

ایجاد تماس اهمی ساختار Ni/Cu به روش الکتروشیمیایی بر روی زیرلایه های پلی کریستال سیلیکون مورد استفاده در سلول های خورشیدی

نگین معنوی زاده^{۱*}، رشید صفا ایسینی^۱، علیرضا خدایاری^{۱،۳}، ابراهیم اصل سلیمانی^۱ و هادی ملکی^۴

^۱دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، آزمایشگاه تحقیقاتی لایه های نازک

^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

^۴پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۶/۳/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۶/۱۰/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۷/۵/۲۴

چکیده در این مقاله، ساختار Ni/Cu به عنوان تماس اهمی بر روی بس بلور سیلیکون به روش آبرکاری الکتریکی و با استفاده از دستگاه ماوراء صوت لایه نشانی شده و مقاومت الکتریکی آن بهینه شده است. نیکل با استفاده از حمام وات بر روی زیرلایه n⁺Si در زمان های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه لایه نشانی شده و برای کاهش مقاومت سطحی و تماس لایه ای از مس به روش آبرکاری الکتریکی بر روی لایه نیکل انجام شده است. آنالیزهای XRD، SEM و EDX برای بررسی ساختار بلوری، ساختار سطحی و عناصر تشکیل دهنده این لایه ها انجام شده و باتوجه به ناهمواری زیاد سطح زیرلایه پلی کریستال سیلیکون، درحین لایه نشانی از دستگاه ماوراء صوت برای ایجاد تماس های اهمی با چسبندگی بسیار خوب و کیفیت بالا استفاده شده است. پس از الگودهی نقاب مورد نظر برای اندازه گیری مقاومت تماس از روش مدل خط انتقال (TLM) Transmission Line Model استفاده شده و مقاومت ویژه تماس برابر $2/2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ به دست آمده است که مقاومت تماس مناسبی برای کاربرد در سلول های خورشیدی پلی کریستال سیلیکون می باشد.

کلمات کلیدی آبرکاری الکتریکی، دستگاه ماوراء صوت، پلی کریستال سیلیکون، تماس اهمی، ساختار Ni/Cu.

Fabrication Ohmic Contact of Ni/Cu Structure on Polycrystalline Silicon Via Electrochemical Method used in Solar Cells

N. Manavizadeh^{1,2*}, R. Safa Isini¹, A. Khodayari^{1,3}, E. Asl Soleimani¹ and H. Maleki⁴

¹Thin film Lab, Electrical and Computer Department, Tehran University

²Electrical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology

³Mechanical Engineering Departments, K. N. Toosi University of Technology

⁴Laser and Optic research Center, Atomic Organization of Iran

Abstract In this paper, a low-cost Ni/Cu structure as an ohmic contact was fabricated on Polycrystalline n⁺Si Via electrochemical method by the application of an ultrasonic system and the electrical resistivity of the contact was optimized. After electroplating of Ni in watts bath for 10, 20 and 40 min, an electroplated copper layer was depposited on Ni film in order to reduce the sheet and contact resistance by using an ultrasonic system one can obtain a film with the lower surface roughness and the higher quality. The electrical resistivity of the electroplated Ni/Cu was investigated for vacuum annealing at various temperatures. Post treatments of the coated Ni improved the crystalline structure of the electroplated layer. Contact resistance of the Ni/Cu structure on an n⁺Si was measured using the Transmission Line Model (TLM) Method. An optimum specific contact resistance of $2.2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ was obtained for layers annealed at 400°C for 10 min. SEM, XRD, and EDX analyses were used to investigate the surface morphology, structure and composition of deposited films.

Keywords Electroplating; Ultrasonic System; Polycrystalline Silicon; Ohmic Contact; Ni/Cu structure.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: تهران، دانشگاه تهران دانشکده فنی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، آزمایشگاه تحقیقاتی لایه های نازک.

