

رشد و بررسی خواص ساختاری و الکتریکی لایه‌های نازک Pb الکتروانباشت شده بر روی زیرلایه‌های Au و Cu

نرگس نوازش^۱، غلامرضا نبیونی*^۲ و نرگس حمزه‌لو صفایی^۱
گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک

چکیده

در این تحقیق لایه‌های نازک Pb با ضخامت‌های مختلف به روش الکتروانباشت تک حمام و با استفاده از سه الکتروود بر روی زیرلایه‌های مس و طلا تهیه شدند. برای به دست آوردن ولتاژ مناسب انباشت از مطالعه ولتامتر چرخه‌ای استفاده شد. ضخامت لایه‌های انباشت شده با استفاده از دستگاه Dektak3 اندازه‌گیری شد. نانو ساختار این لایه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و الگوی پراش اشعه ایکس مورد مطالعه قرار گرفت. بستگی مقاومت الکتریکی به ضخامت لایه‌های نازک سرب با استفاده از دستگاه چهارسوزنه در آرایش وان در پائو بررسی شده است.

کلمات کلیدی: الکتروانباشت، سرب، لایه‌های نازک، مشخصه‌یابی الکتریکی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، هسته‌زایی و رشد، ولتامتری چرخه‌ای

مقدمه

راهکارهای مقابله با آن مورد توجه محققین است [۱۰]. مطالعات بسیاری برای استخراج مستقیم فلز [۱۰ و ۱۱] یا برای بازیافت آن انجام شده است [۱۲-۱۴]. الکتروانباشت یکی از ساده‌ترین، انعطاف‌پذیرترین و ارزان‌ترین روش‌های لایه‌نشانی است که نسبت به روش‌های مبتنی بر خلا دارای مزیت‌هایی از جمله سرعت لایه‌نشانی بالا، قیمت ارزان، دمای انباشت پایین و امکان ایجاد ساختار ترکیبی است [۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق لایه نازک سرب به روش الکتروانباشت در ضخامت‌های مختلف بر روی زیرلایه‌ی طلا و مس انباشت شده است. نانو ساختار این لایه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه تأثیر ضخامت بر مقاومت الکتریکی این لایه‌ها با استفاده از دستگاه چهارسوزنه بررسی شده است.

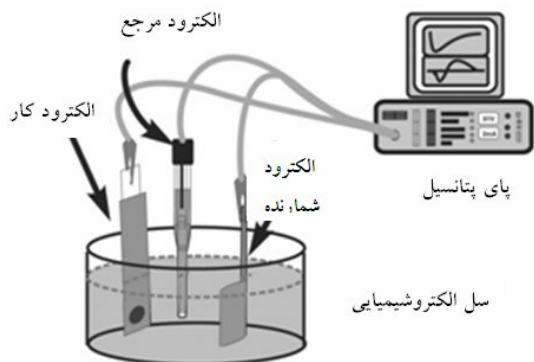
مطالعه الکتروانباشت سرب پدیده‌های جالب و متنوعی را نشان می‌دهد. الکتروانباشت سرب بر روی زیرلایه‌های Au و Cu مثال‌های خوبی برای تشکیل لایه بر اساس مد رشد استرانسکی-کراستائف است که در لایه‌نشانی ابتدا به صورت شکل‌گیری لایه دوبعدی و سپس به صورت هسته‌زایی و رشد جزیره‌های سه‌بعدی انجام می‌پذیرد [۱] و [۲]. به علت کاربرد لایه‌های سرب در تکنولوژی‌هایی مانند تولید فلزات فعال با خلوص بالا به منظور ساخت باتری‌های اسیدی [۳]، نیم‌رساناها [۴-۶] و ساخت وسایل الکتروکرومیک [۷-۹]، لایه‌نشانی سرب مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از طرف دیگر سرب یکی از خطرناک‌ترین فلزات سنگین موجود در طبیعت است و سمی بودن آن به عنوان یک مشکل زیست محیطی و

*نویسنده مسئول g-nabiyouni@araku.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استاد

روش انجام آزمایش



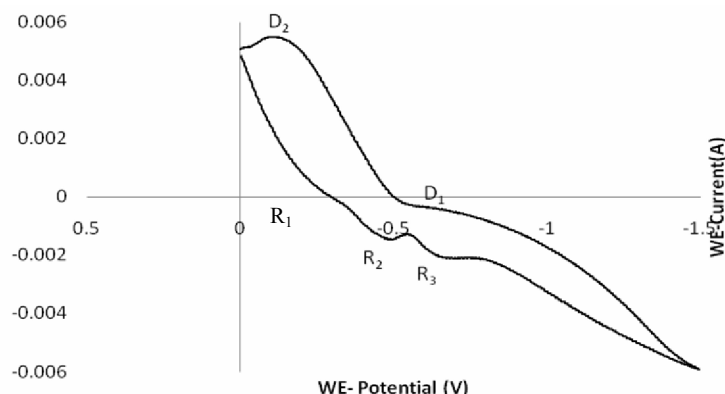
شکل ۱- سل الکتروشیمیایی با سه الکتروود متصل به دستگاه پای پتانسیل

