

## مشخصه‌یابی اتصال Ni/Cu براساس شیوه لایه‌نشانی الکتروشیمیایی نیکل برای سلول‌های خورشیدی مولتی کریستال سیلیکونی

نگین معنوی زاده \*

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۳/۲۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۸/۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۸/۶

**چکیده:** در این مقاله، ساختار Ni/Cu به عنوان اتصال اهمی بر روی زیرلایه مولتی کریستال سیلیکون به روش الکتروشیمیایی (آبکاری الکتریکی) لایه‌نشانی و مقاومت الکتریکی آن بهینه شده است. به منظور ایجاد ساختار مورد نظر، نیکل به دو روش آبکاری غیرالکتریکی و الکتریکی بر روی زیرلایه‌های  $n^+$ -Si لایه‌نشانی شده و پس از گرمادهی (جهت بهبود خواص کریستالی)، لایه‌ای از مس به روش آبکاری الکتریکی به منظور کاهش مقاومت سطحی و تماس بر روی لایه نیکل قرار گرفته است. به منظور بررسی ساختار بلوری، ساختار سطحی و عناصر تشکیل دهنده این لایه‌ها به ترتیب از آنالیزهای SEM، XRD و EDX و همچنین برای بررسی ناهمواری موجود در سطح نمونه‌ها از DEKTAK استفاده شده است. با توجه به ناهمواری زیاد در سطح زیرلایه مولتی کریستال سیلیکون، در حین لایه‌نشانی از دستگاه ماورای صوت برای دستیابی به تماس‌های اهمی با چسبندگی بسیار خوب و کیفیت بالا استفاده شده است. پس از الگودهی نقاب مورد نظر، برای اندازه‌گیری مقاومت تماس از روش مدل خط انتقال (TLM) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند ساختاری که لایه نیکل در آن به روش آبکاری غیرالکتریکی لایه‌نشانی شده، مقاومت ویژه تماس  $8.9 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$  بوده و لایه نیکل از چسبندگی لازم برخوردار نیست. ساختاری که نیکل در آن به روش آبکاری الکتریکی لایه‌نشانی شده، دارای مقاومت ویژه تماس  $2.2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$  و از کیفیت بالاتری برخوردار بوده که مقاومت تماس مناسبی برای اتصالات جلویی در سلول‌های خورشیدی مولتی کریستال سیلیکون به‌شمار می‌آید.

**کلمات کلیدی:** آبکاری الکتریکی، آبکاری غیرالکتریکی، سلول خورشیدی، اتصال Ni/Cu، مقاومت سطحی.

## Characterization of Ni/Cu Contacts Based on Nickel Electrochemical Method for Multicrystalline Silicon Solar Cells

Negin Manavizadeh\*

K. N. Toosi University of Technology, Department of Electrical Engineering, Tehran, Iran

**Abstract:** In this paper, a low-cost Ni/Cu structure as an ohmic contact was fabricated on multicrystalline  $n^+$ -Si by using electrochemical method and the electrical resistivity of the contact was optimized. Ni was deposited on substrates by two methods: electroless plating and electroplating. After Ni electroplating, samples were annealed at various temperature and then an electroplated copper layer was formed on Ni film in order to reduce the sheet and contact resistance with using an ultrasonic system one can obtain a film with the lower surface roughness and the higher quality. Post treatments of the coated Ni improved the crystalline structure of the electroplated layer. SEM, XRD, and EDX analyses were used to investigate the surface morphology, structure and composition of deposited films. The surface roughness was investigated by profile stylus DEKTAK. Contact resistance of the Si/Ni/Cu structure was measured using the Transmission Line Model (TLM) method. Results demonstrate that specific contact resistance for the electroless plated Ni/Cu structure is  $8.9 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ , while an optimum specific contact resistance of  $2.2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$  is obtained for structure with electroplated Ni layers.

**Keywords:** Electroplating, Electroless plating, Solar Cell, Ni/Cu contact, Contact Resistance.

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: تهران، خیابان شریعتی، نرسیده به پل سید خندان، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تلفن: ۸۴۰۶۲۲۸۹، پیام نگار: manavizadeh@eetd.kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

از آنجا که خورشید یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر بدون گاز سمی  $CO_2$  به شمار می‌آید، تحقیقات فراوانی برای دستیابی به سلول‌های خورشیدی با راندمان بالا و کم هزینه در حال انجام است به طوری که در حال حاضر بازار فتوولتائیک با نرخ ۴۰٪-۳۵ در سال، در حال رشد است. از جمله راهکارهای پیشنهادی جهت کاهش هزینه می‌توان به کاهش ضخامت ویفر، جایگزینی مولتی کریستال سیلیکونی با تک کریستال آن و به کارگیری روش‌های کم هزینه برای ساخت اتصالات فلزی اشاره کرد. امروزه ساخت اتصالات فلز- نیمه‌هادی در ادوات الکترونیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از انواع این اتصالات، اتصال اهمی بوده که باید دارای مقاومت بسیار کمی باشد تا افت ولتاژ محسوسی در آنها انجام نگیرد و همچنین بیشینه توان ممکن به سیستم مصرف کننده منتقل شود. یکی از روش‌هایی که امروزه برای ساخت اتصالات فلزی مختلف، از جمله اتصالات اهمی، به کار می‌رود روش الکتروشیمیایی یا آبکاری الکتریکی می‌باشد. این شیوه در مقایسه با سایر روش‌های لایه‌نشانی مانند سیستم‌های خلا از هزینه بسیار کمتری برخوردار بوده و همچنین دسترسی به چنین سیستمی آسان‌تر است [۱] به همین علت بهره‌گیری از چنین روشی در ساخت سلول‌های خورشیدی، مدارهای مجتمع با مقیاس وسیع [۲ و ۳] و دیگر ادوات الکتریکی و الکترونیکی در حال گسترش است. در صنعت فتوولتائیک برای ساخت سلول‌های خورشیدی از ساختارها، روش‌ها و مواد مختلفی استفاده می‌شود [۷-۳]. در این مقاله از ساختار نیکل-مس برای اتصالات اهمی و لایه‌نشانی آنها با شیوه آبکاری الکتریکی استفاده شده است که مزایای فراوانی نظیر عدم آلودگی پوشش با رسوب نیکل-فسفر و سرعت آبکاری نسبت به آبکاری غیر الکتریکی دارد [۹ و ۸].