تلفن: ۰۹۱۲۱۰۱۲۸۹۸، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۱۱۲۳۵، پیام نگار: manavizadeh@ee.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه ساخت اتصالات فلز نیمه هادی در ادوات الکترونیکی اهمیت بسیار زیادی دارد. یکی از انواع این اتصالات، اتصال اهمی است که باید دارای مقاومت بسیار کمی باشد تا افت ولتاژ محسوسی در آنها انجام نگیرد و همچنین بیشترین توان ممکن به سیستم مصرف کننده منتقل شود. یکی از روش هایی که امروزه برای ساخت اتصالات فلزی مختلف، از جمله اتصالات اهمی، به کار می رود روش الکتروشیمیایی یا آبکاری الکتریکی است. این شیوه در مقایسه با سایر روش های لایه نشانی مانند سیستم های خلأ هزینه بسیار کمتری دارد و نیز دسترسی به چنین سیستمی آسان تر است [۱]. به همین علت بهره گیری از چنین روشی در ساخت سلول های خورشیدی، مدارهای مجتمع با مقیاس وسیع [۲] و دیگر ادوات الکتریکی و الکترونیکی در حال گسترش است. در صنعت فتوولتائیک برای ساخت سلول های خورشیدی از ساختارها، روش ها و مواد مختلفی از جمله بلور سیلیکون، پلی کریستال سیلیکون، سیلیکون آمورف، ترکیبات III-V، CdTe استفاده می شود [۳-۷]. در این مقاله از ساختار نیکل مس برای اتصالات اهمی و لایه نشانی آنها با شیوه آبکاری الکتریکی استفاده شده است که مزایای فراوانی نسبت به آبکاری غیر الکتریکی نیکل دارد؛ مانند عدم آلودگی پوشش با رسوب نیکل فسفر و سرعت آبکاری بیشتر [۸،۹].

با استفاده از این ساختار می توان علاوه بر داشتن بازده بالا، هزینه ساخت این سلول ها را کاهش داد. ساختار Ni/Cu نسبت به دیگر ساختارهای رایج در سلول های خورشیدی سیلیکونی با بازده بالا، مانند Ti/Pd/Ag هزینه پایین تری دارد و مقاومت تماس آن نیز کمتر است [۱]. در این ساختار از نیکل، به صورت سدی برای جلوگیری از نفوذ مس به زیرلایه سیلیکون و همچنین برای به وجود آوردن اتصال اهمی مناسب استفاده می شود. همچنین از مس به علت مقاومت الکتریکی پایین آن و قابلیت

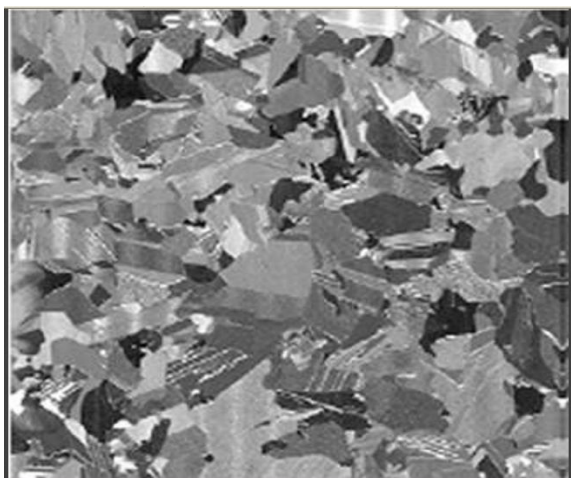
بالای آن در ممانعت از مهاجرت الکترون ها استفاده می شود [۱۰].

۱-۱- مراحل انجام لایه نشانی

۱-۱-۱- آماده سازی ویفرها

در این مقاله از زیرلایه های پلی کریستال سیلیکون n^+ استفاده شده است، (با آلایش فسفر و مقاومت ویژه $0.2-0.4 \text{ ohmcm}$) که ضخامت تقریبی $300 \mu\text{m}$ دارند، (Bayer Solar GmbH, Made in Germany). در این ویفرها اندازه دانه ها به طور کلی بزرگتر از ضخامت ویفر است و دانه ها در سطح ویفر گسترش یافته اند. تصویر اپتیکی از این نوع ویفر با اندازه $10 \times 10 \text{ cm}^2$ در شکل ۱ مشاهده می شود.

ناهمواری زیرلایه های پلی کریستال سیلیکون در حدود $4 \mu\text{m}$ است؛ به همین علت برای بهبود کیفیت و همچنین چسبندگی مناسب لایه ها، در حین لایه نشانی از دستگاه ماوراء صوت استفاده می شود. نمونه ها با استفاده از محلول RCA (آب DI، پراکسید هیدروژن و آمونیاک با نسبت ۱:۱:۵) تمیز می شوند



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ نوری از ویفر پلی کریستال سیلیکون نوع n با بزرگ نمایی ۱.

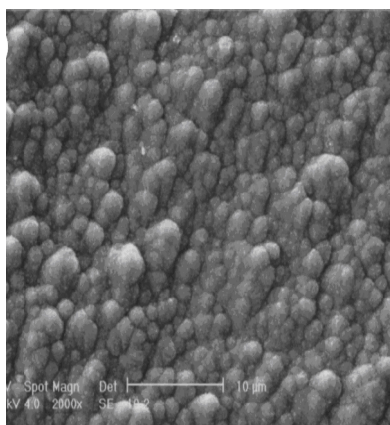
کاتد است. این فرآیند با چگالی جریان حدود 5 A/dm^2 در دمای 45°C تا 50°C انجام شده است.