نتایج و بحث

برای تعیین رفتار الکتروشیمیایی یون‌های Pb^{2+} در محلول ۱۰۰ میلی مولار $HClO_4$ از ولتامتری چرخه‌ای استفاده شد. ولتاموگرام چرخه‌ای در گستره پتانسیل بین $-1/5V$ و $0/5V$ با سرعت روبش $50 mVs^{-1}$ انجام گردید. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد یک قله دوگانه R_1 و R_2 به ترتیب در پتانسیل‌های $-0/35V$ و $-0/48V$ ایجاد شده است این چنین رفتار ولتامتری، مشخصه مکانیسم هسته‌زایی و رشد است که در آن هسته‌های اولیه Pb برای انباشت بعدی شکل می‌گیرند. انباشت بعدی Pb در پتانسیل‌های منفی‌تر صورت می‌گیرد [۱۷]. تشکیل یک قله دوگانه برای رشد اولیه Pb در توافق با مطالعات قبلی است که بر روی زیرلایه‌های Cu تک بلوری [۱۸] و Cu چندبلوری [۱] انجام شده است. این قله‌ها به احتمال بسیار زیاد به علت انرژی‌های مختلف اتصال قسمت‌های مس با هندسه متفاوت است. علاوه بر این جذب یون‌های کلرید اثر مهم در ایجاد قله دوگانه دارد، به این معنا که حضور یون کلرید روند رسوب هسته اولیه Pb را افزایش می‌دهد [۱۹]. یک قله دیگر در پتانسیل $-0/65V$ ایجاد شده است که با R_3 نشان داده شده است. این قله انباشت بعدی لایه سرب را به صورت توده نشان می‌دهد.

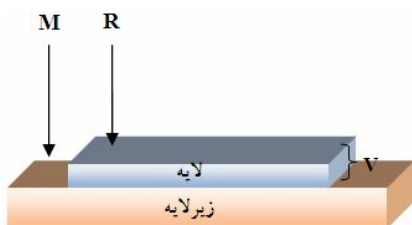
آزمایش‌های الکتروشیمیایی این تحقیق در یک سل سه‌الکتروودی و با استفاده از دستگاه BHP مدل 2061C انجام شده است. الکترولیت شامل ۱۰۰ میلی مولار $HClO_4$ و ۵ میلی مولار $Pb(ClO_4)_2$ و ۲۰ میلی مولار KCl می‌باشد. اجزاء ترکیب در آب مقطر دو بار یون‌زدایی شده حل شده‌اند. pH الکترولیت در مقدار $1/52$ ثابت نگه داشته شد و الکتروانباشت در دمای اتاق و تحت پتانسیل ثابت $-1/3V$ انجام گرفت این ولتاژ به صورت تجربی به دست آمده است. زیرلایه Au استفاده شده در این پژوهش یک لایه طلا است که روی شیشه به روش کندوپاش انباشت شده است. به منظور چسبندگی بهتر قبل از لایه نشانی طلا، یک لایه نازک کروم به ضخامت $3nm$ روی شیشه انباشت شده است. زیرلایه Au دارای ساختار fcc با ثابت شبکه $4/08\text{\AA}$ و زیرلایه Cu دارای ساختار fcc با ثابت شبکه $3/61\text{\AA}$ می‌باشد. به منظور کنترل مساحت نمونه‌ها ابتدا سطح زیرلایه به جز ناحیه مورد نظر برای انباشت با مساحت مشخص پوشانده شد. برای جلوگیری از اکسیداسیون زیرلایه‌های Cu بلافاصله پس از آماده‌سازی درون الکترولیت غوطه‌ور گردیدند.

سلول الکتروشیمیایی حاوی الکترولیت، الکتروودکار (کاتد یا زیرلایه)، الکتروود ثانویه از جنس پلاتین و الکتروود مرجع کالومل اشباع (SCE) می‌باشد که کنترل پتانسیل روی سطح زیرلایه توسط این الکتروود انجام می‌پذیرد. در این آزمایش الکترودهای کار و ثانویه با صفحات موازی به فاصله حدود $10cm$ و دقیقاً در مقابل هم قرار می‌گیرند. برای کاهش مقاومت اهمی و جلوگیری از افت پتانسیل در الکترولیت، فاصله الکترودهای مرجع و کار بسیار کم‌تر از این مقدار و حدود $0/5cm$ در نظر گرفته شد. پس از انجام عملیات لایه نشانی اکسید شدن لایه‌های نازک سرب برای جلوگیری از اکسیداسیون درون محفظه خلا قرار گرفتند. شکل ۱ یک سل الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ولتاموگرام چرخه‌ای به دست آمده برای زیرلایه Cu

می‌باشد. V اختلاف بین R و M و متناسب با ضخامت لایه نازک می‌باشد.



شکل ۳- نمای شماتیک اندازه‌گیری ضخامت با استفاده از Dektak3

فیلم‌های نازک تهیه شده با استفاده از دستگاه XRD در گستره‌ی $80^\circ - 30^\circ = 2\theta$ توسط تابش $CuK\alpha$ با طول موج $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ مورد آنالیز قرار گرفتند. شدت قله‌های مربوط به Pb نسبت به قله‌های زیرلایه Cu و Au خیلی کم‌تر است. لذا برای حصول اطمینان از انباشت لایه نازک Pb، محور مربوط به شدت، به صورت لگاریتمی انتخاب شده است تا قله‌هایی که شدت بسیار کمی دارند نمایان شوند. با استفاده از رابطه‌ی ۱ که مربوط به ساختارهای مکعبی است، می‌توان از الگوی پراش پرتوهای X پارامترهای شبکه از جمله ثابت شبکه را به دست آورد. به این منظور با در نظر گرفتن اندیس‌های میلر در هر قله می‌توان ثابت شبکه را محاسبه و نتیجه را بر حسب $F(\theta) = \cos^2 \theta / \sin \theta + \cos^2 \theta / \theta$ رسم کرد. با

در جریان رویش آندی بازه پتانسیلی وجود دارد که فرآیند کنده شدن (اکسایش) در آن اتفاق می‌افتد (پتانسیل مربوط به قله آندی) در شکل ۲ دو قله آندی دیده می‌شود که با D_1 و D_2 نشان داده شده‌اند و به ترتیب در پتانسیل‌های $0.59V$ و $0.1V$ اتفاق می‌افتد. D_1 مربوط به انحلال توده سرب و D_2 مربوط به انحلال تک‌لایه اولیه Pb است. لایه نشانی در مد CHC تحت پتانسیل ثابت و برای ضخامت‌های مختلف انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در مد CHC پارامترهای ولتاژ و بار به دستگاه پای پتانسیل اعمال می‌گردد.

