



تغییرات خصوصیات سطح لایه نازک اکسید مس ناشی از کاشت یون نیتروژن

ابراهیم غلامی حاتم* و میترا فلاحزاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده: در این پژوهش، به بررسی اثر کاشت یون نیتروژن بر ساختار کریستالی و سطحی فیلم نازک اکسید مس پرداخته شده است. بدین منظور لایه نازک به ضخامت ۱۵۰ nm به روش کندوپاش از جنس اکسید مس بر زیر لایه سیلیکون لایه‌نشانی شد. سپس، عمل کاشت یون نیتروژن با استفاده از شتابدهنده الکترواستاتیک با انرژی ۵۰ keV به مدت ۳ ثانیه و با شار 2×10^{14} ذره بر سانتی-متر مربع انجام شد. جریان اندازه‌گیری در این آزمایش با استفاده از دستگاه نمایه‌سنج و براش آن به تابع گاوسی در حد چند میلی-آمپر به دست آمد. از نتایج آنالیزهای حاصل از XRD مشاهده شد که تعداد قله‌ها و ساختار بلوری تغییر کرده است. نتایج آنالیز SEM به هم ریختن ساختار سطحی بر اثر کاشت را نشان می‌دهد و همچنین، از اندازه‌گیری پارامترهای ناهمواری AFM مشخص شد که لایه نازک اکسید مس پس از کاشت یون یکنواخت‌تر شده و ناهمواری یا زمختی آن کاهش پیدا کرده است. با اندازه‌گیری گاف انرژی اکسید مس مشخص شد که پس از کاشت یون مقدار آن از ۲/۲۶ eV به ۲/۳۴ eV افزایش پیدا کرده است که می‌توان برای ساخت انواع حسگرها گاف انرژی آنرا تغییر داد.

واژگان کلیدی: اکسید مس، کاشت یون، گاف انرژی

*e.gholami@malayeru.ac.ir

مغناطیسی به موازات سطح کاتد اعمال می‌شود که باعث می‌شود که الکترون‌ها به جای مسیر مستقیم به صورت مارپیچی حرکت کنند و افزون بر اینکه الکترون‌ها پرنرژی‌تر می‌شوند، مسیر بیشتری را طی کرده و اتم‌های بیشتری را یونیزه کنند [۱۰]. افزودن آلایش^۱ فلزی به اکسید مس یک راه برای تولید مواد جدید با ویژگی کاربردی بهبود یافته می‌باشد که همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۱، ۱۲].

فرایند کاشت یون یک فرایند تغییر سطح ماده است که با آن یون‌های ماده در یک میدان الکتریکی تا انرژی (۲۰۰-۱۰ keV) شتاب داده می‌شوند و به سطح جامد برخورد می‌کنند. یونها با انتقال انرژی و اندازه حرکت خود به الکترون‌ها و هسته‌های اتمی

۱- مقدمه

اکسید مس یکی از پرکاربردترین اکسیدهای فلزی و فراوان در طبیعت، با گاف نواری باریک (۲/۵-۱/۱ eV) است که در قالب فیلم نازک، کاربردهای متنوعی مانند حسگرهای گازی، کاتالیست‌ها، سلول‌های خورشیدی و زیستی دارد [۱-۴]. این ماده همچنین، به دلایلی مانند فراوانی ماده اولیه، غیرسمی بودن، تولید آسان و توانایی تغییر و بهینه‌سازی ویژگی فیزیکی آن مورد توجه قرار گرفته است [۵]. همواره روش‌های متعدد فیزیکی و شیمیایی مانند رسوب بخار شیمیایی، افشانه تجزیه حرارتی و غیره برای تهیه این قبیل فیلم‌های نازک وجود داشته است [۶-۹]. متداول‌ترین روش، کندوپاش مغناطیسی است که در آن میدان

^۱ Dopant

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸

زمستان ۱۴۰۰ | شماره ۴ | سال هشتم

۱۴۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷

DOR: 20.1001.1.24235628.1400.8.4.17.2



۱-۲ تهیه لایه نازک اکسید مس

لایه نازک اکسید مس به ضخامت ۱۵۰ nm بر روی زیرلایه سیلیکون به روش کندوپاش مغناطیسی در آزمایشگاه نانوالکترونیک و لایه نازک دانشگاه تهران تهیه شد. سطح صفحات را در محلول استون و الکل به مدت ۱۵ دقیقه کامل شستشو داده شد. پس از خشک شدن کامل، نمونه را بدون تماس دست به وسیله پنس برداشته و بدون تماس مستقیم نمونه داخل محفظه برهم‌کنش برای کاشت یون قرار داده شد.

