

## مقایسه ساختار و مورفولوژی لایه‌های نازک Cu بر زیر لایه GaAs

### در روش‌های الکتروانباشت و الکترولس

ایرج کاظمی نژاد و زهرا بسحاق

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

( دریافت مقاله : ۹۱/۰۲/۱۲ - پذیرش مقاله : ۹۱/۰۷/۱۱ )

#### چکیده

در این تحقیق لایه‌های نازک مس بر زیرلایه نیم‌رسانای گالیوم‌آرسناید نوع n به دو روش الکتروانباشت و الکترولس رشد داده شدند. لایه‌های الکتروانباشت شده با مد جریان ثابت از ۵ mA تا ۳۰ mA و لایه‌های الکترولس شده در دماهای مختلف ۲۵ °C، ۷۷ °C تهیه شدند. ساختار و ریخت شناسی لایه‌ها به کمک دستگاه‌های XRD و SEM مورد بررسی قرار گرفت. سپس پارامتر زبری لایه‌های الکتروانباشت شده در جریان‌های مختلف انباشت و هم‌چنین زبری لایه‌های الکترولس شده در دماهای مختلف به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی AFM مطالعه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: الکتروانباشت، الکترولس، لایه نازک Cu، نانوساختار، XRD، AFM.

## Comparison of structure and morphology of Cu thin films on GaAs substrate in electrodeposition and electroless methods

I. Kazeminezhad and Z. Boshgh

Physics Department, Faculty of Science, Shahid Chamran University, Ahvaz

(Received 1 May 2012, accepted 1 October 2012)

#### Abstract

In this research Cu thin films were grown on n-type GaAs by electro and electroless deposition. Some Cu thin films were electrodeposited under constant current mode from 5 to 30 mA and some Cu thin films were grown by electroless at various temperatures from 25 to 77 °C. Their structures and morphology were studied by X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM). Roughness of both series of Cu films was examined by atomic force microscope (AFM).

**Keywords:** Electrodeposition, electroless, Cu thin film, roughness, Nanostructure, XRD, AFM.

**E-mail of corresponding author:** I.Kazeminezhad@scu.ac.ir

## مقدمه

الکتروانباشت و الکترولس رشد داده شدند و ساختار آنها توسط پراش اشعه X (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و زبری آنها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد مطالعه قرار گرفتند.

## مواد و روش تحقیق

در این بخش روش تجربی ساخت لایه‌های نازک مس بر زیرلایه نیم‌رسانای گالیوم‌آرسناید نوع n به دو روش الکتروانباشت و الکترولس شرح داده می‌شود. برای رشد لایه‌های نازک مس به روش الکتروانباشت از مد جریان ثابت استفاده شد. در مد جریان ثابت، جریان الکتریکی سلول الکتروشیمیایی توسط یک دستگاه گالوانواستات (ساخت شرکت سما ایران) ثابت نگه داشته می‌شود و در هر لحظه پتانسیل بین الکترودهای کار و مرجع توسط سیستم متصل به یک رایانه ثبت می‌گردد. با توجه به اینکه جریان الکتریکی انباشت یکی از عوامل مؤثر بر رشد و ناهمواری سطح لایه‌ها در روش الکتروانباشت است، به همین منظور لایه‌های مس در جریان‌های مختلف از ۵ mA تا ۳۰ mA با ضخامت ۵۰۰ nm تهیه شدند. در این تحقیق برای انباشت مس به روش الکتروانباشت از الکترولیتی شامل مواد موجود در جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱. ترکیبات محلول الکتروانباشت استفاده شده در این تحقیق.

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	$C_6H_5Na_3O_7$	آب یون زدایی شده
۰/۰۱۹ M	۰/۲ M	به میزان مورد نیاز

قبل از انباشت ابتدا زیرلایه با آب دو بار یون‌زدایی شده شسته شد. سپس به منظور زدودن آلودگی‌ها و لایه اکسیدی احتمالی از سطح، زیرلایه به مدت ۱۰ دقیقه در استون و بعد ۵ دقیقه در ۱۰٪  $NH_3$  غوطه‌ور شد. بعد از این مرحله زیرلایه دوباره با آب دو بار یون‌زدایی شده شسته و خشک شد. به منظور کنترل مساحت ناحیه انباشت ماسک دایره‌ای به قطر ۷ mm روی زیرلایه قرار داده شد و بلافاصله به محلول الکترولیت منتقل شد.