پس از لایه‌نشانی ضخامت لایه‌ها با استفاده از دستگاه Dektak3 اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری ضخامت به وسیله دستگاه Dektak3 باید لایه نازک مورد نظر بر روی زیرلایه به صورت پله باشد. سوزن این دستگاه بر روی لایه حرکت می‌کند. شروع حرکت سوزن قبل از پله بوده و حرکت آن تا بعد از پله ادامه دارد. حرکت عمودی سوزن به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس تقویت و ثبت می‌گردد. اختلاف عمودی قبل و بعد از پله ضخامت لایه را نشان می‌دهد. تصویر شماتیک این دستگاه در شکل ۳ آورده شده است. در این شکل R مربوط به ضخامت قبل از پله و M مربوط به ضخامت بعد از پله

۴ مربوط به نمودار لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Cu و با ضخامت ۴۸۲nm می‌باشد. اطلاعات حاصل از این نمودار در جدول ۱ گردآوری شده است. با استفاده از داده‌های جدول ۱ نمودار a بر حسب $F(\theta) = \cos^2 \theta / \sin \theta + \cos^2 \theta / \theta$ رسم شده است (شکل ۵). با توجه به عرض از مبدا نمودار شکل ۵ مقدار ۰/۴۹۵۱nm برای ثابت شبکه لایه با ضخامت ۴۸۲nm محاسبه می‌شود که به مقدار واقعی آن (۰/۴۹۳nm) نزدیک است. اختلاف در مقدار محاسبه شده با ثابت شبکه‌ی استاندارد می‌تواند به دلیل خطای اندازه‌گیری و استرس‌هایی باشد که به لایه وارد می‌شود. شکل ۶ مربوط به نمودار لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Cu و با ضخامت ۱۸۳۲nm می‌باشد. جدول ۲ نتایج حاصل از این نمودار را نشان می‌دهد.

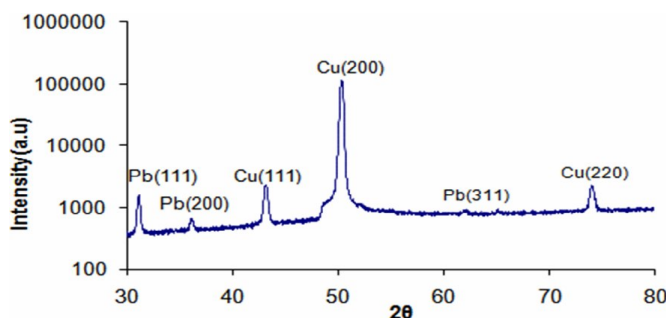
این روش تأثیر خطاهای تصادفی و سیستماتیک در اندازه‌گیری θ به حداقل می‌رسد و محل تقاطع این خط با محور قائم که از برون‌یابی منحنی به دست می‌آید مقدار دقیق ثابت شبکه را نشان می‌دهد [۲۰].

$$d = \frac{a}{\sqrt{k^2 + h^2 + l^2}} \quad (1)$$

قطر تقریبی نانوبلورهای Pb نیز با استفاده از رابطه‌ی شرر محاسبه می‌شود.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

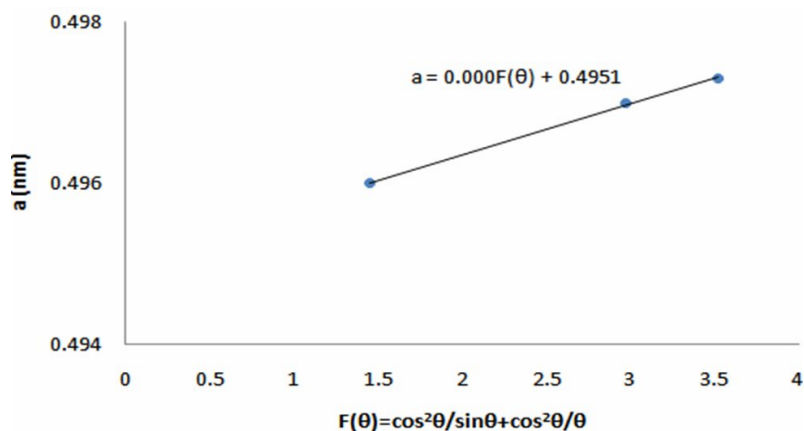
که در این رابطه D اندازه بلورک‌ها، θ پهنای نیم بیشینه قله پراش برحسب رادیان، λ طول موج پرتو ایکس و β ضریبی است که به شکل بلورها، توزیع آن‌ها و طول موج پرتو ایکس بستگی دارد و معمولاً بین ۰/۹ و ۱ است. در این کار مقدار β مساوی ۱ در نظر گرفته شده است. شکل