۲-۲ کاشت یون نیتروژن

دستگاه کاشت یون در آزمایشگاه باریکه یونی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران [۲۱] از یک چنبره‌ی اصلی در پایین، چشمه یونی پنینگ^۷ در بالا و یک ستون عایق متشکل از استخراج باریکه یونی و سیستم شتاب‌دهنده الکترواستاتیک از جنس پلی‌اتیلن به شکل استوانه‌ای تشکیل شده است (شکل ۱). وقتی که باریکه وارد محفظه برهم‌کنش می‌شود، از داخل یک سیستم میدان الکترواستاتیک عبور می‌کند که باریکه را به شکل مربعی بر نمونه هدف جاروب می‌کند. در طول فرایند بمباران، یک فیلامان تنگستن داغ در نزدیکی هدف قرار داده شده است تا از برخورد یون‌های ثانویه با نمونه جلوگیری کند و سطح نمونه خنثی باقی بماند.

ماده مورد نظر، باعث تغییر ترکیبات اصلی هدف شده و تغییرات شیمیایی و فیزیکی در ماده هدف تا عمقی در حدود چند صد نانومتر ایجاد می‌کنند [۱۳].

کاشت یون‌های گازی در قیاس با سایر روش‌های موجود از قبیل تغییر انرژی مواد ناشی از تابش لیزری [۱۴]، جریان زیاد در روش باریکه الکترونی [۱۵]، شار زیاد در فرایند تولید پلاسما [۱۶] یا باریکه‌های یونی قدرتمند [۱۷] مزیت بیشتری برای تغییر ویژگی مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی و حرارتی سطح مواد دارد. مزیت عمده کاشت یون عدم تشکیل مرز مشخص بین سطح تشکیل شده و ماتریس ماده است که از لایه‌لایه‌شدن سطح جلوگیری می‌کند [۱۸]. مشکل عمده روش‌های باریکه یونی و تولید پلاسما بُرد کم یون در ماده است که به کسری از چند میکرومتر بیشتر نمی‌رسد که با افزایش انرژی و بار یون نیز قابل جبران نیست [۱۹]. پیش‌تر، از یون نیتروژن تا عمق حدود صد نانومتر جهت تغییر ویژگی ساختاری و رسانندگی لایه نازک ZnO استفاده شده است [۲۰].

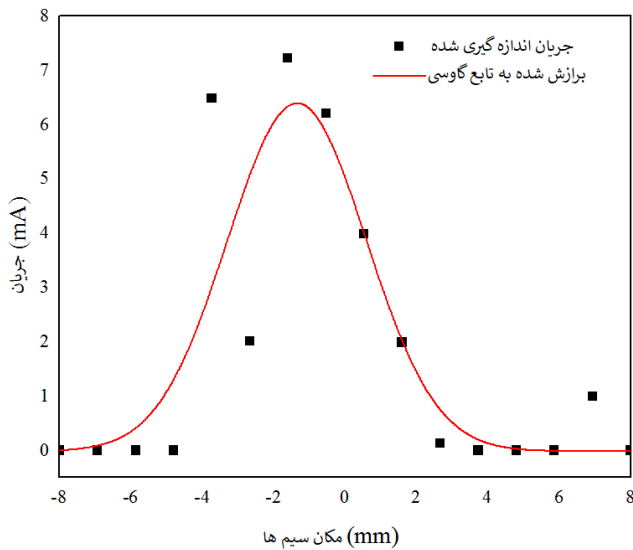
کاشت یون نیتروژن به منظور بهینه‌سازی خصوصیات ساختاری، ناهمواری سطوح و ویژگی نوری ساختار نانو اکسید مس از اهمیت ویژه‌ای در قیاس با ساختار توده‌ای دارد. از این‌رو، در این پژوهش لایه نازک اکسید مس با استفاده از میدان مغناطیسی جریان مستقیم^۲ بر زیر لایه سیلیکون تهیه شد. سطح فیلم نازک با باریکه یون نیتروژن کم انرژی با دستگاه کاشت یون بمباران شد. سپس، اثر کاشت یون نیتروژن بر روی ساختار بلوری، ریخت‌شناسی سطح^۳، ناهمواری سطوح و ویژگی نوری لایه اکسید مس با استفاده از پراش پرتوی ایکس (XRD^۴)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM^۵)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۶) و طیف‌سنجی نور فرابنفش (UV-visible) بررسی شد.

۲-روش آزمایش

^۷ Penning

^۲ DC magnetron
^۳ Morphology
^۴ X-Ray Diffraction
^۵ Atomic Force Microscopy
^۶ Scanning Electron Microscope

به سرعت با باریکه تجزیه شده و به لایه می چسبد و باعث تغییر ویژگی ماده می شود.