با توجه به نقش ناهمواری سطوح در شکل‌گیری خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف مانند چسبندگی سطح، اصطکاک، خواص الاستیکی و هم‌چنین اهمیت میزان زبری لایه‌های نازک در کاربردهای آنها، بررسی زبری سطح این ساختارها بسیار مورد توجه محققین است [۵-۱]. در دو دهه اخیر الکتروانباشت به دلیل مزیت‌های بسیار برای تولید لایه‌های نازک فلزی و نانوساختارهای مختلف بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. الکتروانباشت به دلیل چیدمان ساده، انجام فرآیند در شرایط متعارفی، انعطاف پذیری بالا و کم هزینه بودن نسبت به روش‌های مبتنی بر خلأ مثل تبخیر در خلأ، کند و پاش و روآرستی پرتو ملکولی برتری دارد [۶ و ۷]. با استفاده از این روش و با بهینه کردن شرایط انباشت می‌توان لایه‌های نازک فلزی با کیفیت بسیار بالا جهت ایجاد پوشش‌های خوردگی مناسب و پوشش‌های رسانا جهت استفاده در صنایع الکترونیک، میکروالکترونیک و ساخت مدارهای مجتمع تولید کرد [۸]. روش الکترولس نیز روشی ساده، ارزان و سریع است و در مقایسه با سایر روش‌های تولید نانوساختارها و لایه‌های نازک در دماهای پایین‌تری قابل انجام است. در این تکنیک برخلاف الکتروانباشت محدودیت رسانایی زیرلایه وجود ندارد و به کمک آن می‌توان بر زیرلایه‌های عایق نیز لایه‌ای را رشد داد. روش الکترولس برای ایجاد روکش‌های رسانا در ساخت وسایل میکروالکترونیک بسیار مورد توجه است [۹]. پوشش‌های نازک مس به دلیل رسانندگی الکتریکی بسیار بالا و مقاومت در مقابل خوردگی مناسب به طور گسترده‌ای در تکنولوژی مدارهای مجتمع با مقیاس فوق بزرگ (ULSI) و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی استفاده می‌شوند [۱۰]. اخیراً روش الکترولس برای تولید لایه‌های نازک مس بر زیرلایه‌های عایق و نیم‌رسانا به دلیل چسبندگی مناسب لایه‌های تولید شده به زیرلایه و عدم نیاز به منبع تغذیه الکتریکی بسیار استفاده می‌شود [۱۱]. در این تحقیق لایه‌های نازک مس بر زیرلایه گالیوم‌آرسناید به دو روش

شده است [۱۲]. کلیه مواد شیمیایی استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت Merck آلمان هستند.

جدول ۲. ترکیبات محلول الکترولس استفاده شده در این تحقیق.

CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O	HCHO	KOH	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	EDTA
۰/۰۴M	۰/۱۶M	۰/۵M	۰/۰۰۰۰۶۴M	۰/۱۷M

کیفیت لایه‌ها در روش الکترولس بستگی به عوامل مختلفی چون ترکیبات حمام انباشت، غلظت ترکیبات در حمام انباشت، فرآیند فعال‌سازی، دما و مقدار pH محلول دارد. با توجه به اینکه دمای الکترولیت یکی از پارامترهای مؤثر بر کیفیت انباشت در روش الکترولس است، لایه نشانی در دماهای ۳۷ °C، ۴۷ °C، ۵۷ °C، ۶۷ °C و ۷۷ °C انجام شده است. پس از رشد لایه‌های مس بر زیرلایه GaAs به روش‌های الکتروانباشت و الکترولس ساختار و ترکیب شیمیایی لایه‌ها توسط دستگاه‌های XRD (مدل PW1840 ساخت شرکت فلیپس) و SEM (مدل XL30 ساخت شرکت فلیپس) و ناهمواری لایه‌ها به کمک دستگاه AFM (مدل DS 95-50 E ساخت شرکت DME دانمارک) مورد مطالعه قرار گرفت.