شکل ۴- آنالیز XRD لایه نازک Pb بر روی زیرلایه‌ی Cu با ضخامت ۴۸۲nm

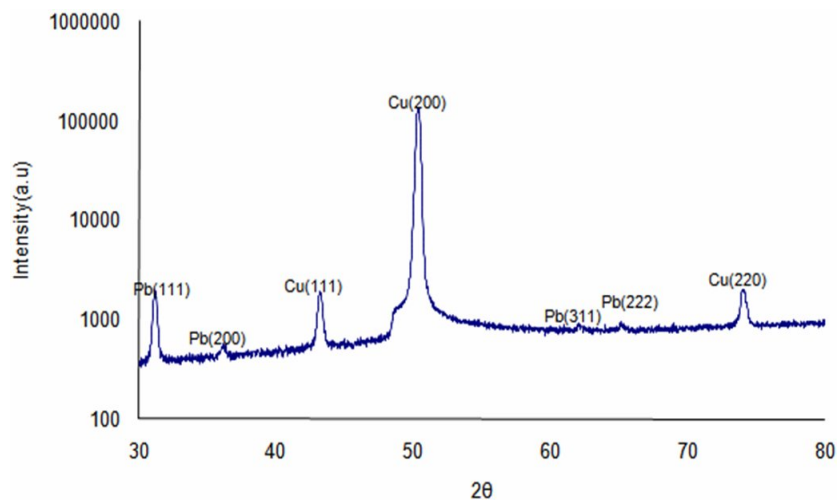
جدول ۱- داده‌های حاصل از XRD لایه نازک Pb بر روی زیرلایه‌ی Cu با ضخامت ۴۸۲nm

جهت‌گیری اصلی ساختار	فاصله صفحات d (Å)	زاویه براگ (2θ)	پهنای نیمه ماکزیمم قله‌ها (FWHM)	ثابت شبکه a(nm)	اندازه بلورک‌ها (nm)
(۱۱۱)	۲/۸۷۱۰۵	۳۱/۱۲۶۲	۰/۳۱۴۹	۰/۴۹۷	۲۶/۲
(۲۰۰)	۲/۴۸۴۸۵	۳۶/۱۱۸۲	۰/۳۱۴۹	۰/۴۹۷	۲۶/۵
(۳۱۱)	۱/۴۹۵۶۲	۶۱/۹۹۹۹	۰/۴۷۲۳	۰/۴۹۶	۱۹/۶



شکل ۵- نمودار ثابت شبکه a بر حسب $F(\theta)$ برای نمونه با ضخامت 482nm

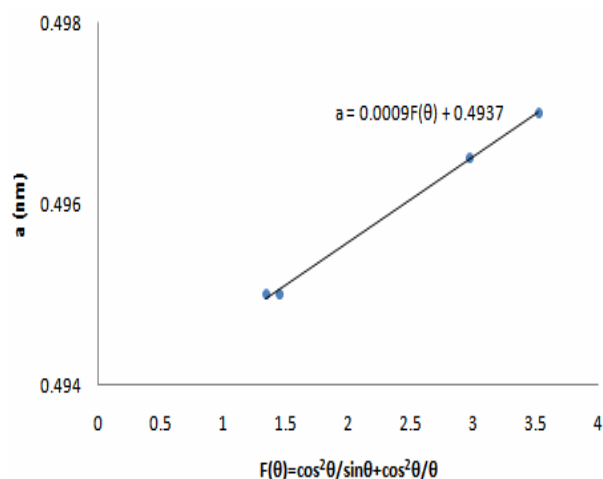
همان‌گونه که شکل ۷ نشان می‌دهد، برای لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Cu با ضخامت 1832nm ثابت شبکه مساوی مقدار 0.4937nm به دست می‌آید که با مقدار استاندارد آن تقریباً برابر است.



شکل ۶- آنالیز XRD لایه نازک Pb بر روی زیرلایه Cu با ضخامت 1832nm

جدول ۲- داده‌های حاصل از XRD لایه نازک Pb بر روی زیرلایه Cu با ضخامت 1832nm

جهت‌گیری اصلی ساختار	فاصله صفحات d (Å)	زاویه براگ (2θ)	پهنای نیمه ماکزیمم قله‌ها (FWHM)	ثابت شبکه a (nm)	اندازه بلورک‌ها (nm)
(۱۱۱)	۲/۸۶۸۹۸	۳۱/۱۴۹۱	۰/۱۱۸۱	۰/۴۹۷	۷۰/۰
(۲۰۰)	۲/۴۸۲۴۹	۳۶/۱۵۳۸	۰/۳۱۴۹	۰/۴۹۶	۲۶/۶
(۳۱۱)	۱/۴۹۳۵۰	۶۲/۰۹۷۷	۰/۴۷۲۳	۰/۴۹۵	۱۹/۶
(۲۲۲)	۱/۴۳۰۲۲	۶۵/۱۷۵۱	۰/۴۷۲۳	۰/۴۹۵	۲۰/۰