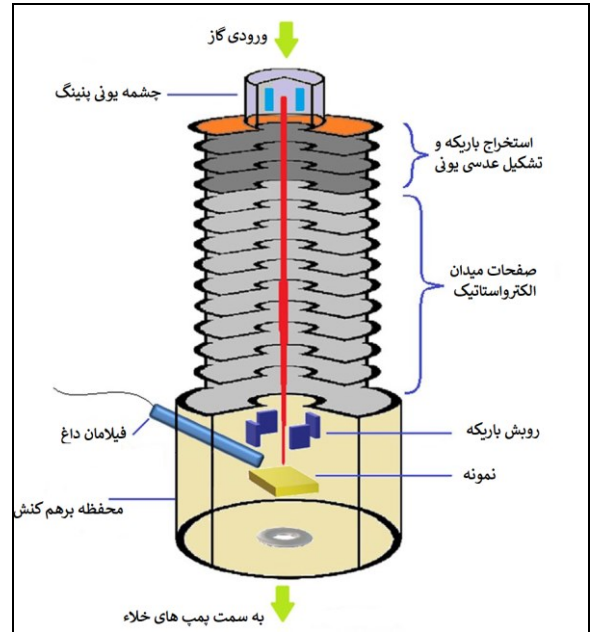
شکل ۲: نمایه عرضی جریان باریکه نیتروژن.

با استفاده از دستگاه نمایه سنج برای اندازه گیری متوسط جریان در یک بازه زمانی معین استفاده شد. این نمایه سنج از هفده سیم هر کدام به قطر 0.4 mm تشکیل شده است که در فاصله 0.5 mm از هم قرار گرفته اند و هر یک از طریق مقاومت $k\Omega$ به زمین متصل شده است. هفدهمین سیم در توری نمایه سنج به زمین متصل است، بنابراین، در اندازه گیری جریان باریکه نقشی ندارد. از طریق اندازه گیری ولتاژ سر مقاومت هر یک از سیم ها نمایه ی باریکه ی یونی به دست می آید. با فرض گوسی بودن نمایه عرضی، باریکه های یونی مورد برازش قرار گرفته است که جریان باریکه مورد استفاده در این پژوهش را در شکل ۲ نمایش می دهد. نمایه جریان باریکه اندازه گیری شده تقریبی متقارن، گوسی و میانگین آن در حد ۶ میلی آمپر بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ساختار بلوری

شرکت پی آنالیتیکال^۹ XRD آنالیز پراش پرتوی ایکس با دستگاه $\lambda = 1.5406$ و با طول موج $\text{CuK}\alpha$ ساخت کشور هلند با چشمه انجام شد. الگوی پراش پرتوی ایکس لایه اکسید مس پیش A°



شکل ۱: طرحواره ای از شتاب دهنده الکترواستاتیک کاشت یون.

برای برقرای خلاء، ابتدا پمپ چرخشی^۸ را روشن کرده تا فشار به مرتبه 10^{-1} mbar برسد. پس از این مرحله پمپ دیفیوژن را روشن کرده و آب خنک کننده آن را هم که از دور بدنه می گذرد باز می کنیم. با روشن کردن پمپ دیفیوژن ابتدا، فشار مقداری بالا می رود که این ناشی از تاثیرات گرم شدن روغن دیفیوژن است. پس از مدتی که فشار به اندازه $4 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ پایین آمد، دریچه دیفیوژن را باز کرده تا فشار با سرعت به سمت 10^{-5} mbar پیش برود. پس از رسیدن خلاء به 10^{-5} mbar (هم داخل چشمه و هم محفظه پایین) شیرسوزنی کنترل گاز به مدت ۱۵ دقیقه باز نگه داشته می شود. چشمه در انتهای خود از طریق یک کاتد که دارای یک حفره به قطر $1/5 \text{ mm}$ است از چنبره جدا شده و بنابراین، ورود گاز تاثیری بر فشار محفظه پایین ندارد.

