با دو مقدار مختلف ۳٪ و ۵٪ نیتروژن انجام شد، نشان داد که لایه تهیه شده با ۵ درصد نیتروژن، مسیر سایش بسیار گسترده‌تر از مسیر سایش لایه با ۳ درصد نیتروژن بود [۲۷-۴۴].

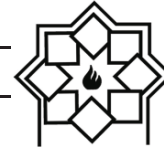
تاثیر میزان نیتروژن و ولتاژ بایاس بستر بر روی سختی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم در شکل ۲۲ نشان داده شده است [۲۷]. مشاهده می‌شود که سختی لایه‌ها با کاهش نیتروژن در حال افزایش است (شکل ۲۲a). وقتی درصد نیتروژن از ۲۵٪ به ۱۰٪ در بایاس بستر ۱۰۰- ولت کاهش می‌یابد، سختی در محدوده ۲۰-۲۶ گیگاپاسکال است. کاهش بیش‌تر درصد نیتروژن، منجر به غالب شدن فازهای سخت می‌شود به نظر می‌رسد که فاز ارتورومبیک Ta₄N باید در کنار سایر فازها به سختی این لایه کمک کند زیرا فاز ارتورومبیک یکی از فازهای سخت نیتريد تانتالیوم با سختی نظری ۶۰ گیگاپاسکال است. با افزایش ولتاژ بایاس بستر از ۱۰۰- ولت تا ۳۰۰- ولت، سختی لایه افزایش یافت که نشان‌دهنده تشکیل فازهای سخت Ta₄N ارتورومبیک و Ta₂N شش‌ضلعی با افزایش بایاس است.



شکل ۲۱- نمایش دوبعدی مسیر سایش لایه TaN (a) با ۵٪ N₂ و (b) با ۳٪ N₂ [۲۷]



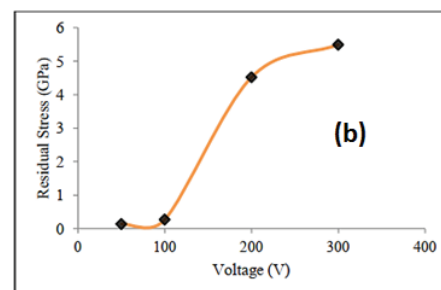
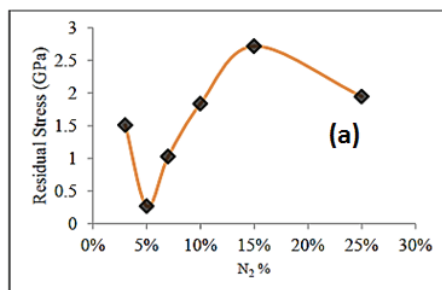
شکل ۲۲- تاثیر تغییر (a) محتوای نیتروژن و (b) ولتاژ بایاس بستر بر روی سختی لایه‌های نیتريد تانتالیوم [۲۷]



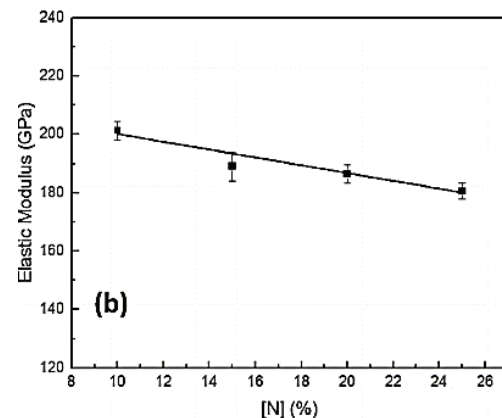
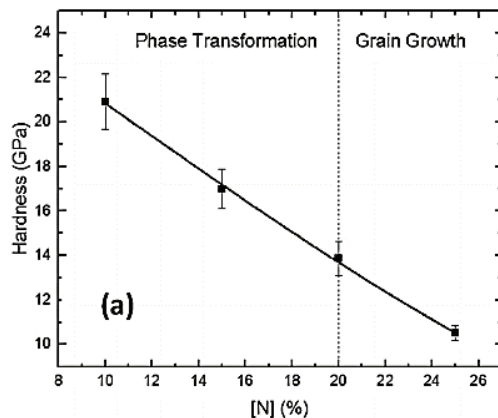
بستر، نرخ رسوب لایه کاهش یافت. کاهش ضخامت با افزایش بایاس بستر می‌تواند دلیلی برای افزایش تنش پسماند باشد. انرژی اضافی به دلیل بایاس زیاد، به نفع جهت‌گیری خاصی از اتم‌ها است که در حالت عادی ممکن نیست. این به تنش پسماند تبدیل می‌شود و انحنا پس از رسوب در لایه‌ها ایجاد می‌شود [۴۵-۵۳].