با استفاده از این ساختار می‌توان علاوه بر داشتن بازده بالا، هزینه ساخت این سلول‌ها را کاهش داد. ساختار Ni/Cu نسبت به دیگر ساختارهای رایج در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با بازده بالا، مانند Ti/Pd/Ag هزینه پایین‌تری داشته و مقاومت تماس آن نیز کمتر است [۱۱ و ۱۲]. در این ساختار از نیکل به عنوان سدی برای جلوگیری از نفوذ مس به

زیرلایه سیلیکون و همچنین برای ایجاد اتصال اهمی مناسب استفاده می‌شود. همچنین از مس به علت مقاومت الکتریکی پایین و قابلیت بالای آن در ممانعت از مهاجرت الکترون‌ها استفاده شده است [۱۳].

به منظور مطالعه ساختار Ni/Cu از آنالیزهای SEM (Scanning Electron Microscopy)، XRD (X-Ray Diffraction)، EDX (Energy Dispersive X-ray) و سیستم اندازه‌گیری Keithly ۲۳۶۱ به ترتیب برای بررسی مرفولوژی سطحی نمونه‌ها، ساختار کریستالی، تعیین میزان عناصر موجود و اندازه‌گیری مقاومت تماس بهره گرفته شده است. همچنین از سیستم DEKTAK جهت بررسی میزان ناهمواری سطح نمونه‌ها استفاده شده است.

## ۲- روش تحقیق

## ۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

انتخاب فلزاتی نظیر مس و نیکل و همچنین زیرلایه‌های مولتی کریستال سیلیکون در پایین آوردن هزینه نقش بسزایی دارند. در این مقاله از زیرلایه‌های مولتی کریستال سیلیکون نوع n که به میزان  $10^{17}$  اتم بر سانتی‌متر مکعب آرایش داده شده و دارای ضخامت ۳۵۰ میکرومتر و مقاومت سطحی  $40 \Omega/\square$  می‌باشد، استفاده شده است (Bayer Solar GmbH, Made in Germany). این زیرلایه به دلیل داشتن قیمت ارزان در ساخت سلول‌های خورشیدی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. نیکل و مس نیز برای پایین آوردن هزینه و همچنین مشخصه‌های الکتریکی آنها انتخاب شده‌اند.

در این نوع از ویفرها اندازه دانه‌ها به طور کلی بزرگتر از ضخامت ویفر بوده و در سطح ویفر گسترش یافته‌اند. تصویر میکروسکوپ نوری از ویفر مولتی کریستال نوع n مورد استفاده با اندازه  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

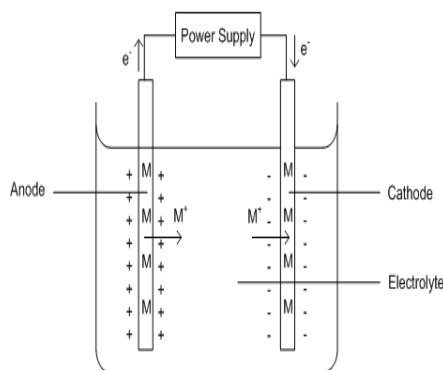
در حمام سولفاتی جدول (۱) از  $\text{NiSO}_4$  به عنوان منبع نیکل،  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$  به عنوان عامل احیا کننده،  $\text{CH}_3\text{COOH}$  به عنوان عامل کمپلکس‌ساز و  $\text{NaOH}$  به عنوان تنظیم کننده pH استفاده شده است [۱۰].

در لایه نشانی نیکل به روش آبکاری الکتریکی از حمام جدول (۲) می‌توان استفاده نمود. در این حمام از ورقه نیکل به عنوان آند در حمام استفاده می‌شود. مقادیر مورد استفاده از مواد تشکیل دهنده حمام برای این آزمایش در جدول (۲) آمده است. شکل (۲) نمای شماتیک از حمام مورد استفاده در آبکاری‌های الکتریکی و روند لایه نشانی را نشان می‌دهد.

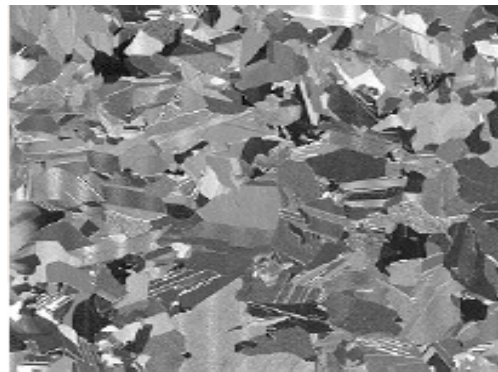
آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که لایه نیکلی که به روش آبکاری الکتریکی بر روی زیرلایه‌ها لایه نشانی می‌شوند، از چسبندگی لازم برخوردار هستند. در روش آبکاری الکتریکی نیکل با استفاده از حمام واتز، از  $\text{NiSO}_4$  به عنوان منبع اصلی تأمین یون‌های نیکل،  $\text{NiCl}_2$  برای بهبود خوردگی یا انحلال آند و توزیع یکنواخت ضخامت پوشش و اسید بوریک  $\text{H}_3\text{BO}_3$  برای ثابت نگه‌داشتن pH استفاده می‌شود.