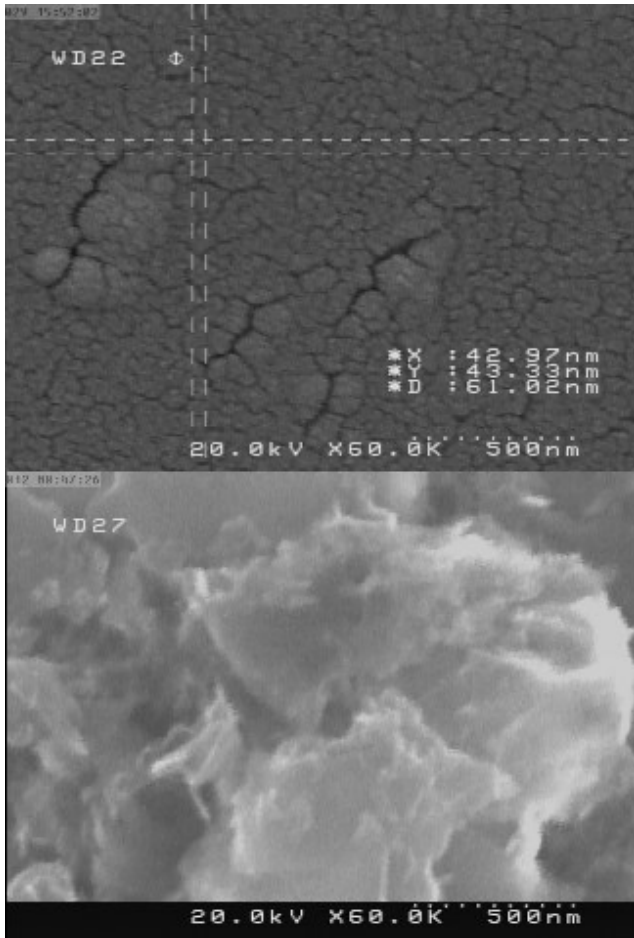
پیش از کاشت یون ابتدا عمق و توزیع یون نیتروژن در لایه خالص اکسید مس با استفاده از نرم افزار SRIM [۲۲] به ازای انرژی های مختلف شبیه سازی شد و مشخص شد که یون به ازای انرژی 50 keV تا عمق حدود 70 nm در نمونه نفوذ می کند. سپس، باریکه یون نیتروژن به مدت ۳ ثانیه با شار 10^{14} $\times 2$ ذره بر سانتی متر مربع و با انرژی 50 keV به لایه نازک تابانیده شد. مدت زمان کم تابش یون باعث می شود ذرات دیگر و ناخالصی روی لایه ننشینند، چرا که اگر ذره ای روی لایه بنشیند

^۹ PANalytical

^۸ Rotary pump

دلیل آن است که توان توقف هسته‌ای^{۱۱} نقش مهم‌تری در قیاس با توان توقف الکترونی^{۱۲} در برهمکنش یون نیتروژن با اتم‌های اکسید مس ایفا می‌کند [۲۳] و پس، انرژی منتقل شده به اتم‌های هدف منجر به جابجائی صفحات بلوری می‌شود. این امر برای شبکه (-۱۱۱) پس از کاشت یون به خوبی مشهود است.

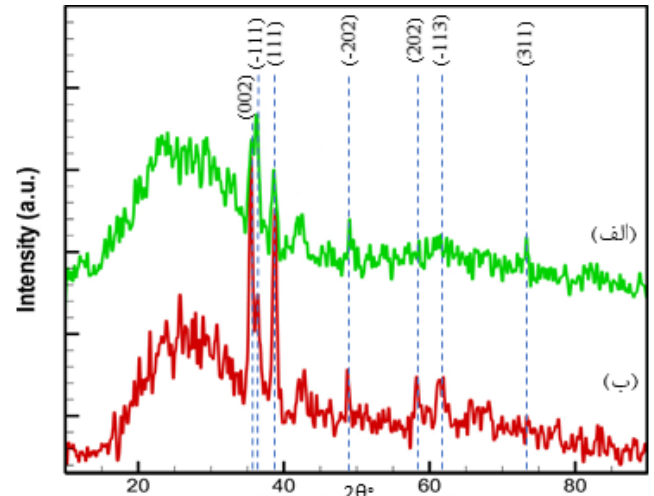
۳-۲- بررسی ویژگی ریخت‌شناسی



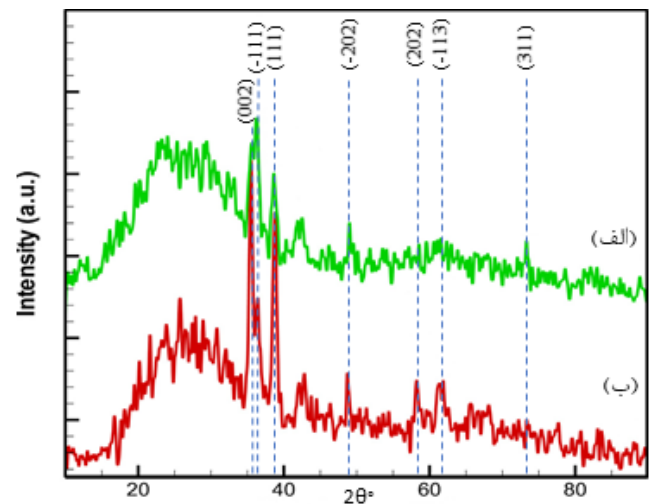
شکل ۴: تصاویر SEM پیش از کاشت (بالا) و پس از کاشت (پائین) یون.