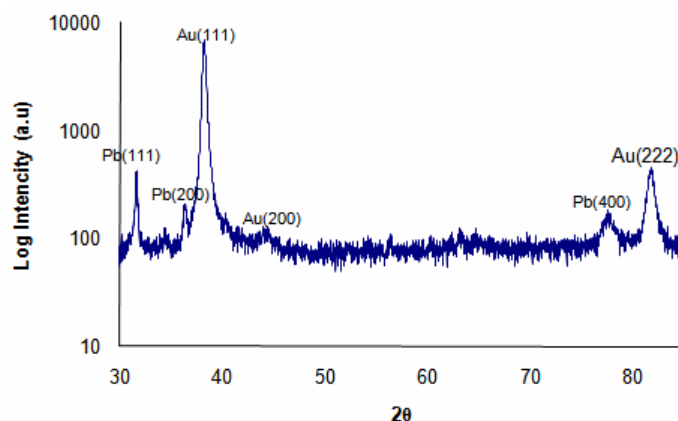


شکل ۷- نمودار ثابت شبکه a بر حسب $F(\theta)$ برای نمونه با ضخامت 1832nm

XRD مربوط به لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Au، ساختار مرکز سطحی (fcc) با جهت‌گیری غالب در راستای (۱۱۱) را برای لایه انباشت شده و زیرلایه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود ساختار لایه نازک ایجاد شده از زیرلایه پیروی می‌کند. این امر می‌تواند به نزدیک بودن ثابت شبکه‌ی لایه و زیرلایه نسبت داده شود. میانگین اندازه بلورک‌ها برای لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Au، $33/5\text{nm}$ محاسبه شده است. برای بررسی آنالیز کمی از میزان سرب در لایه‌های انباشت شده بر روی زیرلایه‌های مس و طلا از آنالیز تفکیک انرژی پرتوایکس (EDX) استفاده شده است. برای انجام این آنالیز از دستگاه SEM مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس هلند موجود در دانشگاه تربیت مدرس استفاده گردیده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ طرح EDX را برای لایه‌های انباشت شده بر روی زیرلایه‌های مس و طلا و به ترتیب با ضخامت‌های 482nm و 193nm نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این آنالیز نشان می‌دهد که لایه‌های انباشت شده از خلوص نسبتاً خوبی برخوردار بوده‌اند.

نتایج حاصل از آنالیز XRD مربوط به لایه‌های نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Cu (جدول‌های ۱ و ۲) نشان می‌دهد که لایه نازک Pb دارای ساختار مرکز سطحی (fcc) با جهت رشد ترجیحی در راستای (۱۱۱) است؛ در صورتی که جهت‌گیری ترجیحی زیرلایه Cu در راستای (۲۰۰) می‌باشد. این نشان می‌دهد که به دلیل اختلاف زیاد بین ثابت شبکه‌ی لایه و زیرلایه یک ناهماهنگی شبکه‌ای^۲ ایجاد گردیده است که به موجب آن جهت رشد لایه از جهت رشد زیرلایه تبعیت نمی‌کند.

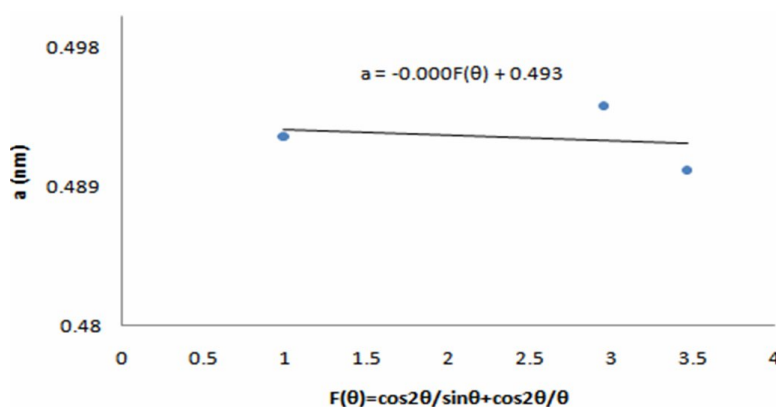
با افزایش ضخامت لایه از 482nm به 1832nm پیک مرتبه‌ی دوم (۱۱۱) ظاهر می‌گردد که شدت آن کم می‌باشد و با افزایش ضخامت، شدت پیک تقویت و نمایان می‌شود. با افزایش ضخامت لایه، اندازه متوسط بلورک‌ها نیز افزایش می‌یابد. شکل ۸ نمودار لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Au با ضخامت 627nm را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آنالیز XRD لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Au در جدول ۳ مرتب شده است. با توجه به نمودار شکل ۹ برای لایه نازک Pb انباشت شده بر روی زیرلایه Au ثابت شبکه $0/493\text{nm}$ به دست می‌آید که با دقت خوبی برابر با مقدار استاندارد آن است. طیف



شکل ۸- آنالیز XRD لایه نازک Pb بر روی زیرلایه Au با ضخامت ۶۲۷nm

جدول ۳- داده‌های حاصل از XRD لایه نازک Pb بر روی زیرلایه Au با ضخامت ۶۲۷nm

اندازه بلورک‌ها (nm)	ثابت شبکه a (nm)	پهنای نیمه ماکزیمم قله‌ها (FWHM)	زاویه براگ (2θ)	فاصله صفحات d (Å)	جهت گیری اصلی ساختار
۵۲/۳	۰/۴۹۰	۰/۱۵۷۴	۳۱/۵۹۷۳	۲/۸۲۹۳	(۱۱۱)
۳۵/۴	۰/۴۹۴	۰/۲۳۶۲	۳۶/۳۲۴۸	۲/۴۷۱۱۹	(۲۰۰)
۱۲/۹	۰/۴۹۲	۰/۷۸۷۲	۷۷/۴۹۸۷	۱/۲۳۰۶۸	(۴۰۰)