در یک کار پژوهشی، سختی و مدول الاستیک لایه‌های نیتريد تانتالوم با استفاده از منحنی‌های نیرو-جابجایی محاسبه و تغییرات آن‌ها به عنوان تابعی از غلظت نیتروژن در شکل ۲۴ نشان داده شده است [۵]. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت جریان نیتروژن از ۱۰٪ به ۲۵٪، سختی لایه‌ها از حدود ۲۲ گیگاپاسکال به حدود ۱۰ گیگاپاسکال و مدول الاستیک نمونه‌ها از ۲۰۲ گیگاپاسکال به ۱۸۰ گیگاپاسکال کاهش می‌یابد. این رفتار می‌تواند مربوط به تغییر فاز باشد. گزارش شده است که سختی و مدول الاستیک فازهای نیتريد تانتالیوم به ترتیب زیر کاهش یافته است: فاز شش‌ضلعی Ta₂N بالاتر از ε-TaN تا δ-TaN است. سختی و مدول یانگ TaN₁₀ به دلیل ساختار فاز شش‌ضلعی غالب Ta₂N بالاتر از TaN₁₅ است. سپس تشکیل ε-TaN و δ-TaN به ترتیب باعث کاهش سختی و مدول الاستیک TaN₁₅ و Tan₂₀ می‌شود.

شکل ۲۳ تاثیر میزان نیتروژن و ولتاژ بایاس بستر بر روی تنش پسماند لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم را نشان می‌دهد [۲۷]. پس از رسوب لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم، بر روی ویفرهای سیلیکونی، به دلیل تنش پسماند، مقداری انحنا ایجاد می‌شود. با توجه به شکل ۲۳a، به نظر می‌رسد که کاهش اولیه جزئی در مقادیر تنش پسماند محاسبه شده تجربی وجود دارد که از ۳٪ تا ۵٪ نیتروژن شروع می‌شود. این ممکن است به دلیل مخلوط فازهای موجود در فیلم در ۵٪ نیتروژن باشد که تنش‌های پسماند موجود را کاهش می‌دهد، در مقایسه با فیلم با ۳٪ نیتروژن، که در آن فقط فازهای سخت وجود داشت. با این حال، روند پس از ۵٪ نیتروژن نشان می‌دهد که، با افزایش درصد نیتروژن، تنش پسماند تا ۱۵٪ در حال افزایش است. افزایش تنش پسماند با افزایش نیتروژن را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که مقدار کم‌تر نیتروژن به معنای نیتروژن کم‌تر در فضاهای بینابینی و در نتیجه تنش پسماند فشاری کم‌تر است. تنش پسماند برای بایاس زیر لایه ۵۰- و ۱۰۰- ولت بسیار شبیه است و سپس با افزایش بایاس بستر افزایش می‌یابد. تنش پسماند توسط استوکیمتری، فاز، ضخامت لایه و شرایط رسوبی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. افزایش تنش پسماند با بایاس را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که با افزایش بایاس



شکل ۲۳- تاثیر تغییر (a) محتوای نیتروژن و (b) ولتاژ بایاس بستر بر روی تنش پسماند لایه‌های نیتريد تانتالیوم [۲۷]



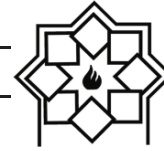
شکل ۲۴- (a) تغییر سختی و (b) مدول الاستیک لایه‌های نیتريد تانتالوم با نسبت جریان نیتروژن [۵]

لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سختی، مقاومت در برابر سایش و پایداری شیمیایی آن‌ها را نشان می‌دهد. الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک تهیه شده با مقادیر مختلف کسر نیتروژن را که به روش کندیپاش تهیه شده‌اند، با هدف شناسایی آهنگ شار گاز بهینه و بررسی اندازه بلورکها مطالعه شده است. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم پس از ۱۶۰ چرخه ALD نشان می‌دهد که از جزایر نانومقیاس تشکیل شده و به طور کامل و پیوسته سطح را می‌پوشانند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های نیتريد تانتالوم تهیه شده با کسرهای مختلف نیتروژن و در حالت بدون حرارت‌دهی زیر لایه نشان می‌دهد لایه‌ها حاوی برجستگی‌های کروی شکل از دانه‌های نامنظم گل کلم مانند هستند. دانه‌ها وقتی که کسر گاز نیتروژن کم است، نسبتاً بزرگ هستند و ناهمواری سطح نیز بالاست. با افزایش کسر نیتروژن، دانه‌ها یکنواخت‌تر و سطح لایه‌ها صاف‌تر می‌شوند. با افزایش ولتاژ بایاس اندازه ستونی و دانه‌ای کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکاف‌ها در حال تخریب هستند و ساختار پوشش با افزایش