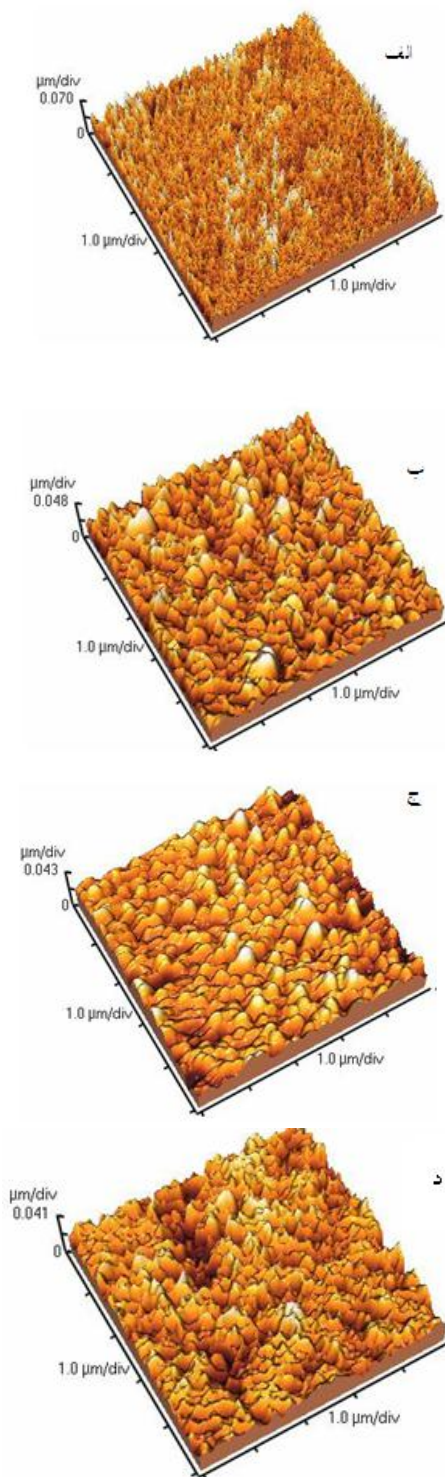
## نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی‌های XRD لایه مس الکتروانباشت شده در مد جریان ثابت به ضخامت اسمی ۵۰۰ nm در جریان‌های انباشت ۵mA، ۱۰mA و ۳۰mA را نشان می‌دهد. همان‌طور که این الگوهای نشان می‌دهند لایه الکتروانباشت شده در جریان‌های ۵mA و ۱۰mA به صورت بلوری و در دو راستای ترجیحی (۲۲۰) و (۲۰۰) رشد یافته‌اند در صورتی که نمونه‌های الکتروانباشت شده در جریان ۳۰mA فقط در راستای (۲۲۰) رشد یافته است.

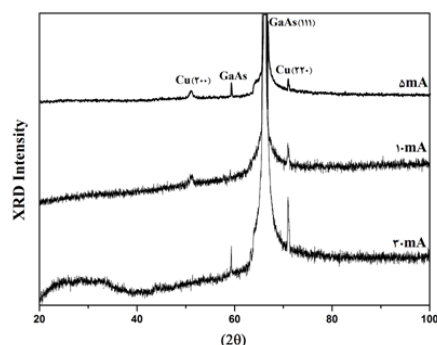
در روش الکترولس انباشت لایه‌های Cu در یک حمام شیمیایی که زیرلایه در آن غوطه‌ور می‌شود، انجام گرفت. ترکیبات اصلی حمام شامل نمکی از یون‌های ماده انباشت شونده و واسطه کاهنده است. این واسطه کاهنده یون‌های فلزی موجود در محلول را در حضور کاتالیزور بر سطح زیرلایه احیا می‌کند. هر فرآیند الکترولس شامل دو مرحله آماده‌سازی زیرلایه و انباشت است. آماده‌سازی زیرلایه شامل سونش زیرلایه، حساس‌سازی و فعال‌سازی آن است. برای سونش، ابتدا زیرلایه با آب دو بار یون‌زدایی شده شسته شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در استن و بعد ۵ دقیقه در ۱۰٪ NH<sub>3</sub> غوطه‌ور شد. بعد از این مرحله مجدداً زیرلایه با آب دوبار یون‌زدایی شده شسته و خشک شد. بعد از سونش، سطح زیرلایه را باید برای پذیرش کاتالیزور آماده کرد، که به این مرحله حساس‌سازی زیرلایه گفته می‌شود. برای حساس‌سازی از محلولی شامل کلرید قلع و اسید هیدروکلریک استفاده شد در این مرحله زیرلایه GaAs به مدت ۲ min در محلول حساس‌سازی غوطه‌ور شد. در مرحله حساس‌سازی یون‌های قلع در سطح زیرلایه قرار می‌گیرند. بعد از این مرحله زیرلایه به مدت ۳۰s در آب دوبار یون‌زدایی شده قرار داده شد، سپس بلافاصله به محلول شامل کاتالیزور منتقل شد. این محلول شامل کلرید پالادیوم و اسید کلریدریک است. در مرحله فعال‌سازی یون‌های قلع که در سطح زیرلایه قرار دارند یون‌های پالادیوم را به اتم‌های پالادیوم احیا می‌کنند. اتم‌های پالادیوم انباشت شده بر سطح زیرلایه در نقش کاتالیزور، فرآیند انباشت را تسهیل می‌کنند. بعد از این مرحله زیرلایه بلافاصله به حمام انباشت منتقل گردید و به مدت ۲۰ دقیقه لایه‌نشانی صورت گرفت.