در شکل ۴ تصاویر SEM پیش و پس از کاشت یون نیتروژن بر اکسید مس نشان داده شده است که اندازه متوسط ذرات پیش از کاشت یون تقریبی ۶۰nm بوده است. اما، همان‌طور که انتظار می‌رود کاشت یون نیتروژن منجر به نقص و تغییر در سطح شده است. در این فرایند، انتقال انرژی یون‌های نیتروژن با الکترون-های ماده هدف و نیز از طریق برخورد با هسته ماده هدف است. هنگامی که ماده هدف به اندازه کافی انرژی دریافت کند، اتم‌های

و پس از کاشت یون نیتروژن در



شکل ۳ نمایش داده شده است. قله‌های اصلی در زوایای $35/7^\circ$ ، $38/9^\circ$ و 49° مشاهده شد که به ترتیب متعلق به صفحات شبکه (-۱۱۱)، (۱۱۱) و (-۲۰۲) اکسید مس (CuO) با ساختار مونوکلینیک^{۱۰} و با اعداد بلوری $A^\circ = 4/65$ ، $a = 3/41$ و $b = 5/10$ است که منطبق بر کُد مرجع ۰۱-۰۷۴-۱۰۲۱ است.

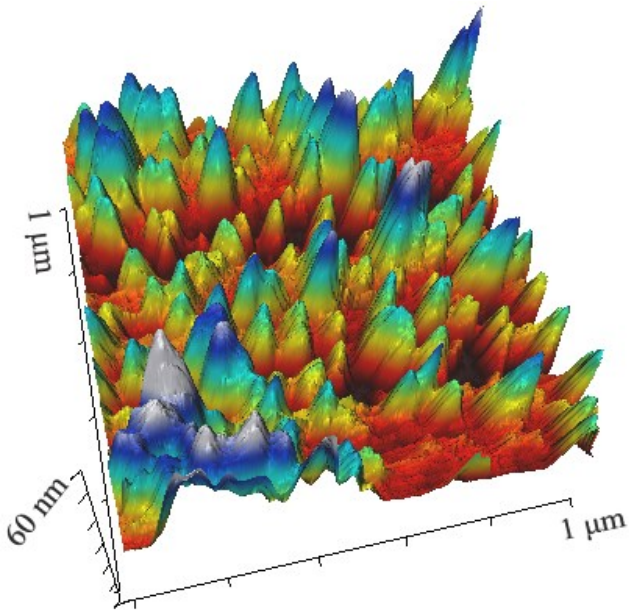


شکل ۳: الگوی پراش پرتوی ایکس (الف) پیش و (ب) پس از کاشت یون نیتروژن.

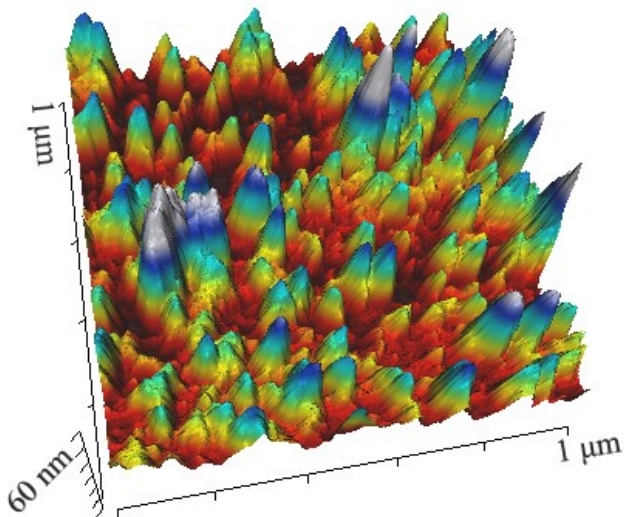
قله‌ی مشاهده شده صفحه (۳۱۱) در پیش از کاشت یون حذف شده است و پس از کاشت یون نیز ریزقله‌های جدید صفحات (۲۰۲) و (-۱۱۳) در طرح پراش پرتو ایکس ایجاد شده است که نشان می‌دهد یون‌های نیتروژن پراش پرتو بر اثر برخورد با اتم‌های اکسید مس این صفحات را جابجا کرده‌اند. این امر به

^{۱۱} Nuclear stopping power
^{۱۲} Electronic stopping power

^{۱۰} Monoclinic



شکل ۵: تصویر سه-بعدی AFM حاصل از اکسید مس قبل از کاشت یون.



شکل ۶: تصویر سه-بعدی AFM حاصل از اکسید مس بعد از کاشت یون.

آن موقعیت خود را ترک کرده و نقص‌هایی شامل جای خالی و خراش یا سائیدگی بر ماده اتم هدف ایجاد می‌شود. میزان این خرابی‌ها در سطح به انرژی یون فرودی، شار فرودی، و توان توقف ماده هدف بستگی دارد. قابل ذکر است که برخورد غیرکشسان الکترون‌ها منجر به نقص خوشه‌ای^{۱۳}، نقص موضعی و یا آسیب تابشی^{۱۴} می‌شود در حالی که، برخورد کشسان هسته-های اتم هدف با یون فرودی باعث تغییر ساختار شبکه می‌شود [۲۴] که در بخش بررسی ساختار بلوری مشخص شد.