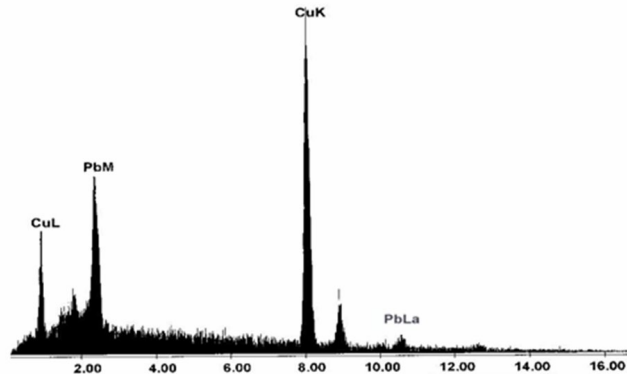
شکل ۹- نمودار ثابت شبکه a بر حسب $F(\theta)$ برای نمونه با ضخامت ۶۲۷nm

FESEM از لایه‌های سرب انباشت شده بر روی زیرلایه‌ی مس در شکل ۱۲- الف برای ضخامت ۴۸۲nm و شکل ۱۲- ب برای ضخامت ۱۸۳۲nm نشان داده شده است. هم‌چنین تصاویر FESEM از لایه‌های سرب انباشت شده

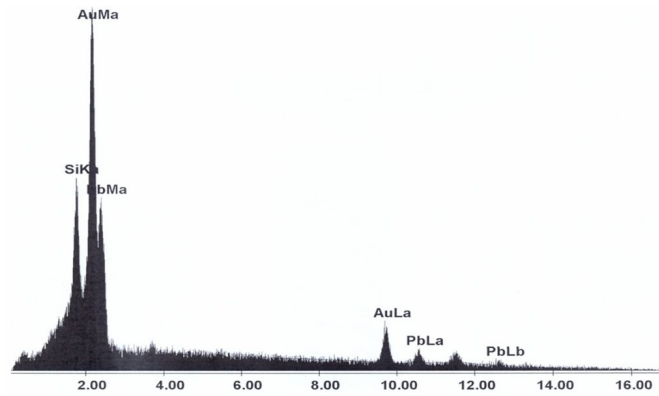
به منظور بررسی اثر تغییر ضخامت بر نانو ساختار لایه‌های نازک Pb نمونه‌های تولید شده توسط دستگاه FESEM مدل S-4160 ساخت شرکت هیتاچی موجود در دانشکده برق دانشگاه تهران مطالعه شدند. تصاویر

می‌گردد. با افزایش ضخامت لایه به تدریج دانه‌ها به یکدیگر متصل شده و دانه‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شود، در نتیجه با افزایش ضخامت نمونه، اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر می‌گردد [۲۱].

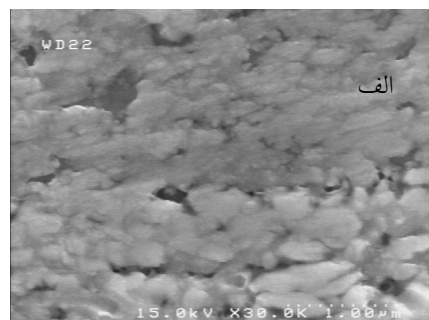
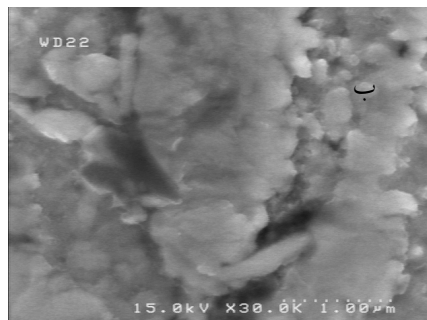
بر روی زیرلایه طلا در شکل ۱۳-الف برای ضخامت ۱۹۳nm، شکل ۱۳-ب برای ضخامت ۳۱۳nm و شکل ۱۳-ج برای ضخامت ۶۲۷nm را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه، اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر



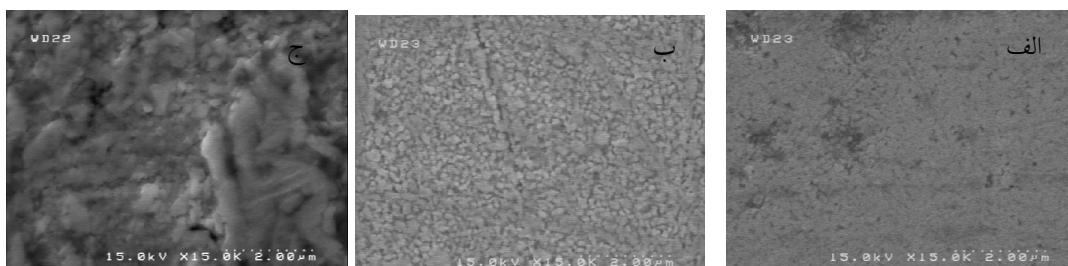
شکل ۱۰- آنالیز EDX لایه‌ی نازک Pb بر روی زیرلایه‌ی Cu با ضخامت ۴۸۲nm



شکل ۱۱- آنالیز EDX لایه‌ی نازک Pb بر روی زیرلایه‌ی Au با ضخامت ۱۹۳nm



شکل ۱۲- الف و ب: تصاویر FE-SEM از دو نمونه رشد یافته با ضخامت‌های ۴۸۲nm و ۱۹۳nm

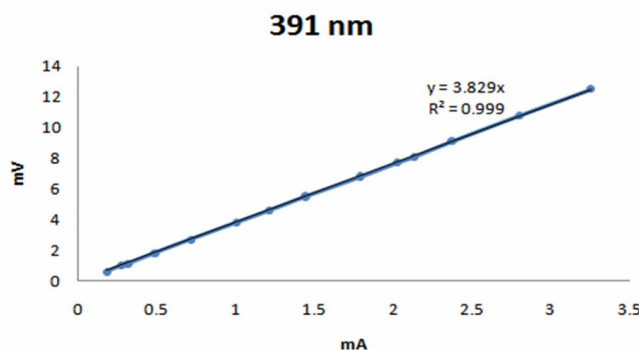


شکل ۱۳- الف، ب و ج: تصاویر FE-SEM از سه نمونه رشد یافته با ضخامت‌های ۱۹۳nm، ۳۱۳nm و ۶۲۷ nm