پس از آماده‌سازی، بلافاصله زیرلایه به حمام شیمیایی شامل ترکیبات موجود در جدول ۲ قرار داده شد. در این حمام شیمیایی از سولفات مس پنج آبه به عنوان منبع یون فلزی، فرمالدهید به عنوان واسطه کاهش، هیدروکسید پتاسیم برای تنظیم pH، دایپیریلیل به عنوان پایدارساز محلول و اتیلن‌دی‌آمین تترا استیک‌اسید در نقش کمپلس‌ساز استفاده

می‌دهند. در جدول ۳ ریشه میانگین مربعی زبری لایه‌های مسی تهیه شده در این جریان‌ها را نشان می‌دهد.

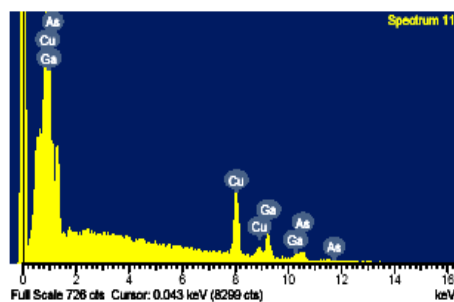


شکل ۳. تصاویر AFM لایه مس الکتروانباشت شده تحت جریان (الف) ۵ mA، (ب) ۱۰ mA، (ج) ۲۰ mA، (د) ۳۰ mA در ناحیه روبش ۵ μm.



شکل ۱. الگوی های XRD لایه‌های مس الکتروانباشت شده بر زیرلایه GaAs به ضخامت اسمی ۵۰۰ nm جریان‌های انباشت ۵mA، ۱۰mA و ۳۰mA.

شکل ۲ طیف EDX لایه مس الکتروانباشت شده به ضخامت اسمی ۵۰۰nm با جریان انباشت ۵ mA را نشان می‌دهد. از آنجا که در آنالیز EDX فقط قله‌های مس و گالیوم و آرسنیک دیده می‌شود بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که درجه خلوص فیلم‌های تولید شده به روش الکتروانباشت نسبت به عناصر فلزی تقریباً بالاست.



شکل ۲. الگوی EDX لایه مس الکتروانباشت شده در ضخامت اسمی ۵۰۰nm

به منظور بررسی زبری و برخی پارامترهای آماری مربوط به ناهمواری سطوح، با استفاده از AFM سطح نمونه‌های مس رشد یافته به روش الکتروانباشت در جریان‌های مختلف و در ناحیه روبش ۵μm آنالیز شد. پارامترهای آماری مختلفی از قبیل میانگین زبری، ریشه میانگین مربعی زبری، میانگین ارتفاع و تفاوت بین حداکثر و حداقل ارتفاع با استفاده از نتایج AFM محاسبه شدند.

شکل ۳ تصاویر AFM نمونه‌های الکتروانباشت شده در جریان های انباشت ۵ mA تا ۳۰ mA را در ناحیه روبش ۵μm نشان

همان‌طور که مشاهده می‌شود در الگوی XRD نمونه‌هایی که در دمای ۲۵ °C و ۳۷ °C رشد یافته‌اند قله‌های مربوط به مس دیده نمی‌شود. این امر می‌تواند ناشی از ضخامت کم لایه یا آمورف بودن لایه‌ها در این دما باشد. در دماهای مختلف قله‌های متفاوتی در الگوی XRD ملاحظه می‌شود که تأثیر دمای انباشت را بر راستای رشد نشان می‌دهد. در دمای ۴۷ °C لایه‌ی مس با بیشترین جهت‌های رشد در راستاهای (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) انباشت شده است. در صورتی‌که در دمای ۶۷ °C تنها جهت رشد، (۱۱۱) است زیرا مس دارای شبکه‌ی fcc است و رشد در این راستا برای چنین ساختاری در حالت کاتوره‌ای و دارای کمترین انرژی است بنابراین سیستم تحت این شرایط (دمای بالا) دارای بیشترین بی‌نظمی و در نتیجه در پایین‌ترین سطح انرژی خود قرار می‌گیرد.