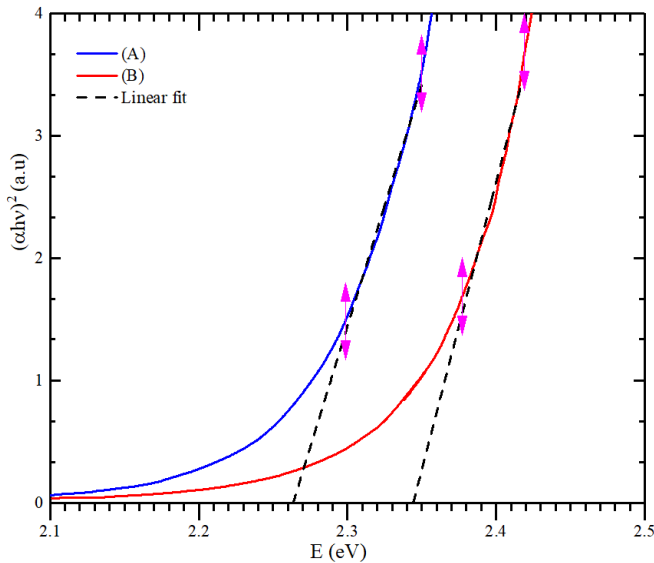
۲-۳- مطالعه ناهمواری قبل و بعد از کاشت یون

در این آزمون با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) ناهمواری سطح نمونه با ابعاد جاروب مختلف انجام شد و تصاویر سه-بعدی آن برای ناحیه $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب پیش و پس از کاشت یون نمایش داده شده است. معمولاً برای بیان عبارت زبری یا ناهمواری سطح از پارامترهای ناهمواری شامل میانگین ناهمواری، میانگین قدرمطلق ناهمواری، جذر میانگین مربعی و فاصله دره تا قله به ترتیب با R_q ، R_a ، A_v و R_t استفاده می‌شود [۲۵]. در جدول ۱، این پارامترها برای ابعاد مختلف ناحیه جاروب شده پیش و پس از کاشت یون ارائه شده است. به طور کلی میانگین ناهمواری سطح پس از کاشت یون کاهش یافته است و این به دلیل آن است یون‌های بمباران شده برخی از دره‌های موجود در سطح نمونه را پوشش داده و یا بلندی-های موجود را خراش داده‌اند و سطح یکنواخت‌تری تشکیل شده است. همچنین، جذر میانگین مربعی ناهمواری بعد از کاشت

یون افزایش یافته است که می‌تواند ناشی از جابجائی اتم‌ها و فرآیند کندوپاش ناشی از کاشت یون باشد.

در واقع کاشت یون نیتروژن باعث بهبود فرآیند پخش سطح از طریق برخورد یون نیتروژن با اکسید مس سطح می‌شود. در ناحیه جاروب با ابعاد بزرگ تغییر جذر میانگین مربعی خیلی محسوس نیست، چرا که از تعداد زیادی نقاط در سطح نمونه میان‌گیری شده است و ابعاد ناحیه جاروب خیلی بزرگتر از ابعاد اتمی است.

^{۱۳} Cluster defect
^{۱۴} Radiation damage



شکل ۷: نمودار $(\alpha hv)^2$ بر حسب انرژی پیش (A) و پس (B) از کاشت یون.

۴- نتیجه گیری

با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی لایه نازک اکسید مس تهیه شد و سپس، با یون نیتروژن با انرژی ۵۰ keV بمباران شد. نتایج XRD به دست آمده حاکی از بلوری بودن ساختار اکسید مس داشت. کاشت یون نیتروژن از طریق برهم کنش کشسان با هسته‌های اتم هدف باعث تغییر در ساختار بلوری ماده هدف و از طریق برهم کنش‌های غیر کشسان با الکترون‌های اتم ماده هدف باعث تغییر آرایش هندسی لایه اکسید مس می‌شود. نتایج حاصل از SEM نشان داد برخی جابجائی‌های اتمی منجر به ایجاد خراش و یا خرابی در سطح اکسید مس شده است. با مقایسه پارامترهای ناهمواری حاصل از اندازه‌گیری AFM قبل و بعد از کاشت یون مشخص شد که بمباران یون نیتروژن از طریق برخورد با قله‌های ناهمواری و پُر کردن دره‌ها سطح هموارتر و یکنواخت‌تری را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از طیف‌نگاری نور فرابنفش نشان داد که انرژی گافی نوری اکسید مس پس از کاشت یون نیتروژن افزایش پیدا کرده است. آنچه که باید مورد توجه قرار بگیرد این است که از طریق کاشت یون نیتروژن می‌توان انرژی گافی نوری را برای مقاصد مورد نظر از قبیل ساخت حسگرها تغییر داد.