ساختار سطحی لایه های نیکل که بر روی زیرلایه پلی کریستال سیلیکون در زمان های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه لایه نشانی شده اند، با کمک SEM، آنالیز میکروسکوپ الکترونی (Scanning Electron Microscopy) بررسی شده است. شکل ۲(a-c) ساختار سطحی لایه های نیکل را نشان می دهد. همان گونه

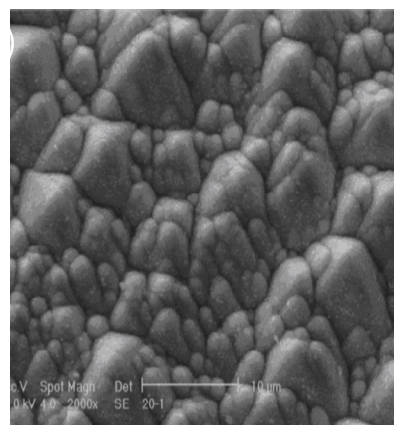
و پس از آن برای ازبین بردن اکسید سطح ویفر به مدت ۲-۳ دقیقه در محلول $10\% \text{ HF}$ قرار می گیرند.

۱-۲-۱. آبرکاری الکتریکی نیکل

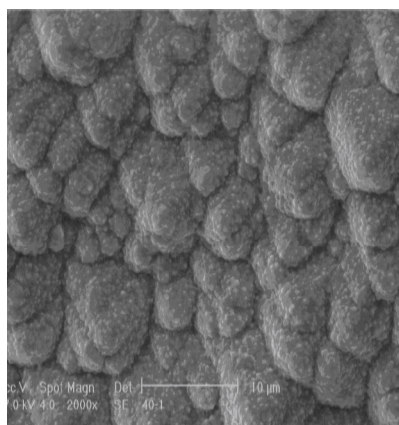
برای منبع اصلی یون های نیکل، NiCl_2 برای بهبود بازده آند و H_3BO_3 درنقش تنظیم کننده pH، استفاده شده است. در این حالت ورقه نیکل درنقش آند و ویفر آماده شده درنقش



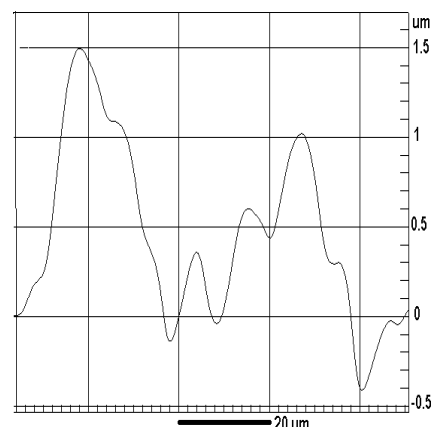
(a)



(b)

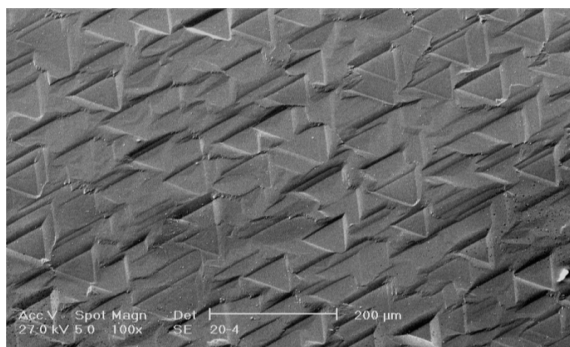


(c)

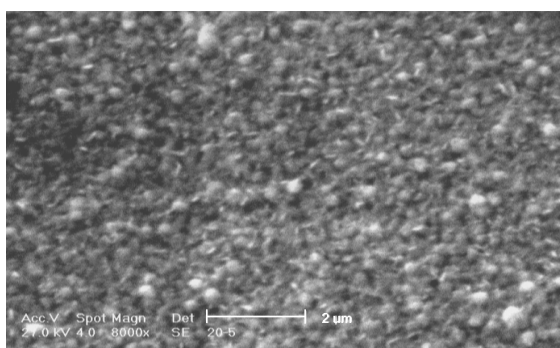


(d)

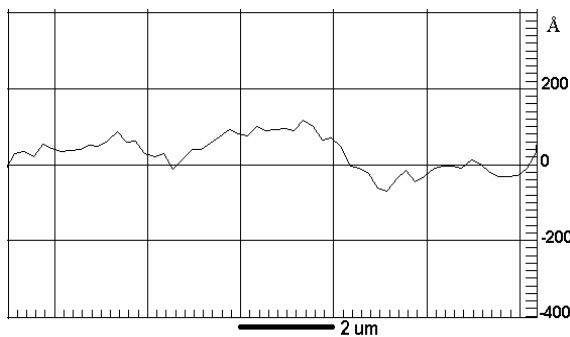
شکل ۲. تصویر SEM نیکل آبرکاری شده در مدت (a) ۱۰ دقیقه، (b) ۲۰ دقیقه، (c) ۴۰ دقیقه، (d) ناهمواری سطح نمونه مربوط به لایه نشانی نیکل به مدت ۴۰ دقیقه.