اگر چه سختی TaN25 کم‌تر از TaN20 است، مدول الاستیک تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد. از آنجایی که ساختار فاز لایه نازک TaN20 مشابه TaN25 است، کاهش سختی ممکن است به رشد دانه مرتبط باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نیتريد تانتالیوم (TaN) در سال‌های اخیر به دلیل خواص منحصر به فرد و کاربردی در علوم پایه، علوم پزشکی و همچنین صنایع الکترونیک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله مروری آخرین پیشرفت‌های تحقیقاتی در زمینه تهیه، مشخصه‌یابی و خواص و کاربردهای لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم ارائه شده است. به این منظور، روش‌های مختلف لایه‌نشانی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. خواص ساختاری و میکروسکوپی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم با استفاده از نتایج آنالیزهای مختلف بررسی شده است. بررسی خواص الکتریکی و اپتیکی لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم، پتانسیل آن‌ها برای استفاده در دستگاه‌های الکترونیکی و فوتونیکی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، خواص مکانیکی و تریبولوژیکی

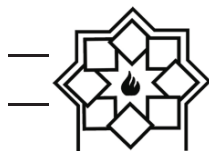


- [3]. Nurlaela, Ela, Ahmed Ziani, and Kazuhiro Takanabe. "Tantalum nitride for photocatalytic water splitting: concept and applications." *Materials for Renewable and Sustainable Energy* 5 (2016): 1-21.
- [4]. D. Bernoulli, U. Müller, M. Schwarzenberger, R. Hauert, R. Spolenak, Magnetron sputter deposited tantalum and tantalum nitride thin films: An analysis of phase, hardness and composition. *Thin Solid Films*, 2013. 548: p. 57–161.
- [5]. Firouzabadi, S. S., et al. "Effect of nitrogen flow ratio on nano-mechanical properties of tantalum nitride thin film." *Journal of Alloys and Compounds* 719 (2017): 63-70.
- [6]. Demirskiy, D., O. Vasylykiv, and K. Yoshimi. "Allotropic strengthening and in situ phase transformations during ultra-high-temperature flexure of bulk tantalum nitride." *Materials Science and Engineering: A* 826 (2021): 141954.
- [7]. Ik-Soo Kim, Myung-Yeon Cho, Dong-Won Lee, Pil-Ju Ko, Weon Ho Shin, Chulhwan Park, Jong-Min Oh, "Degradation behaviors and failure of magnetron sputter deposited tantalum nitride." *Thin Solid Films* 697 (2020) 137821.
- [8]. Md Maidul Islam and Daniel G. Georgiev, "Reactive sputtering deposition and characterization of Ta-N thin films" *MRS Advances* (2022) 7:523–527.
- [9]. Kao-Yuan Wang, Ting-Chang Chang, Wen-Chung Chen, Yong-Ci Zhang, Yi-Ting Tseng, Chih-Cheng Yang, Chun-Chu Lin, Pei-Yu Wu, Yung-Fang Tan, Tsung-Ming Tsai, "Influences of aluminum doping on the microstructures and electrical properties of tantalum nitride thin films before and after annealing" *Vacuum* 197 (2022) 110791.
- [10]. Chen, Xiaomeng, et al. "Low-temperature chemical vapor deposition of tantalum nitride from tantalum pentabromide for integrated circuitry copper metallization