جدول ۲. حمام آبکاری الکتریکی نیکل.

$\text{NiSO}_4$	۱۹/۵ gr/lit
$\text{NiCl}_2$	۴/۵ gr/lit
$\text{H}_3\text{BO}_3$	۲/۲ gr/lit
pH	۵
T	۴۶°C



شکل ۲. شماتیک حمام مورد استفاده برای آبکاری الکتریکی.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ نوری از ویفر مولتی کریستال سیلیکون نوع n

ناهمواری ویفرهای مولتی کریستال سیلیکون در حدود  $4 \mu\text{m}$  است؛ به همین علت برای بهبود کیفیت و همچنین چسبندگی مناسب لایه‌ها، در حین لایه نشانی از دستگاه ماورای صوت استفاده شده است. نمونه‌ها با استفاده از محلول RCA (آب  $\text{DI}^1$ ، پراکسید هیدروژن و آمونیاک با نسبت ۵:۱:۱) تمیز شده و پس از آن برای از بین بردن اکسید، سطح ویفر به مدت ۲-۳ دقیقه در محلول HF ۱۰٪ قرار می‌گیرند.

## ۲-۲- لایه نشانی نیکل به روش آبکاری

نیکل را به دو روش مختلف می‌توان بر روی زیرلایه، لایه نشانی کرد: (۱) لایه نشانی به روش آبکاری غیرالکتریکی (۲) لایه نشانی به روش آبکاری الکتریکی یا الکتروشیمیایی. لازم به ذکر است که در انجام لایه نشانی به هر دو روش، از دستگاه ماورای صوت استفاده شده است. در آبکاری شیمیایی به روش غیرالکتریکی که حمام آن دارای مشخصات جدول (۱) است، لایه ایجاد شده چسبندگی لازم را نخواهد داشت؛ که چنین امری برای ساخت اتصالات سلول خورشیدی مناسب نیست.

جدول ۱. حمام آبکاری غیر الکتریکی نیکل.

$\text{NiSO}_4$	۱۷ gr/lit
$\text{NaH}_2\text{PO}_2$	۱۴ gr/lit
$\text{CH}_3\text{COOH}$	۱۲ gr/lit
$\text{NaOH}$	pH مورد نیاز برای تأمین
pH	۵
T	۹۰°C

## ۲-۲- لایه نشانی مس به روش آبکاری الکتریکی

به منظور ایجاد ساختار Ni/Cu، از سیستم آبکاری الکتریکی برای لایه نشانی مس استفاده شده است. به این منظور با استفاده از حمام سولفات مس [۱۴] لایه‌ای از مس بر روی نمونه قرار داده می‌شود. روند لایه نشانی مشابه با شکل (۲) بوده با این تفاوت که در این مرحله از آند مسی و مواد جدول (۳) استفاده شده است.

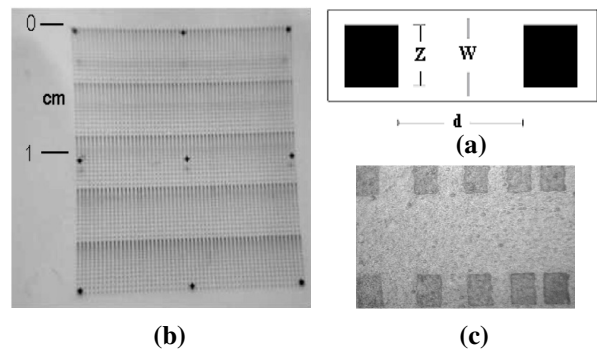
جدول ۳. حمام سولفاتی مس.

CuSO <sub>4</sub>	۱۶۰ gr/lit
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	۶۰ gr/lit
pH	۰/۵-۱

## ۲-۳- اندازه‌گیری مقاومت تماس به روش TLM

برای اندازه‌گیری مقاومت تماس بین فلزات نیکل و مس با مولتی کریستال سیلیکون از روش مدل خط انتقال (TLM) استفاده شده است. مقاومت کل  $R_T$  برای سیستم تماس فلز- نیمه‌رسانا از معادله (۱) به دست می‌آید [۱۵-۱۷]:

$$R_T = 2R_c + 2R_m + R_s \quad (\text{معادله ۱})$$



شکل ۳. (a) نمایی از دو تماس متوالی (b) نقاب استفاده شده برای روش TLM، (c) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه الگودهی شده توسط نقاب (b).

در معادله (۱)  $R_m$  مقاومت فلزی است که به عنوان تماس انتخاب شده و به دلیل آنکه فلزات مقاومت کمی دارند می‌توان از این جمله صرف‌نظر کرد.  $R_{sem}$  مقاومت نیمه‌رسانا و  $R_c$  مقاومت تماس می‌باشد.  $R_{sem}$  از رابطه  $R_{sem} = \rho_s (d/z)$  به دست می‌آید که در آن  $\rho_s$  مقاومت سطحی،  $d$  فاصله بین تماس‌ها و  $z$  پهنای تماس‌ها می‌باشد (شکل ۳a).

در شکل‌های ۳b و ۳c تصاویر مربوط به نقاب استفاده شده و همچنین تصویری از ساختار الگودهی مشاهده می‌گردد. در شکل ۳b مساحت هر کدام از اتصالات فلزی  $100 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  بوده و فاصله بین آنها نیز به صورت  $20 \mu\text{m}$ ،  $40 \mu\text{m}$ ،  $60 \mu\text{m}$ ، ... تغییر می‌کند.