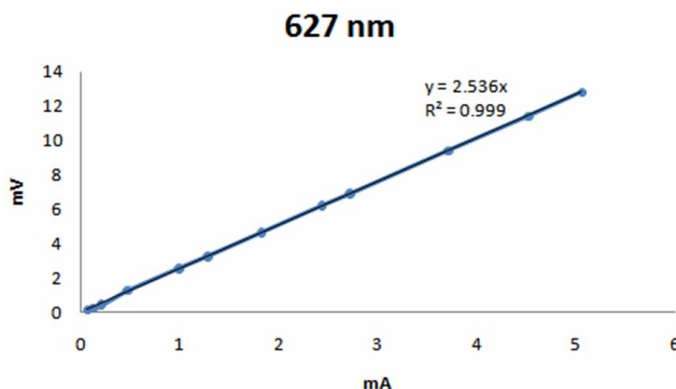
نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه، مقاومت الکتریکی لایه کاهش می‌یابد. بین مقادیر مقاومت ویژه با ضخامت‌ها ارتباطی مشاهده نشده است. با افزایش ضخامت، تکامل تدریجی ساختار لایه صورت می‌گیرد و دانه‌ها با افزایش ضخامت لایه رشد می‌کنند. رشد دانه‌بندی در اثر ضخامت منجر به کاهش پراکندگی از مرز دانه‌ها شده و در نتیجه تحرک حامل‌های بار زیاد می‌شود و در نهایت باعث کاهش مقاومت لایه‌ها می‌شود [۲۲]. در ضخامت‌های بالا با افزایش ضخامت در تعداد مرز دانه‌ها تفاوت چشم‌گیری حاصل نمی‌شود در نتیجه مقاومت ویژه نمونه در ضخامت‌های بالا به یک مقدار ثابت می‌رسد. مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های نازک فلزی در مقایسه با مقدار کپه‌ای آن‌ها بیش‌تر است که ناشی از اثرات دانه‌بندی، پراکندگی الکترون از ناخالصی‌ها، تهی‌جاها و دررفتگی‌هاست [۲۳].

معمولاً برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک از روش چهارسوزنی استفاده می‌شود. در این روش تأثیر مقاومت نقاط تماس و سیم‌های رابط به حداقل می‌رسد. در روش چهارسوزنی معمولاً یک جریان الکتریکی ثابت بین دو نقطه برقرار می‌گردد و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه دیگر اندازه‌گیری می‌شود. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودار ولتاژ-جریان برای نمونه‌های انباشت شده بر روی زیرلایه طلا و با ضخامت‌های ۶۲۷nm و ۳۹۱nm رسم شده است. شیب نمودار، مقاومت الکتریکی نمونه را نشان می‌دهد. با قرار دادن R در رابطه ۲ می‌توان مقاومت ویژه را به دست آورد. نتایج حاصل در جدول ۵ آورده شده است.

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3)$$



شکل ۱۴- نمودار ولتاژ-جریان برای نمونه انباشت شده با ضخامت ۳۹۱nm



شکل ۱۵- نمودار ولتاژ- جریان برای نمونه انباشت شده با ضخامت ۶۲۷nm

جدول ۵- تغییرات مقاومت برای لایه‌های با ضخامت‌های متفاوت در دمای محیط

ضخامت نمونه (nm)	R، مقاومت الکتریکی، (Ω)	مقاومت ویژه، ρ، (Ωcm)	G، رسانایی الکتریکی، (Ω ⁻¹)	رسانندگی ویژه، (Ωcm) ⁻¹
۳۹۱	۳/۸۲۹۵	۰/۰۰۰۷	۰/۲۶	۱۴۲۸
۶۲۷	۲/۵۳۶۲	۰/۰۰۰۷	۰/۳۹	۱۴۲۸

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این کار لایه‌های نازک Pb به روش ساده و ارزان الکتروانباشت بر روی زیرلایه‌های Cu و Au با موفقیت لایه نشانی شدند و با استفاده از آنالیز ولتامتر چرخه‌ای (CV) ولتاژ بهینه انباشت ۰/۸V به دست آمد. خواص ساختاری نمونه‌ها به کمک آنالیزهای XRD و EDX مطالعه شد. جهت ترجیحی رشد برای فیلم‌های نازک سرب که روی زیرلایه طلا رشد یافته‌اند از جهت ترجیحی زیرلایه خود پیروی می‌کنند در حالی که فیلم‌هایی که بر روی زیرلایه Cu با جهت ترجیحی (۱۰۰) رشد یافته‌اند، جهت ترجیحی (۱۱۱) را دارند. مقاومت الکتریکی فیلم‌های نازک سرب به روش وان در پائو و با آرایش چهار سوزنی اندازه‌گیری شدند و بستگی مقاومت الکتریکی به ضخامت فیلم‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