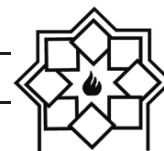
ولتاژ بایاس فشرده می‌گردد. مقاومت الکتریکی لایه‌های تهیه شده با جریان‌های مختلف نیتروژن نشان می‌دهد که مقاومت نیتريد تانتالیوم بالاتر از مقاومت Ta خالص است (که در جریان نیتروژن صفر مشاهده می‌شود). طیف عبور اپتیکی لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم تهیه شده به روش کندوپاش حاکی از آن است که برای حالت بدون حرارت‌دهی زیرلایه، نمونه‌های با کسر نیتروژن پایین کم‌ترین عبور را دارند، یعنی جذب بالاتر به دلیل محتوای فلز تانتالوم غیرپیوندی در لایه. همچنین نتایج نشان می‌دهد، سختی لایه‌ها با کاهش نیتروژن در حال افزایش است. پس از رسوب لایه‌های نازک نیتريد تانتالیوم، بر روی ویفرهای سیلیکونی، به دلیل تنش پسماند، مقداری انحنای ایجاد می‌شود. افزایش تنش پسماند با افزایش نیتروژن را می‌توان به این صورت شرح داد که مقدار کم‌تر نیتروژن به معنای نیتروژن کم‌تر در فضاهای بینابینی و در نتیجه تنش پسماند فشاری کم‌تر است. با افزایش نسبت جریان نیتروژن، سختی لایه‌ها و مدول الاستیک نمونه‌ها کاهش می‌یابند که این رفتار می‌تواند مربوط به تغییر فاز باشد. روی هم رفته، از نتایج و مطالعات مقاله مروری حاضر در بهینه‌سازی خواص لایه‌های نازک نیتريد تانتالوم برای کاربردهای متنوع در علوم و صنایع مختلف می‌تواند بهره گرفته شود.

مراجع

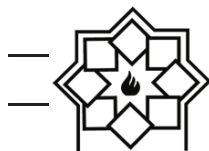
- [1]. Liu, X., et al., Effect of deposition and annealing temperature on mechanical properties of TaN film. *Applied Surface Science*, 2011. 258(3): p. 1033-1037.
- [2]. Wang, Hao, et al. "Transition metal nitrides for electrochemical energy applications." *Chemical Society Reviews* 50.2 (2021): 1354-1390.



- Conference, 2010, pp. 923–924.
- [19]. J. Nazon, J. Sarradin, V. Flaud, J.-C. Tedenac, N. Fréty, "Effects of processing parameters on the properties of tantalum nitride thin films deposited by reactive sputtering" *J. Alloy. Compd.* 464, 526 (2008).
- [20]. N. arshi, J. Lu, Y.K. Joo, J.H. Yoon, B.H. Koo, "Effects of nitrogen composition on the resistivity of reactively sputtered TaN thin films" *Surf. Interface Anal.* 47, 154 (2015).
- [21]. W.-H. Lee, J.-C. Lin, C. Lee, "Characterization of tantalum nitride films deposited by reactive sputtering of Ta in N₂/Ar gas mixtures" *Mater. Chem. Phys.* 68, 266 (2001).
- [22]. J.A. Thornton, "The microstructure of sputter-deposited coatings" *J. Vac. Sci. Technol. A Vac. Surf. Films* 4, 3059 (1986).
- [23]. I. Petrov, P. Barna, L. Hultman, J. Greene, "Microstructural evolution during film growth" *J. Vac. Sci. Technol. A Vac. Surf. Films* 21, S117 (2003).
- [24]. Dai, Wei, and Yunzhan Shi. "Effect of bias voltage on microstructure and properties of tantalum nitride coatings deposited by RF magnetron sputtering." *Coatings* 11.8 (2021): 911.
- [25]. Hantehzadeh, M. R., et al. "The effect of temperature on the structure of tantalum nitride (TaN) thin films deposited by DC plasma." *Journal of fusion energy* 31 (2012): 84-88.
- [26]. Cherfi, D. E., et al. "Effects of Nitrogen Flow Rate on the Structural, Morphological and Optical Properties of TaN Thin Films Grown by the DC Magnetron Sputtered Technique." *Acta Physica Polonica, A.* 136.6 (2019).
- [27]. Zaman, Anna. Characterization of tantalum nitride thin films synthesized by magnetron sputtering. The University of Texas at arlington, 2014.
- [28]. L.R Shen, et.al," Document details-Facile preparation and upconversion luminescence of graphene quantum dots", applications." *Journal of materials research* 14.5 (1999): 2043-2052.
- [11]. Fabien Volpi, Lionel Cadix, Gregory Berthomé, Stéphane Coindeau, Thierry Encinas, Nicolas Jourdan, Elisabeth Blanquet, "Impact of silica-substrate chemistry on tantalum nitride thin films deposited by atomic layer deposition: microstructure, chemistry and electrical behaviors." *Thin Solid Films* 669, 2019, 392-398.
- [12]. Babaei, Kazem, et al. "Surface characterization and electrochemical properties of tantalum nitride (TaN) nanostructured coatings produced by reactive DC magnetron sputtering." *Surfaces and Interfaces* 21 (2020): 100685.
- [13]. D. Bernoulli, U. Muller, M. Schwarzenberger, R. Hauert, R. Spolenak, Magnetron sputter deposited tantalum nitride thin films: an analysis of phase, hardness and composition, *Thin Solid Films* 548 (2013) 157–161.
- [14]. T. Zhou, D. Liu, Y. Zhang, T. Ouyang, J. Suo, "Microstructure and hydrogen impermeability of titanium nitride thin films deposited by direct current reactive magnetron sputtering." *J. Alloys. Compd.* 688 (2016) 44–50.
- [15]. Hu, Yingying, et al. "Influence of N₂ Flows on Sputtered Ta (N) films: Electrical, Structural, Chemical and Optical Properties." (2021).
- [16]. V. Davydov, Adsorption on Silica Surfaces, in: Eugène Papirer (Ed.), Adsorption on Silica Surfaces, CRC Editions, 2000, pp.63-118.
- [17]. F. Mazen, T. Baron, G. Brémond, N. Buffet, N. Rochat, P. Mur, M. N. Séméria, Influence of the Chemical Properties of the Substrate on Silicon Quantum Dot Nucleation, *J. Electrochem. Soc.*, 150 (2003) G203-G208.
- [18]. J. Yang, B. Liu, Y. Wang, K. Xu, "Kinetic surface roughening of TaN thin films sputtered at different N₂/ar flow ratios", 3rd International Nanoelectronics