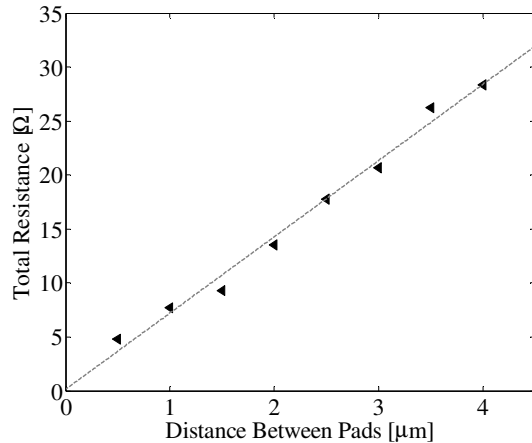
با رسم تغییرات مقاومت کل  $R$  بر حسب فاصله  $d$  و با برون‌یابی نمودار به دست آمده در نقطه  $d=0$  مقاومت تماس  $R_T = 2R_c$  به دست می‌آید. با استفاده از معادله (۲) مقاومت تماس ویژه نتیجه می‌شود:

$$\rho_s = R_c A \quad (\text{معادله ۲})$$

که در این رابطه  $A$  مساحت هریک از تماس‌ها است. با اندازه‌گیری مقاومت بین هر دو تماس متوالی توسط سیستم اندازه‌گیری مشخصه I-V به کمک سیستم Keithley 2361 و آنالیز اطلاعات به دست آمده از آن، مقاومت تماس ساختار Cu/Ni/Si قابل محاسبه می‌باشد.

## ۳- نتایج و بحث

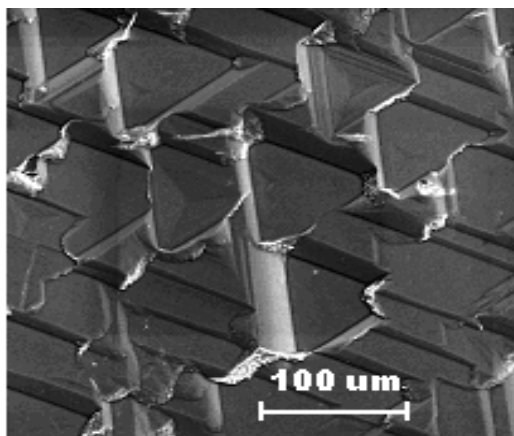
برای دستیابی به ساختار Ni/Cu، ابتدا با استفاده از حمام سولفاتی نیکل (جدول ۱) به روش آبکاری غیرالکتریکی در مدت ۱۵ دقیقه لایه‌ای از نیکل بر روی زیرلایه مولتی کریستال سیلیکون چند بلوری نوع n تشکیل گردید و سپس نمونه‌ها در دمای  $500^\circ\text{C}$  (دمای مناسب برای تشکیل سیلیساید نیکل) گرمادهی شدند. به منظور بهبود کیفیت و همچنین چسبندگی مناسب لایه‌ها به زیرلایه‌های مولتی کریستال سیلیکون (با ناهمواری زیاد)، از دستگاه ماورای صوت استفاده شده است. شکل (۴) آنالیز EDX متناظر با نیکل آبکاری شده به روش غیرالکتریکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، لایه نشانه شده دارای ۹۱٪ وزنی نیکل است. همچنین ۶٪ وزنی لایه نشانه شده را فسفر تشکیل می‌دهد که مربوط به استفاده از ماده هیپوفسفاتی در حمام می‌باشد.



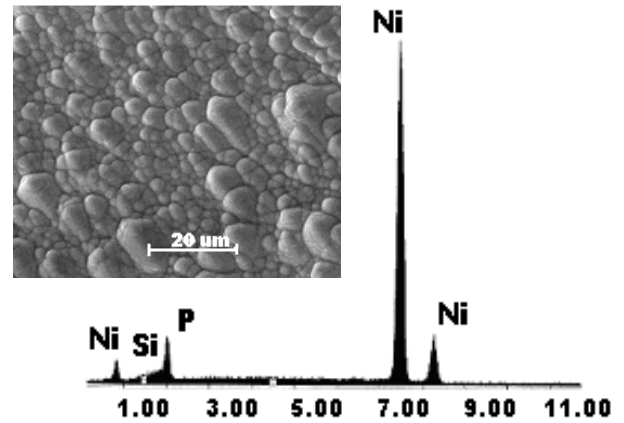
شکل ۶. نمودار تغییرات مقاومت کل برحسب فاصله میان تماس‌ها برای ساختار Si/Ni/Cu هنگامی که نیکل به روش آبرکاری غیرالکتریکی لایه‌نشانی شده باشد.

از آنجا که لایه‌های نیکل به روش آبرکاری غیرالکتریکی از چسبندگی کافی برخوردار نبودند، بار دیگر ساختار Ni/Cu با استفاده از لایه‌ای از نیکل به روش آبرکاری الکتریکی ایجاد شد. در این مرحله با استفاده از آند نیکلی (ورقه نیکل) و چگالی جریان  $0.7 \text{ A/dm}^2$  و ولتاژ تغذیه ۱۴۰ میلی‌ولت در مدت زمان ۱۰ و ۲۰ دقیقه لایه‌ای از نیکل بر روی نمونه‌ها تشکیل شد.

از آنجا که ناهمواری زیرلایه‌های مولتی کریستال سیلیکون در حدود  $4 \mu\text{m}$  است، برای بهبود کیفیت و همچنین چسبندگی مناسب لایه‌ها از دستگاه ماورای صوت استفاده شده است. لایه‌نشانی بر روی این لایه‌ها به علت ناهمواری‌های فراوان در سطح آنها، که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و لایه نشانده شده می‌بایست از ضخامت مناسبی برخوردار باشد.