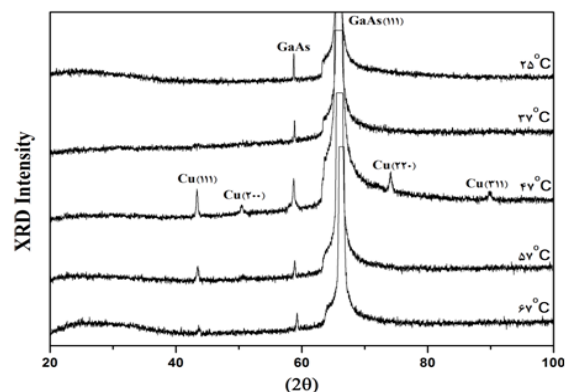
به منظور بررسی ریخت شناسی لایه‌های مس رشد یافته به روش الکترولس و بررسی اثر دما بر رشد آنها، لایه‌های انباشت شده در دماهای مختلف توسط SEM آنالیز شدند. نمونه‌های ساخته شده در دماهای ۲۵ °C تا ۷۷ °C در مدت زمان ۲۰ دقیقه با استفاده از SEM مورد مطالعه قرار گرفتند. شکل ۵ تصاویر SEM مربوط به این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که این تصاویر نشان می‌دهند، رشد مس بر زیرلایه گالیوم‌آرسناید به روش الکترولس به صورت دانه‌ای است. با افزایش دما از ۳۷ °C به ۵۷ °C اندازه دانه‌ها ریزتر شده و سطح همگن‌تری مشاهده می‌شود. با افزایش دما تا ۶۷ °C کاهش اندازه دانه‌ها ادامه می‌یابد اما خلل و فرج‌هایی نیز بر سطح لایه ایجاد می‌شود. در دمای ۷۷ °C میزان خلل و فرج‌ها در سطح لایه بسیار افزایش می‌یابد و لایه تشکیل شده حالت اسفنجی دارد.

جدول ۳. مقایسه ریشه میانگین مربعی زبری لایه‌های الکتروانباشت شده در جریان‌های مختلف در ناحیه رویش ۵μm.

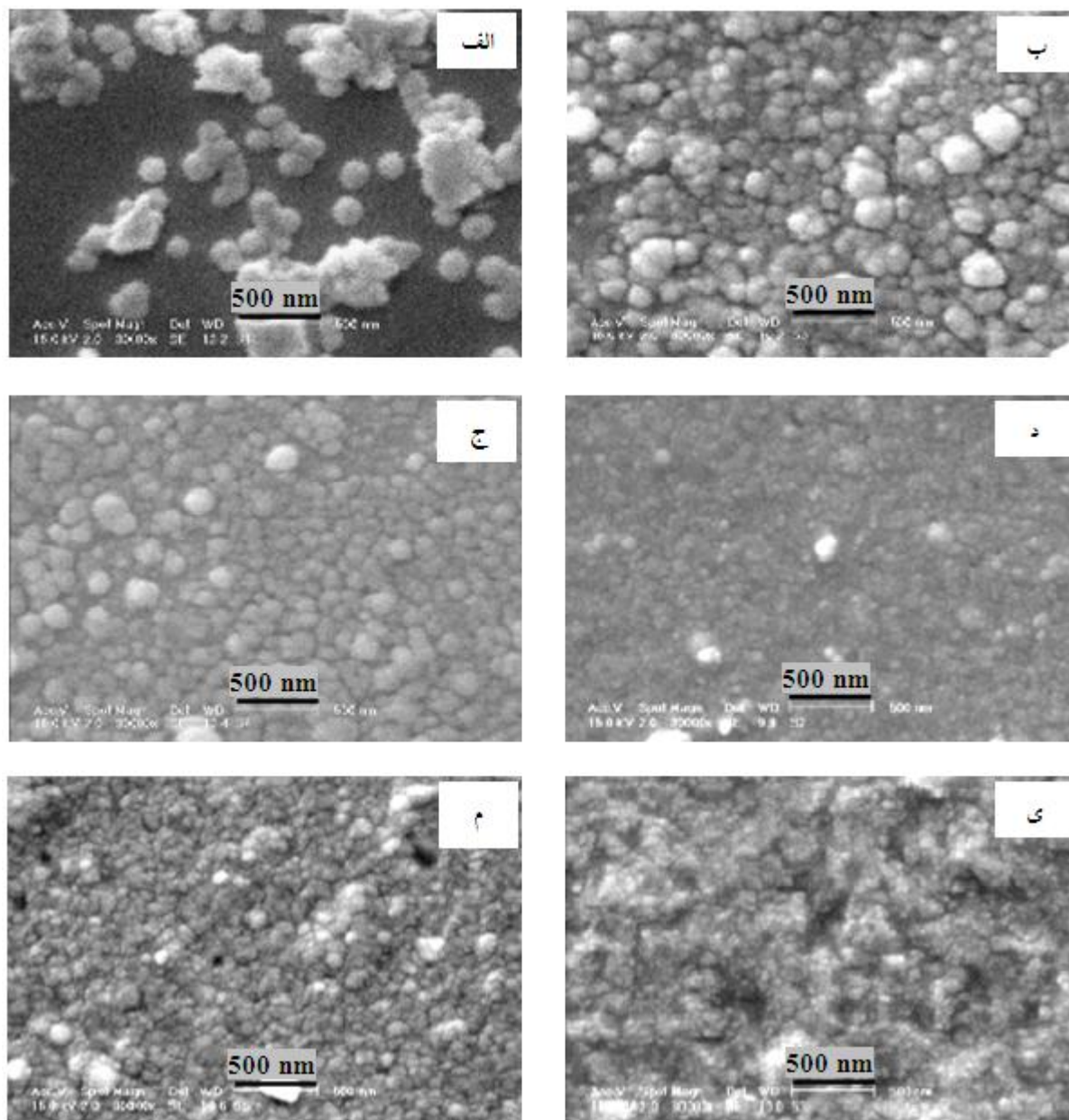
جریان انباشت (mA)	زمان انباشت (s)	ریشه میانگین مربعی زبری (nm)
۵	۹۸۰	۱۶/۰
۱۰	۴۸۰	۱۴/۳
۲۰	۲۶۰	۱۰/۴
۳۰	۱۸۰	۱۱/۶