منابع

- [2] Wu, G.Y.; Schwarzacher, W.; "The effect of halide additives on the electrodeposition of Pb on polycrystalline Au", *Electroanalytical Chemistry* 629 (2009) 164-168.
- [3] Pavlov, D.; "Processes in positive lead/acid battery plates during soaking prior to formation", *Power Sources* 42 (1993) 345-363.
- [4] Rashkova, B.; Guel, B.; Potzchke, T.; Staikov, G.; Lorenz, J.; "Electrodeposition of Pb on n-Si(111)", *Electrochimica Acta* 43 (1998) 3021-3028.
- [5] Maldonado, S.; Lewis, N.S.; "Behavior of Electrodeposited Cd and Pb Schottky Junctions on CH₃-Terminated n-Si(111)", *Surfaces Electrochemical Society* 156 (2009) H123-H128.
- [6] Ehlers, C.; Konig, U.; Staikov, G.; Schultze, J.W.; "Role of surface states in electrodeposition of Pb on n-Ge(111)", *Electrochim. Acta* 47 (2001) 379-385.
- [7] Mascaro, L.H.; Kaibara, E.K.; Bulhoes, L.O.; "An Electrochromic System Based on the Reversible Electrodeposition of Lead", *Electrochem. Soc* 144 (1997) L273- L274.
- [1] Wu, G.Y.; Bae, S.E.; Gewirth, A.A.; Gray, J.; Zhu, X.D.; Moffat, T.P.; Schwarzacher, W.; "Electrodeposition on polycrystalline Cu in the presence and absence of Cl⁻: a combined oblique incidence reflectivity difference and in situ AFM study", *Surface Science* 601 (2007) 1886-1891.

- Multilayers”, department of physics, Bristol University, UK (1997).
- [16] Paunovic, M.; Schlesinger, M.; “Fundamentals of electrochemical deposition”, second Ed, A. John Wiley & Sons, INC, (2006).
- [17] Ziegler, J.C.; Scherb, G.; Bunk, O.; Kazimirov, A.; Cao, L.X.; Kolb, D.M.; Johnson, R.L.; Zegenhagen, J.; “Pb deposition on n-Si(111):H electrodes: an in situ X-ray study”, *Surface Science* 452 (2000) 150-160.
- [18] Vasilic, R.; Vasiljevic, N.; Dimitrov, N.; “Open Circuit Potential Stability of Pb UPD layer on Cu(111) Face”, *Electroanal Chem* 580 (2005) 203-207
- [19] Nasirpour, F.; “On the electrodeposition mechanism of Pb on copper substrate from a perchlorate solution studied by electrochemical quartz crystal microbalance”, *Ionics* 17 (2011) 331-337.
- [20] Sahraei, R.; Motedayen Aval, G.; Goudarzi, A.; “Compositional, structural and optical study of nanocrystalline ZnS thin films prepared by a new chemical bath deposition route”, *Alloys and Compounds* 466 (2008) 488-492.
- [21] Ikhmayies, S.J.; Bitar, R.N.A.; “Effect of Film thickness on the Electrical and Structural Properties of CdS: In Thin Films”, *American Journal of Applied Science* 5 (2008) 1141-1143.
- [22] Akhavan, O.; Moshfegh, A.Z.; “Thickness dependence on thermal stability of sputtered Ag nanolayer on Ti/Si(100)”, *Applied Surface Science* 254 (2007) 548-551.
- [23] Joshi, N.; Debnath, A.K.; Aswal, D.K.; Muthe, K.P.; Kumar, M.S.; Gupta, S.K.; Yakhmi, J.V.; “Morphology and resistivity of Al thin films grown on Si(111) by molecular beam epitaxy”, *Vacuum* 79 (2005) 178-185.
- [8] Bulhoes, L.O.S.; Mascaro, L.H.; “Electrochemical nucleation of lead and copper on indium-tin oxide electrodes”, *Solid State Electrochem* 8 (2004) 238-243.
- [9] Avellaneda, C.O.; Napolitano, M.A.; Kaibara, E.K.; Bulhoes, L.O.S.; “Electrodeposition of lead on ITO electrode: influence of copper as an additive”, *Electrochim. Acta* 50 (2005) 1317-1321.
- [10] Prado, C.; Wilkins, S.J.; Grundler, P.; Marken, F.; Compton, R.G.; “Electrodeposition of lead at boron-doped diamond film electrodes: Effect of temperature”, *Electroanalysis* 15 (2003) 1011-1016.
- [11] Saterlay, J.; Gutierrez, C.A.; Taylor, M.P.; Marken, F.; Compton, R.G.; “Sono-Cathodic Stripping Voltammetry of Lead at a Polished Boron-Doped Diamond Electrode: Application to the Determination of Lead in River Sediment”, *Electroanalysis* 11 (1999) 1083-1087.
- [12] Doulakas, L.; Novy, K.; Stucki, S.; Comninellis, Ch.; “Recovery of Cu, Pb, Cd and Zn from synthetic mixture by selective electrodeposition in chloride solution”, *Electrochim. Acta* 46 (2000) 349-356.
- [13] Exposito, E.; Iniesta, J.; Gonzalez-Garcia, J.; Montiel, V.; Aldaz, A.; “Lead electrowinning in an acid chloride medium”, *Power Sources* 92 (2001) 260-266.
- [14] Carlos, I.A.; Siqueira, J.L.P.; Finazzi, G.A.; Almeida, M.R.H.; “Voltammetric study of lead electrodeposition in the presence of sorbitol and morphological characterization”, *Power Sources* 117 (2003) 179-186
- [15] Nabiyouni, G.; PhD thesis, “Giant Magnetoresistance in Electrodeposited