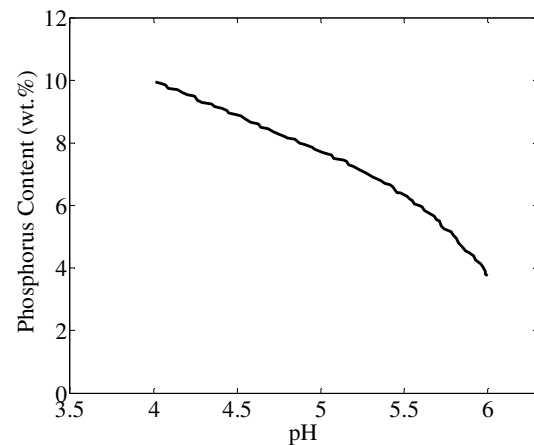


شکل ۷. تصویر SEM مربوط به ناهمواری‌های موجود بر روی سیلیکون مولتی کریستال نوع n



شکل ۴. آنالیز EDX از لایه نیکل به روش آبرکاری غیرالکتریکی. شکل ضمیمه، تصویر SEM مربوط به همین لایه را نشان می‌دهد.

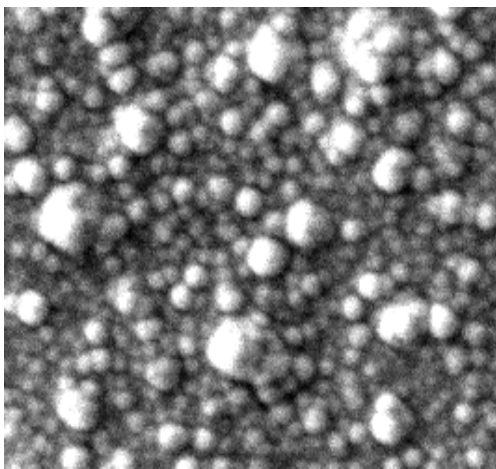
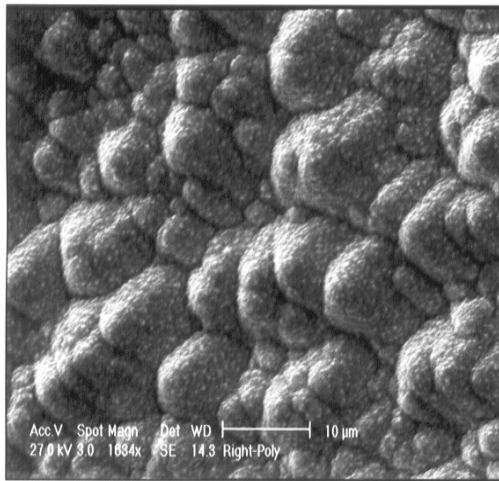
یکی از عوامل تعیین کننده درصد فسفر، pH محلول است. همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشخص است، با افزایش pH درصد فسفر لایه نیز کمتر می‌شود [۱۰]. در حمام استفاده شده در این مرحله، pH محلول در حدود ۵ است.



شکل ۵. درصد میزان فسفر موجود در لایه نشانده شده با روش الکتروشیمیایی بر حسب pH حمام [۱۰].

تصویر SEM از ساختار سطحی لایه Ni لایه‌نشانی شده به روش آبرکاری غیرالکتریکی در ضمیمه شکل (۴) نشان داده شده است.

بعد از انجام لایه‌نشانی مس به روش آبرکاری الکتریکی، مقاومت تماس الکتریکی به روش TLM برای چنین ساختاری مطابق با شکل (۶)،  $8/9 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$  به دست آمد.



شکل ۸. تصاویر SEM مربوط به لایه نیکل نشانده شده (a) بدون استفاده از سیستم مافوق صوت (b) با استفاده از سیستم ماورا صوت.

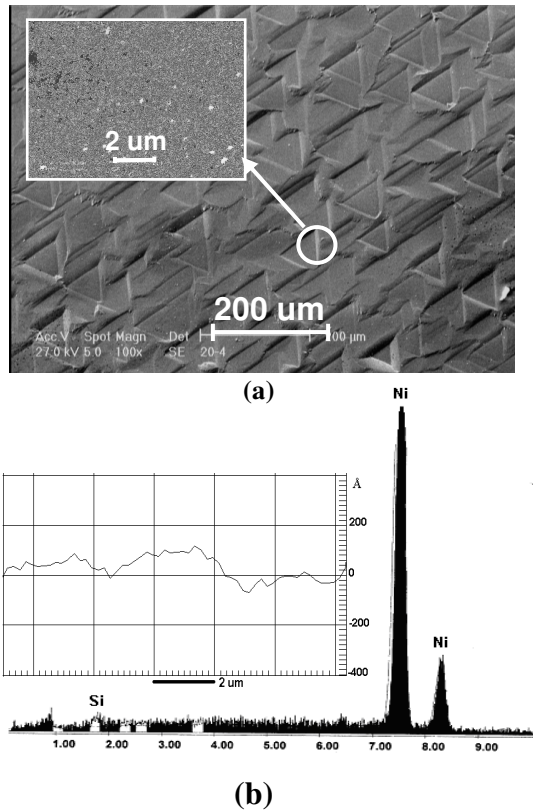
با استفاده از سیستم ماورای صوت، آهنگ لایه نشانی کاهش پیدا کرده و در نتیجه لایه ایجاد شده از یکنواختی بهتری برخوردار و چسبندگی آن به زیرلایه بیشتر خواهد شد، زیرا که محلول در بافت‌های ویفر به طور کامل قرار می‌گیرد. پس از لایه نشانی نیکل، نمونه‌ها درون کوره خلأ دما بالا، در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  گرمادهی شده تا سیلیساید نیکل تشکیل شود. از آنجا که ارتفاع سد شاتکی ایجاد شده توسط نیکل حدود  $0.7\text{ eV}$  است، باعث ایجاد یک تماس اهمی بسیار مناسب شده و تشکیل سیلیساید نیکل بر روی Si منجر به مقاومت ویژه تماس کمتری خواهد شد.