مقایسه این نتایج با یکدیگر یک روند کاهشی در پارامترهای ناهمواری را نشان می‌دهد. افزایش ناگهانی در نتایج ناهمواری نمونه‌ی تهیه شده در جریان ۳۰mA می‌تواند ناشی از افزایش بیش از حد سرعت رشد دانه‌بندی در سطح لایه و در نتیجه عدم فرصت کافی برای پخش اتم‌های انباشت شده بر روی سطح باشد. این نتیجه با نتایج گزارش شده‌ی قبلی در خصوص الکتروانباشت فیلم‌های ضخیم مسی در توافق است [۱۳].

نتایج حاصل از الگوی XRD لایه‌های مس رشد یافته به روش الکترولس بر زیرلایه (۱۱۱) GaAs در دماهای ۲۵ تا ۶۷ °C در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



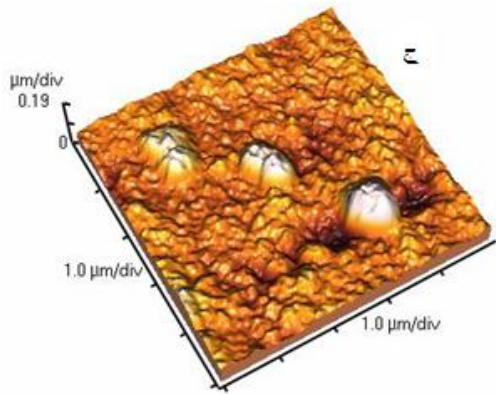
شکل ۴: الگوی XRD لایه مس الکترولس شده بر زیرلایه (۱۱۱) GaAs در دماهای ۲۵ °C تا ۳۷ °C.



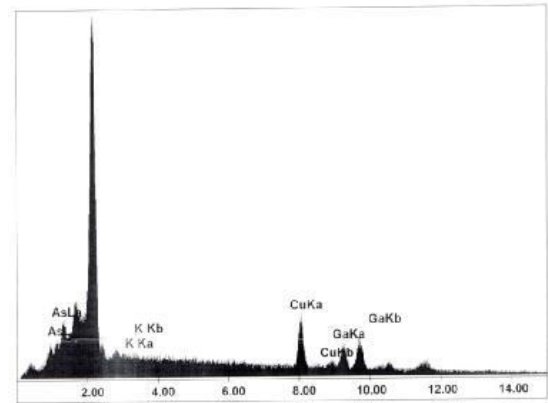
شکل ۵. تصاویر SEM لایه مس الکترولی شده به مدت ۲۰min در دما (الف) ۲۷°C (ب) ۳۷°C (ج) ۴۷°C (د) ۵۷°C (م) ۶۷°C (ی) ۷۷°C.

تغییر می‌تواند ناشی از اثر دما بر روند واکنش‌های شیمیایی در محلول و تغییر پتانسیل شیمیایی عناصر در اثر تغییر دمای محلول باشد.