(a)



(b)



(c)

شکل ۳. ناحیه دیگری از ویفر لایه نشانی شده با نیکل در مدت ۲۰ دقیقه (a) تصویر SEM سطح، (b) تصویر بزرگ شده ناحیه مشخص شده در (a)، (c) ناهمواری سطح.

زیادی نمی کند؛ ولی با افزایش دمای گرمادهی به 500°C ، پیک (۲۲۰) نیکل به شدت افزایش می یابد و همچنین پیک های مربوط

که در این شکل ها دیده می شود، با افزایش زمان لایه نشانی اندازه ذرات مشاهده شده در سطح لایه ها بزرگ تر می شود. ناهمواری اولیه نمونه ها (قبل از لایه نشانی) در حدود $4\ \mu\text{m}$ است و با افزایش زمان لایه نشانی تا 40 دقیقه به حدود $1/5\ \mu\text{m}$ می رسد، (قبل از لایه نشانی ناهمواری ویفرهای پلی کریستال سیلیکون $4\ \mu\text{m}$ است؛ اما ناهمواری لایه نشانی شده $1/5\ \mu\text{m}$ است که این کاهش نشان می دهد لایه ها تمام ناهمواری سطح را پوشانده و یکنواختی مناسبی دارند). (شکل (d) ۲ که با استفاده از سیستم Dektak تهیه شده است).

در شکل ۳(a) ناحیه دیگری از زیرلایه پلی کریستال سیلیکون مشاهده می شود که لایه ای از نیکل به مدت 20 دقیقه بر روی آن لایه نشانی شده است و در شکل ۳(b) تصویر بزرگ شده قسمتی از شکل ۳(a) مشاهده می شود. همان طور که در این شکل دیده می شود ناهمواری سطح بسیار کم است و ابعاد دانه های نیکل، (با استفاده از اندازه گیری دانه ها در تصاویر SEM) در حدود $230\ \text{nm}$ است.

در شکل ۳(c) ناهمواری این سطح که با استفاده از سیستم Dektak اندازه گیری شده، در حدود $100\ \text{Å}$ می باشد که بیانگر کیفیت بالای فرایند لایه نشانی است. برای تشخیص عناصر موجود در لایه نیکل آباری شده از آنالیز EDX استفاده شده که در شکل ۴ مشاهده می شود. براساس این آنالیز میزان $97/8$ درصد وزنی را برای نیکل و $2/2$ درصد وزنی را برای سیلیکون نشان می دهد که مربوط به زیرلایه سیلیکون است و عنصر دیگری در آن مشاهده نمی شود.

در شکل ۵ آنالیز XRD مربوط به ساختار نیکل مشاهده می شود که بر روی زیرلایه پلی کریستال سیلیکون لایه نشانی شده است. در این شکل طیف مربوط به لایه های نیکل پس از لایه نشانی و پس از بازپخت در دماهای 300°C و 500°C نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود با بازپخت نمونه در دمای 300°C طیف (XRD) آن تغییر

پس از لایه نشانی نیکل بر روی نمونه، از سیستم آبکاری الکتریکی مس برای لایه نشانی استفاده شده است. به این منظور با استفاده از حمام سولفات مس [۱۲]، شامل CuSO_4 و H_2SO_4 لایه‌ای از مس بر روی نمونه قرار داده شد.

در این مرحله با استفاده از آند مسی و چگالی جریان $50-20 \text{ A/dm}^2$ لایه‌ای با ضخامت مورد نظر بر روی نمونه تشکیل شد. شکل ۶ تصویر SEM مربوط به لایه مس نشان داده شده به این روش را نشان می‌دهد.

در شکل ۷ آنالیز EDX مربوط به لایه مس نشان داده شده 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.