شکل (۸) تصاویر SEM لایه نیکل نشانده شده به روش آبکاری در ۱۰ دقیقه با استفاده از دستگاه ماورای صوت را در مقایسه با هنگامی که از این دستگاه استفاده نشده، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بکار بردن این سیستم، لایه نشانه شده از یکنواختی بهتری برخوردار خواهد بود.

ساختار سطحی لایه‌های نیکل که بر روی زیرلایه مولتی کریستال سیلیکون در مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه لایه نشانی شده‌اند، با کمک تصاویر SEM در شکل (۹) بررسی شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان لایه‌نشانی اندازه ذرات مشاهده شده در سطح لایه‌ها بزرگتر می‌شود. ناهمواری اولیه نمونه‌ها (قبل از لایه نشانی) در حدود  $4\text{ }\mu\text{m}$  است و با افزایش زمان لایه نشانی تا ۴۰ دقیقه به حدود  $1/5\text{ }\mu\text{m}$  می‌رسد، این کاهش نشان دهنده این مطلب است که لایه‌ها تمام ناهمواری سطح را پوشانده و یکنواختی مناسبی دارند. شکل ۹d ناهمواری سطح نمونه مربوط به لایه‌نشانی نیکل به مدت ۴۰ دقیقه را نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم Dektak تهیه شده است.

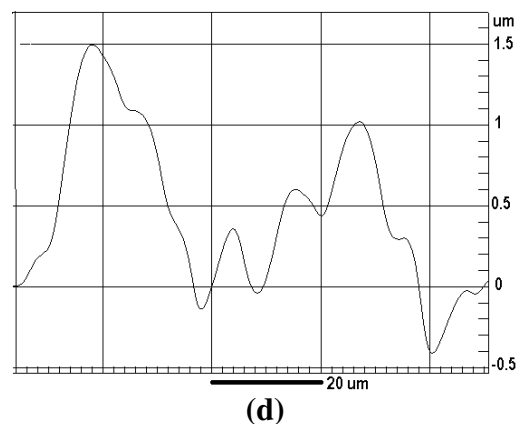
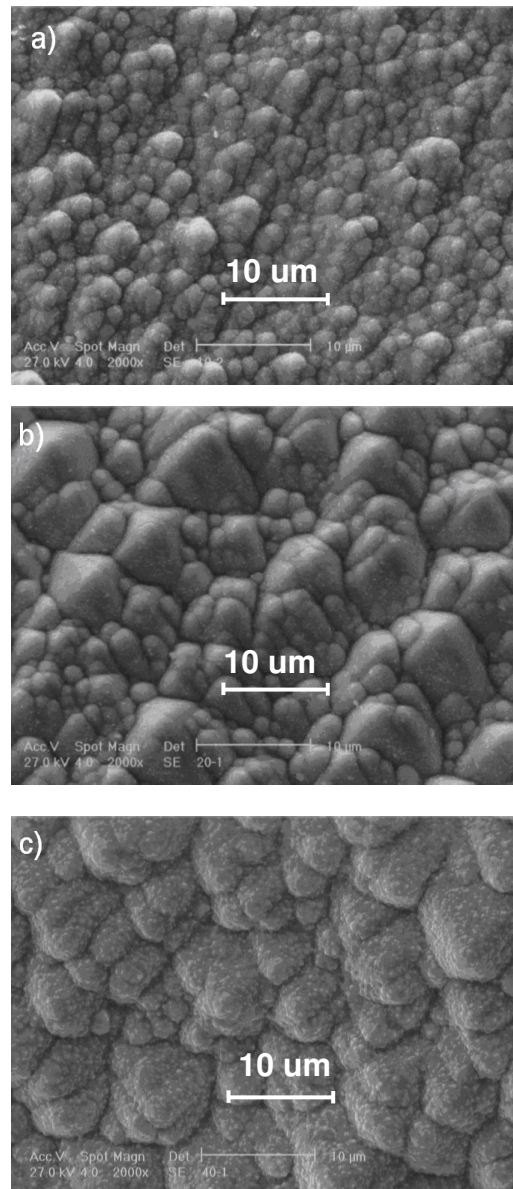


برروی آن لایه نشانی شده و شکل ضمیمه آن تصویر بزرگ شده قسمتی از همان لایه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ناهمواری سطح بسیار کم بوده و ابعاد دانه‌های نیکل (با استفاده از اندازه‌گیری دانه‌ها در تصاویر SEM) در حدود  $230\text{ nm}$  است.



شکل ۱۰. (a) تصویر SEM ناحیه دیگری از ویفر لایه نشانی شده با نیکل در مدت زمان ۲۰ دقیقه؛ ضمیمه تصویر بزرگ شده ناحیه مشخص شده در (a) می‌باشد، (b) آنالیز EDX مربوط به نیکل آبکاری شده به مدت ۲۰ دقیقه؛ ضمیمه پروفایل ناهمواری سطح را نشان می‌دهد.

برای تشخیص عناصر موجود در لایه نیکل آبکاری شده از آنالیز EDX استفاده شده است. این آنالیز میزان  $97/8$  درصد وزنی را برای نیکل و  $2/2$  درصد وزنی را برای سیلیکون نشان می‌دهد که مربوط به زیرلایه سیلیکون بوده و عنصر دیگری در آن مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۰b). ضمیمه شکل ۱۰b Dektak ناهمواری سطح شکل ۱۰a که با استفاده از سیستم اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که در حدود  $100\text{ \AA}$  می‌باشد و بیانگر کیفیت بالای فرآیند لایه نشانی است. در شکل (۱۱) آنالیز XRD مربوط به ساختار نیکل بر روی زیرلایه مولتی کریستال سیلیکون پس از لایه‌نشانی و همچنین گرمادهی در دماهای  $300^\circ\text{C}$  و  $500^\circ\text{C}$  نشان داده شده است. همان‌گونه که