شکل ۶ آنالیز EDX لایه مس رشد یافته در دما ۳۷°C را نشان می‌دهد. این طیف نشان می‌دهد که در حین انباشت مس مقدار کمی پتاسیم نیز انباشت شده است. آنالیز EDX لایه‌های انباشت شده در دماهای مختلف نشان می‌دهد با تغییر دمای محلول درصد پتاسیم انباشت شده تغییر می‌کند. این



شکل ۷. تصاویر AFM لایه مس الکتروپلاسه شده به مدت ۲۰ min و ناحیه روبش ۵μm در دمای الف) (۳۷°C، ب) (۴۷°C، ج) (۵۷°C)



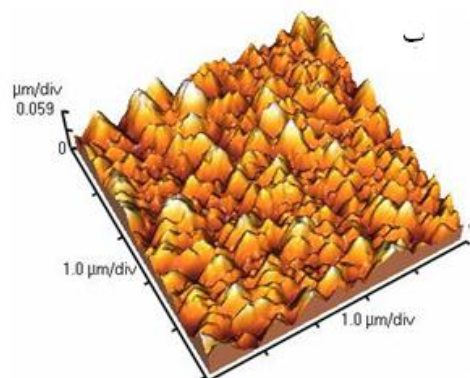
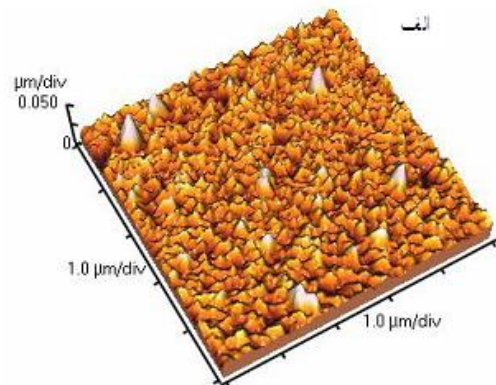
شکل ۶. آنالیز EDX لایه مس الکتروپلاسه شده در دمای ۳۷°C

جدول ۴ ریشه میانگین مربعی زبری لایه‌های مس الکتروپلاسه شده در سه دمای مختلف در ناحیه روبش ۵μm را نشان می‌دهند. همان‌طور که داده‌ها نشان می‌دهند با افزایش دما از ۳۷°C به ۵۷°C این پارامتر زبری افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند ناشی از وجود دانه‌هایی درشت در سطح لایه در دماهای ۴۷°C و ۵۷°C باشد. این نتایج با گزارش‌های مربوط به افزایش ناهمواری‌های سطح لایه‌های مس تهیه شده به روش‌های دیگر که در دماهای مختلف زیر لایه رشد نموده‌اند در توافق است [۱۳ و ۱۴].

جدول ۴. مقایسه ریشه میانگین مربعی زبری لایه مس الکتروپلاسه شده در سه دمای مختلف (ناحیه روبش ۵μm).

ریشه میانگین مربعی زبری (nm)	دمای انباشت (°C)
۸/۴	۳۷
۱۵/۱	۴۷
۲۶/۲	۵۷

شکل ۷ تصاویر AFM لایه‌های مس الکتروپلاسه شده در سه دمای ۳۷°C، ۴۷°C و ۵۷°C در مدت زمان ۲۰ دقیقه را در ناحیه روبش ۵μm نشان می‌دهند. در دمای ۶۷°C به دلیل چسبندگی پایین لایه به زیرلایه در حین روبش نمونه توسط سوزن خراشیده شد بنابراین بررسی ناهمواری آن به کمک AFM امکان پذیر نبود.