سپاسگزاری

از همکاری نزدیک و صمیمانه دکتر مسعود مهجور شفیعی مسئول آزمایشگاه باریکه یونی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران قدردانی و تشکر به عمل می‌آید.

جدول ۱: پارامترهای ناهمواری قبل و بعد از کاشت یون.

ابعاد (μm^2)	R_t (nm)	R_q (nm)	R_a (nm)	A_v (μm)	
0.3×0.3	۳۸/۷۵	۶/۳۹۷	۵/۲۳۸	۸/۲۵۰	قبل
0.3×0.3	۳۹/۰۴	۷/۰۶۸	۵/۸۷۵	۷/۸۷۷	بعد
1×1	۵۶/۸۳	۷/۹۶۸	۶/۳۰۹	۸/۲۴۰	قبل
1×1	۶۰/۲۸	۸/۸۸۲	۶/۹۸۸	۷/۸۹۴	بعد
5×5	۶۴/۳۰	۸/۶۷۸	۶/۸۶۲	۸/۲۳۶	قبل
5×5	۷۵/۲۰	۸/۶۵۱	۶/۹۴۵	۷/۸۹۸	بعد
10×10	۱۲۷/۲	۱۳/۰۲	۱۰/۰۸	۸/۲۴۰	قبل
10×10	۱۱۲/۵	۱۲/۸۰	۹/۶۰۸	۷/۹۱۶	بعد

۲-۳- مطالعه ویژگی نوری

برای تعیین گاف انرژی نواری لایه نازک اکسید مس از دستگاه طیف سنجی نوری^{۱۵} (مدل ۲۵-Perkinelmer, USA) برای اندازه‌گیری طیف جذبی لایه نازک اکسید مس استفاده شده است. در نیم‌رساناهای بلوری رابطه ضریب جذب با انرژی فوتون به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\alpha(v)hv = A(hv - E_g)^n \quad (1)$$

که در آن E_g گاف نوری، hv انرژی فوتون، α ضریب جذب و A یک ثابت است. مقدار n نیز ضریب گذار^{۱۶} است که مقدار آن برای گاف مستقیم در نیم‌رسانا برابر $1/2$ و برای گاف غیر مستقیم برابر ۲ است. گاف انرژی با برون‌یابی قسمت خطی نمودار $(\alpha hv)^2$ بر حسب انرژی فوتون ($E = hv$) به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، انرژی گاف نواری از ۲/۲۶ eV به ۲/۳۴ eV پس از کاشت یون افزایش یافته است که این به دلیل اثرات اندازه کوانتومی، توزیع کاتوره‌ای ذرات، کاهش اندازه ذرات و تغییر ساختاری ماده در لایه نازک است. در واقع، افزایش گاف انرژی متأثر از اندازه ذرات است به قسمی که وقتی اندازه ذرات کاهش می‌یابد گاف انرژی افزایش می‌یابد [۲۶]. در اینجا از کاشت یون نیتروژن به عنوان ابزاری برای تغییر انرژی گاف نوری استفاده شده است که قابلیت امکان استفاده از آن به عنوان حسگرها را توسعه می‌دهد.

^{۱۵} Spectrophotometer
^{۱۶} Transition index

Doping”, *Chemistry of Materials*, 20, 5522-5531, 2008.

[13] M.M. Verdian, *Surface Coating Processes*, in: *Comprehensive Materials Finishing*, Elsevier, 2017.

[14] J.M. Poate, G. Foti, D.C. Jacobson, *Surface Modification and Alloying*, 1983.

[15] N.N. Koval, S.V. Grigoryev, V.N. Devyatkov, A.D. Teresov, P.M. Schanin, “Effect of Intensified Emission During the Generation of a Submillisecond Low-Energy Electron Beam in a Plasma-Cathode Diode”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 37, 1890-1896, 2009.

[16] A.I. Ryabchikov, P.S. Anan'in, S.V. Dektyarev, D.O. Sivin, A.E. Shevelev, “Plasma-Immersion Formation of High-Intensity Ion Beams”, *Technical Physics Letters*, 43, 1051-1053, 2018.

[17] V.S. Kovivchak, T.V. Panova, K.A. Mikhailov, “Surface modification of bismuth and tin under the action of a powerful ion beam of nanosecond duration”, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 6, 248-250, 2012.

[18] A. Anders, *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*, Wiley 2000.

[19] G.Y. Yushkov, A.G. Nikolaev, V.P. Frolova, E.M. Oks, A.G. Roussikh, A.S. Zhigalin, “Multiply charged metal ions in high current pulsed vacuum arcs”, *Physics of Plasmas*, 24, 2017.