- [39]. A.H. Ramezani, et.al, "Corrosion resistance modification of AISI 304 stainless steel using argon ion bombardment", *Journal of Fusion Energy*, 30(1), (2011) pp.64–67.
- [40]. S. Hoseinzadeh, et.al, "The injection of Ag nanoparticles on surface of WO₃ thin film: enhanced electrochromic coloration efficiency and switching response", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(19), (2017) 14855-63.
- [41]. S. Hoseinzadeh, et.al, "n-type WO₃ semiconductor as a cathode electrochromic material for ECD devices". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 28(19), (2017) 14446-52.
- [42]. S. Hoseinzadeh, et.al, "Effect of Post-annealing on the Electrochromic Properties of Layer-by-Layer arrangement FTO-WO₃-Ag-WO₃-Ag", *Journal of Electronic Materials*, 47(7), (2018) 3552-9.
- [43]. S. Hoseinzadeh, et.al, "Tantalum/Nitrogen and n-type WO₃ semiconductor/FTO Structures as a Cathode for the Future of Nanodevices", *J. Nanostructure*, 9(2), (2019) 276-286.
- [44]. A.H. Ramezani, et.al, "Statistical and fractal analysis of nitrogen ion implanted tantalum thin films". *Appl. Phys. A*, 126, (2020), 48130.
- [45]. W. Dai, Y. Shi, *Coatings* 11, 911 (2021).
- [46]. I.-S. Kim, M.-Y. Cho, D.-W. Lee, P.-J. Ko, W.H. Shin, C. P.J.-M. Oh, *Thin Solid Films* 697, 137821 (2020).
- [47]. D. Cherf, M. Guemmaz, M. Bourahli, M. Ouadfel, S. Maabed, *Acta Phys. Pol. A* 136, 849–854 (2019).
- [48]. Ma, Q.; Shi, X.; Bi, L.; Li, J.; Zhou, Q.; Zhu, B. Influence of the deposition temperature on the optical and electrical properties of TiN film by spectroscopic ellipsometry. *Superlattices Microstruct.* 2021, 151, 106815, 458.
- [49]. Johs, B.D.; Hale, J.; Ianno, N.J.; Herzinger, C.M.; Tiwald, T.E.; Woollam, J.A. Recent developments in spectroscopic ellipsometry for in situ Sur. Coat. Tech. 196, (2005) 349.
- [29]. Y.Z. Liu, et.al, "Phase formation in nitrogen ion implanted Ti–Al–Zr alloy and modification of corrosion property", *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 237, (2005) 543.
- [30]. N.Kalyanasundaram, et.al, "Stress evolution due to medium-energy ion bombardment of silicon", *Acta Mater.*, 54, (2006) 483–491.
- [31]. Y.Z Liu, et.al, "Phase formation in nitrogen ion implanted Ti-Al-Zr alloy and modification of corrosion property". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, 237, (2005) 543–549.
- [32]. I. Betlej, et.al, "settings Effect of Cu, Zn and Ag Ion Implantation on the Surface Modification of Bacterial Cellulose Films," *Coatings*, 13(2), (2023) 254.
- [33]. S. S. Patila, et.al, "Corrosion resistance study of argon implanted and ion-beam-mixed 316 SS", *Surf. Coat. Technol.* 196, (2005) 284.
- [34]. Ch. Wang, et.al, "Thin film transfer for the fabrication of tantalum nitride photoelectrodes with controllable layered structures for water splitting", *Chem Sci*, 7, (2016) 5821.
- [35]. Zh. Dou, et.al, "Effect of Low-Energy Nitrogen Ion Implantation on Friction and Wear Properties of Ion-Plated TiC Coating", *Coatings*, 11(7), (2021) 775.
- [36]. Zh-H. Cui, et.al, "[Theoretical Investigation of Ta₂O₅, TaON, and Ta₃N₅: Electronic Band Structures and Absolute Band Edges](#)", *J. Phys. Chem. C*, 121, (017) 3241–3251.
- [37]. A.H. Ramezani, et.al, "Structural modification of tantalum crystal induced by nitrogen ion implantation", *Bulletin of Materials Science*, 39(3), (2016) 633–640.
- [38]. A.H. Ramezani, et.al, "Microstructure and corrosion resistance of tantalum after nitrogen ion implantation", *Corrosion Engineering Science and Technology*, 51(6), (2016) 393–399.