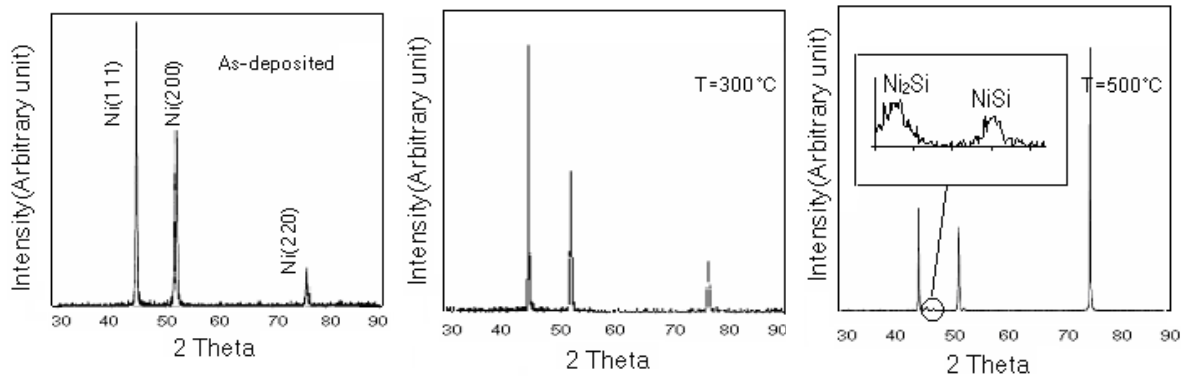
شکل ۹. تصاویر SEM نیکل آبکاری شده در مدت زمان (a) ۱۰، (b) ۲۰، (c) ۴۰ دقیقه، (d) ناهمواری سطح نمونه مربوط به لایه‌نشانی نیکل به مدت ۴۰ دقیقه.

در شکل ۱۰a ناحیه دیگری از زیرلایه مولتی کریستال سیلیکون مشاهده می‌گردد که لایه‌ای از نیکل به مدت ۲۰ دقیقه

از آند مسی و چگالی جریان  $20-50 \text{ A/dm}^2$  لایه‌ای از مس بر روی نمونه تشکیل شد. در شکل (۱۲) آنالیز EDX مربوط به لایه مس قابل مشاهده است. مشخص است که باید درصد وزنی قابل ملاحظه‌ای از لایه مورد نظر، مس و مقدار اندکی نیکل و سیلیکون ناشی از تأثیر لایه‌های زیرین در این لایه موجود باشد. ضمیمه شکل (۱۲) تصویر SEM از ساختار سطحی لایه مس را نشان می‌دهد.

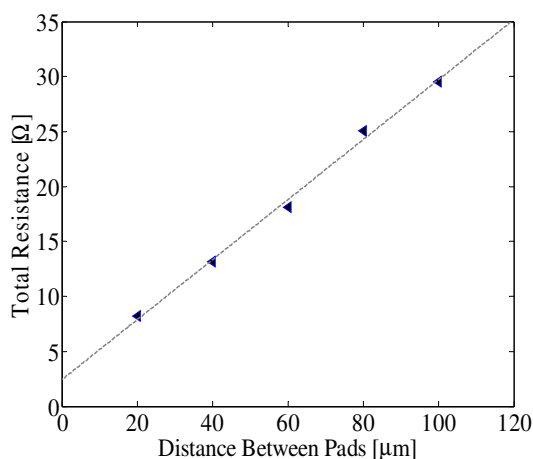
ملاحظه می‌شود با گرمادهی نمونه در دمای  $300^\circ\text{C}$  طیف XRD آن تغییر زیادی نمی‌کند ولی با افزایش دمای گرمادهی به  $500^\circ\text{C}$  پیک (۲۲۰) نیکل به شدت افزایش یافته و همچنین پیک‌های مربوط به سیلیسیاید های نیکل ( $\text{NiSi}$  و  $\text{Ni}_2\text{Si}$ ) نمایان می‌شوند [۱۸].

به منظور ایجاد ساختار Ni/Cu، پس از لایه نشانی نیکل بر روی نمونه، از سیستم آبرکاری الکتریکی مس برای لایه‌نشانی استفاده شده است (مطابق جدول ۳). در این مرحله با استفاده

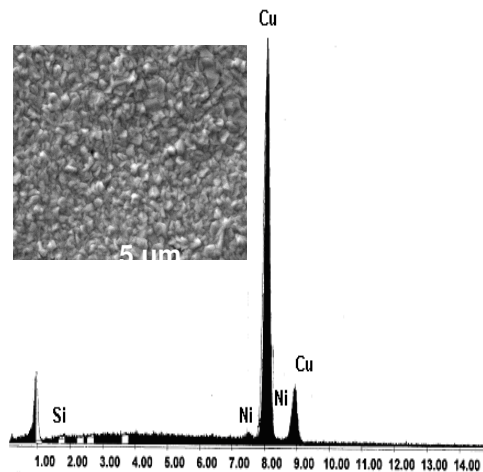


شکل ۱۱. آنالیز XRD مربوط به لایه نیکل پس از گرمادهی در دماهای  $300^\circ\text{C}$  و  $500^\circ\text{C}$ .

مشخصه سلول خورشیدی با مساحت حدود  $9 \text{ cm}^2$  که تحت تابش یک لامپ ۱۰۰ وات قرار گرفته، در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشینه برابر با ۴۵ میلی وات بوده و ولتاژ مدار باز و جریان مدار کوتاه به ترتیب برابر با ۵۰۰ میلی ولت و ۱۵۰ میلی آمپر می‌باشد. همچنین فاکتور پرکنندگی برای این سلول  $59/304\%$  به دست آمده است.



شکل ۱۳. محاسبه مقاومت کل تماس برای ساختار Si/Ni/Cu که لایه نیکل آن به روش آبرکاری الکتریکی نشانده شده است.