## نتیجه گیری

در این تحقیق لایه‌های نازک مس بر زیرلایه نیم‌رسانای گالیوم-آرسناید نوع n به روش‌های الکتروانباشت و الکترولس رشد داده شدند. آنالیز EDX و الگوی XRD لایه‌های الکتروانباشت شده رشد مس با درجه خلوص نسبتاً بالا را تأیید می‌کنند. الگوی XRD لایه‌های مس الکتروانباشت شده در جریان‌های انباشت ۵ mA و ۱۰ mA رشد مس در دو راستای (۲۲۰) و (۲۰۰) و در جریان ۳۰ mA رشد مس در راستای (۲۲۰) را نشان می‌دهند. تصاویر SEM لایه‌های الکتروانباشت شده نشان می‌دهند مد رشد مس بر زیرلایه گالیوم-آرسناید در این روش به صورت جزیره‌ای است. ناهمواری سطح لایه‌های الکتروانباشت شده در جریان‌های انباشت مختلف به کمک AFM بررسی شد. مقایسه داده‌ها نشان داد پارامترهای ناهمواری با افزایش جریان از ۵ mA به ۲۰ mA کاهش می‌یابند و در جریان ۳۰ mA افزایش ناگهانی در ناهمواری دیده می‌شود، بنابراین در بین جریان‌های بررسی شده جریان انباشت ۲۰ mA جریان مناسبی برای رشد لایه با کمترین زبری می‌باشد. آنالیز EDX لایه‌های مس الکترولس شده در دماهای مختلف رشد مس با درصد خلوص نسبتاً بالا بر زیرلایه گالیوم-آرسناید را تأیید کرد. در الگوی XRD لایه‌های مس الکترولس شده در دماهای ۲۵ °C و ۳۷ °C قله‌های مربوط به مس مشاهده نگردید ولی با افزایش دمای انباشت از ۲۷ °C به ۶۷ °C راستاهای رشد متفاوتی از مس مشاهده شد. تصاویر SEM نشان داد که مد رشد لایه‌های مس الکترولس شده در دماهای مختلف از نوع جزیره‌ای است. ناهمواری سطح لایه‌های الکترولس شده در دماهای مختلف به کمک AFM بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزایش دما پارامترهای مربوط به این ناهمواری‌ها افزایش می‌یابند.

## منابع

- alloy, Applied Surface Science, 255(2009) 7414-7426.
- S. Giljean, M. Bigerelle, K. Anselme and H. Haidara, New insights on contact angle /roughness dependence on high surface energy materials, Applied Surface Science, 257(2011) 9631-9638.
- P. J. Ramón-Torregrosa, M. A. Rodríguez-Valverde, A. Amirfazli and M. A. Cabrerizo-Vílchez, Factors affecting the measurement of roughness factor of surfaces and its implications for wetting studies, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 323(2008) 83-93.
- V. Podgursky, E. Adoberg, A. Surženkov, E. Kimmari, M. Viljus, V. Mikli, M. Hartelt, R. Wäsche, M. Šima and P. Kulu, Dependence of the friction coefficient on roughness parameters during early stage fretting of (Al,Ti)N coated surfaces, Wear, 271(2011)853-858.
- H. Kesari and A.J. Lew, Effective macroscopic adhesive contact behavior induced by small surface roughness, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 59(2011)2488-2510.
- I. Kazeminezhad, H. J. Blythe and W. Schwarzacher, Alloys by precision electrodeposition, Applied Physics Letter, 78(2001)1014-1016.
- M. Allemand, M. H. Martin, D. Reyter, L. Roué, D. Guay, C. Andrei and G. A. Botton, Synthesis of Cu-Pd alloy thin films by co-electrodeposition, Electrochimica Acta, 56(2011)7397-7403.
- A. Vicenzo, F. Pomati, A. Pezzeri and P. L. Cavallotti, Amorphous Ni-W coatings by electrodeposition, Metallurgia Italiana, 101(2009)39-47.
- T. Asher, A. Inberg, E. Glickman, N. Fishelson and Y. Shacham-Diamand, Formation and characterization of low resistivity sub-100 nm copper films deposited by electroless on SAM, Electrochimica Acta, 54(2009)6053-6057.
- A. Inberg, E. Glickman, T. Asher, N. Fishelson and Y. Shacham-Diamand, Electrical properties of sub-100 nm Cu films deposited by electroless plating on amino-terminated silicon oxide activated with Au nano-particles, Surface and Coatings Technology, 204(2009)520-524.
- H. Hayden, E. Elce, S. A. B. Allen and P. A. Kohl, Adhesion enhancement between electroless copper and epoxy-based dielectrics, IEEE Transactions on Advanced Packaging, 32(2009)758-767.
- O. Hatamleh, J. Smith, D. Cohen and R. Bradley, Surface roughness and friction coefficient in peened friction stir welded 2195 aluminum



12. S. S. Wu, W. L. Liu, T. K. Tsai, S. H. Hsieh, W. J. Chen, Growth behavior of electroless copper on silicon substrate, Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 14(2007)67-71.
13. M. C. Lafouresse, P. J. Heard and W. Schwarzacher, Anomalous scaling for thick electrodeposited films, Physical Review Letters, 98(2007)236101-236104.
14. K. M. Park, J. K. Kim, B. Han, W. J. Lee, J. Kim and H. K. Shin, Influence of the deposition temperature on the properties of copper thin films prepared by alternating injection of Cu(ethylketoimate)<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> on a ruthenium substrate, Microelectronic Engineering, 89(2012)27-30.