- applications.; Duparare, A., Singh, B., Eds.; 2001; pp. 41–57. 461.
- [50]. Cherfi, D.E.; Guemmaz, M.; Bourahli, M.E.H.; Ouadfel, M.A.; Maabed, S. Effects of Nitrogen Flow Rate on the Structural, 462 Morphological and Optical Properties of TaN Thin Films Grown by the DC Magnetron Sputtered Technique. *Acta Phys. Pol.* 463A 2019, 136, 849–854, doi:10.12693/APhysPolA.136.849. 464.
- [51]. Xu, H.; Hu, Z.-J.; Qu, X.-P.; Wan, H.; Yan, S.-S.; Li, M.; Chen, S.-M.; Zhao, Y.-H.; Zhang, J.; Baklanov, M.R. Effect of 465 thickness scaling on the permeability and thermal stability of Ta(N) diffusion barrier. *Appl. Surf. Sci.* 2019, 498, 143887, 466.
- [52]. Shamiryan, D.; Baklanov, M.R.; Maex, K. Diffusion barrier integrity evaluation by ellipsometric porosimetry. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* 2003, 21, 220,.

Layering Methods and Properties of Tantalum Nitride Thin Layers: A Review

A. H. Ramezani¹, A. H. Sari², R. S. Yousef Karizi³

¹ Department of Physics, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Physics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Department of Material Engineering, College of Engineering, University of Basrah, Basrah, Iraq

* ramezani.wtiau1400@gmail.com

Abstract: Tantalum nitride (TaN) is widely used in mechanical and microelectronic industries due to its unique properties such as high hardness and high we are resistance as well as stable electrical resistance. Considering the its importance in this paper, taking into account the reliable references, a comprehensive review of research developments in the field of layer identification methods, characterization methods, properties and applications of TaN thin films has been carried out. For this purpose, firstly, the production and deposition of these thin layers have been studied by methods such as physical deposition (PVD), DC and RF magnetron sputtering. In addition, the structural, microscopic, electrical, optical, mechanical and tribological properties of thin layers of tantalum nitride have been comprehensively discussed. For this purpose, by analyzing X-ray diffraction patterns, atomic force microscope, scanning electron microscope, calculating the we arrate of the layers, the effect of changing the nitrogen content of the substrate bias voltage on the residual stress of the layers, changing the hardness and elastic modulus of the tantalum nitride layers with the current ratio Nitrogen, refractive index and extinction coefficient of layers, optical transmission spectrum of layers, electric resistance of layer in different nitrogen flow, surface resistance normalized according to temperature and changes of surface resistance of layers kept at different temperatures have been investigated in detail. The reviewed results show that the produced thin layers have a high potential for application in various fields, especially in harsh environments with high temperature and pressure. This review Article can be a suitable and comprehensive reference for the research that will be done in the field of TaN thin films and related technologies.

Keywords: Tantalum Nitride, Implantation, Thin layer, Structural properties.