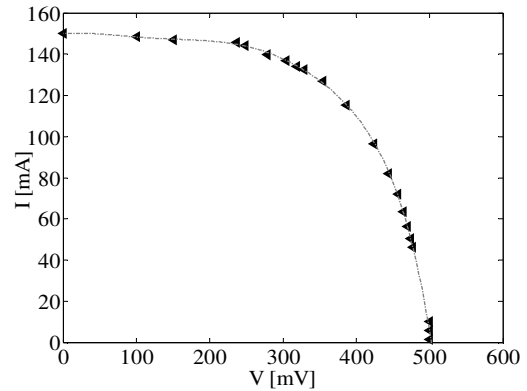
شکل ۱۲. آنالیز EDX از لایه مس آبرکاری شده. ضمیمه تصویر SEM مربوط به لایه مس نشانده شده به روش آبرکاری الکتریکی را نشان می‌دهد.

شکل (۱۳) نمودار تغییرات مقاومت کل برحسب فاصله میان تماس‌ها برای این ساختار را نشان می‌دهد. مقاومت ویژه تماس محاسبه شده  $2/2 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$  می‌باشد که مقدار بسیار مناسبی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی کم‌هزینه با بازده بالا می‌باشد.



## مراجع

1. Lee E. J., Kim D. S., and Lee S. H., Ni/Cu metallization for low-cost high-efficiency PERC cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 74, 65-70.
2. Fong H. P., Wu Y., Wang Y. Y., and Wan C. C., Electroless Cu deposition process on TiN for ULSI interconnect fabrication via Pd/Sn colloid activation, *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32.
3. Rehman A., and Lee S. H., Review of the Potential of the Ni/Cu Plating Technique for Crystalline Silicon Solar Cells, *Materials*, 2014, 7, 1318-1341.
4. Miles R. W., Hynes K. M., and Forbes I., Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2005, 51, 1-42.
5. Green M. A., Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potential, *Solar Energy*, 2003, 74, 181-192.
6. Neu W., Kress A., Jooss W., Fath P., Bucher E., Low-cost multicrystalline back-contact silicon solar cells with screen printed metallization, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 74, 139-146.
7. Diehl W., Sittinger V., Szyszka B., Thin film solar cell technology in Germany, *Surface and Coatings Technology*, 2005, 193, 329-334.
8. Yamaguchi M., Takamoto T., Araki K., Ekims-Daukes N., Multi-junction III-V solar cell: current status and future potential, *Solar Energy*, 2005, 79, 78-85.
9. Lawrence J. Durney (ed.), *Electroplating Engineering Handbook*, 4th edition, Van Nostrand Reinhold, 1984.
10. Riedel W., *Electroless Nickel Plating*, Finishing Publications Ltd., 1991.
11. Kim D. H., Lee S. H., Investigation on plated Ni/Cu contact for mono-crystalline silicon solar cell, *Electron. Mater. Lett.*, 2013, 9(5), 7677-681.
12. Lee J. D., Kwon H. Y., Lee S. H., Analysis of front metal contact for plated Ni/Cu silicon solar cell, *Electron. Mater. Lett.*, 2011, 7(4), 349-352.
13. Kang J., You J., Kang C., Jungho Pak J., and Kim D., Investigation of Cu metallization for Si solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 74, 91-96.
14. Eager S., Mason N., Bruton T., Sherborne J., and Russell R., Environmentally friendly processes in the manufacture of saturn solar cells, *29th IEEE PVSC*, New Orleans, May 2002.
15. Schroder D. K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1998.
16. Reeves G. K., Harrison H. B., Obtaining the specific contact resistance from transmission model measurements, *IEEE Electron Device Lett.*, 1982, 3(5), 111.
17. Schroder D. K., Meier D. L., Solar cell contact resistance-a review, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1984, 31(5), 637.
18. Foggato J., Yoo W. S., Ouaknine M., Murakami T., and Fukada T., Optimizing the formation of nickel silicide, *Materials Science and Engineering B*, 2004, 114-115, 56-60.



شکل ۱۴. مشخصه I-V یک سلول خورشیدی ساده

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که با استفاده از ساختار Ni/Cu به روش آبکاری الکتریکی در سلول‌های خورشیدی مبتنی بر مولتی کریستال سیلیکون می‌توان علاوه بر داشتن بازده بالا، هزینه ساخت این سلول‌ها را کاهش داد. ساختار Ni/Cu نسبت به دیگر ساختارهای رایج در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با بازده بالا، مانند Ti/Pd/Ag دارای هزینه پایین‌تری بوده و مقاومت تماس آن نیز کمتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از دستگاه ماورای صوت، ساختار Ni/Cu با کیفیت بسیار بالاتری (ناهمواری کمتر از  $100 \text{ \AA}$ ) بر روی مولتی کریستال سیلیکون لایه نشانی شده است. از آنجا که از دو روش آبکاری الکتریکی و غیرالکتریکی برای لایه نشانی نیکل استفاده شد، نتایج حاصل از اندازه گیری مقاومت تماس به روش TLM نشان می‌دهند مقاومت ویژه تماس ساختاری که نیکل در آن به روش آبکاری غیرالکتریکی لایه نشانی شده،  $8/9 \times 10^{-5} \text{ \Omega cm}^2$  بوده و لایه نیکل از چسبندگی لازم برخوردار نیست. در حالی که ساختاری که نیکل در آن به روش آبکاری الکتریکی لایه نشانی شده، دارای مقاومت ویژه تماس  $2/2 \times 10^{-5} \text{ \Omega cm}^2$  و از کیفیت بالاتری برخوردار بوده که مقاومت تماس پائینی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی مبتنی بر مولتی کریستال سیلیکون می‌باشد.