[20] ف. عظیمی، ا.غ. حاتم، “بررسی تاثیر کاشت یون نیتروژن بر ویژگی لایه نازک اکسید روی (ZnO) فیزیکی کاربردی ایران، ۹، ۴۵-۵۲، ۱۳۹۸.

[21] M. Mahjour-Shafiei, H. Noori, A.H. Ranjbar, “Influence of magnetic field on the electric breakdown in penning ion source”, *Review of Scientific Instruments*, 82, 2011.

[22] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, “SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 1818-1823, 2010.

[23] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, *The Stopping and Range of Ions in Matter*, in: *Treatise on Heavy-Ion Science*, 1985, 93-129.

[24] S. Namba, *Ion Implantation in Semiconductors*, Springer, Boston, MA 1975.

[25] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, “Roughness

[1] م.ط. ریزی، طراحی و شبیه سازی سلول خورشیدی ارزان قیمت مبتنی بر اکسید مس با راندمان بالا، دانشکده برق، دانشگاه حکیم سبزواری، ۱۳۹۶.

[2] A. Mustafa, M. Sadeer, S. Duha, “Preparation Doped CuO Thin Film and Studies of Its Antibacterial Activity”, *Acta Physica Polonica A*, 135, 596-600, 2019.

[3] T. Ikeda, Y. Oaki, H. Imai, “Thin Films that Consist of CuO Mesocrystal Nanosheets: An Application of Microbial-Mineralization-Inspired Approaches to Thin-Film Formation”, *Chemistry - An Asian Journal*, 8, 2064-2069, 2013.

[4] A. Yavuz, K. Kaplan, M. Bedir, “Copper oxide coated stainless steel mesh for flexible electrodes”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 150, 2021.

[5] R.P. Allaker, *Nanoparticles and the Control of Oral Biofilms*, in: *Nanobiomaterials in Clinical Dentistry*, Elsevier, 2013.

[6] M.Y. Ghotbi, Z. Rahmati, “Nanostructured copper and copper oxide thin films fabricated by hydrothermal treatment of copper hydroxide nitrate”, *Materials & Design*, 85, 719-723, 2015.

[7] H. Hashim, S.S. Shariffudin, P.S.M. Saad, H.A.M. Ridah, “Electrical and Optical Properties of Copper Oxide Thin Films by Sol-Gel Technique”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 99, 2015.

[8] C.V. Niveditha, M.J. JabeenFatima, S. Sindhu, “Electrochemical synthesis of p-type copper oxides”, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 747-751, 2016.

[9] I.S. Han, I.-K. Park, “Growth of Copper Oxide Thin Films Deposited by Ultrasonic-Assisted Spray Pyrolysis Deposition Method”, *Korean Journal of Materials Research*, 28, 516-521, 2018.

[10] Y. Xiang, W. Chengbiao, L. Yang, Y. Deyang, X. Tingyan, “Recent Developments in Magnetron Sputtering”, *Plasma Science and Technology*, 8, 337-343, 2006.

[11] S. Baturay, A. Tombak, D. Kaya, Y.S. Ocak, M. Tokus, M. Aydemir, T. Kilicoglu, “Modification of electrical and optical properties of CuO thin films by Ni doping”, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 78, 422-429, 2016.

[12] M. Nolan, S.D. Elliott, “Tuning the Transparency of Cu₂O with Substitutional Cation

parameters”, Journal of Materials Processing Technology, 123, 133-145, 2002.

[26] R. Koole, E. Groeneveld, D. Vanmaekelbergh, A. Meijerink, C. de Mello Donegá, Size Effects on Semiconductor Nanoparticles, in: Nanoparticles, 2014, 13-51.

Variation of surface properties of copper oxide thin films by nitrogen ion implantation

E.Gholami Hatam, M.Falahzadeh

Department physics, Malayer University, Malayer, Iran.

Abstract: In this research, the effect of nitrogen ion implantation on the crystalline and surface structure of copper oxide thin film has been investigated. For this purpose, a thin film with a thickness of 150 nm was deposited on the silicon substrate by copper oxide sputtering method. Then, the nitrogen ion implantation was performed using an electrostatic accelerator with 50 keV energy for 3 seconds with a fluence of 2×10^{14} particles per square centimeter. The measured current in this experiment was obtained using a profile device and its fitting to a Gaussian function in the range of several milliamperes. From the results of XRD analyzes, it was observed that the number of peaks and the crystal structure have changed. The results of SEM analysis show that the surface structure is defected due to implantation and the measurement of AFM roughness parameters showed that the thin layer of copper oxide became more uniform after ion implantation and its roughness or stiffness is decreased. By measuring the energy gap of copper oxide, it was found that after ion implantation, its value increased from 2.26 eV to 2.34 eV, which can be tuned to make different types of sensors.

Keywords: Copper oxide, Ion implantation, Band gap energy.