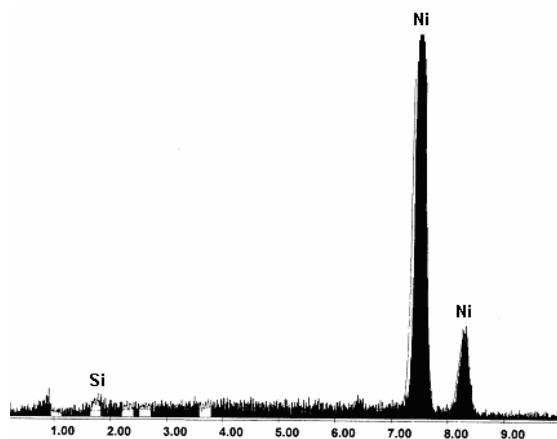
۲- اندازه‌گیری مقاومت تماس

از روش مدل خط انتقال (TLM) برای اندازه‌گیری مقاومت تماس و از نقاب نشان داده شده در شکل ۸ برای الگودهی استفاده شده است. این روش اغلب برای مدل‌سازی اتصالات سطحی فلز نیمه‌هادی به کار می‌رود. در این حالت مقاومت کل هر دو تماس به این صورت به دست می‌آید [۱۳-۱۵]:

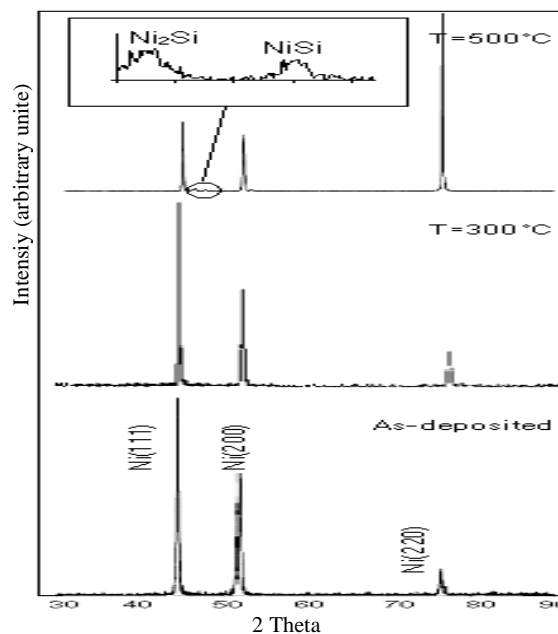
$$R_T = \rho_s d / Z + 2R_c \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه ρ_s مقاومت سطحی، d فاصله بین تماس‌ها، Z پهنای تماس‌ها و R_c مقاومت تماس است.

با رسم مقاومت کل R_T 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 رابطه ۲ می‌توان مقاومت تماس ویژه را محاسبه نمود.

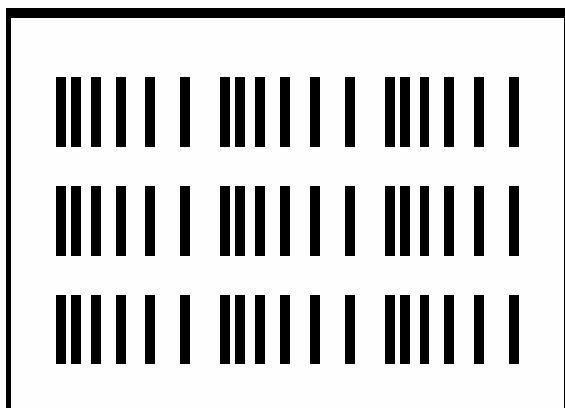


شکل ۴. آنالیز EDX نیکل آبکاری شده.

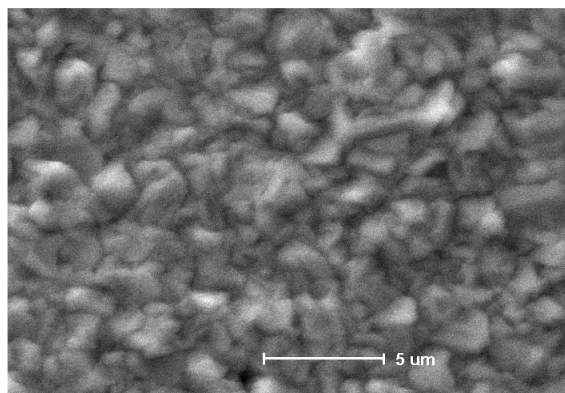


شکل ۵. طیف‌های XRD مربوط به لایه نیکل پس از لایه نشانی و پس از آتیل کردن در دماهای 300°C و 500°C .

به سیلیسیدهای نیکل، $(\text{NiSi}$ و $\text{Ni}_2\text{Si})$ نمایان می‌شود [۱۱].



شکل ۸. نقاب استفاده شده برای اندازه‌گیری مقاومت تماس.



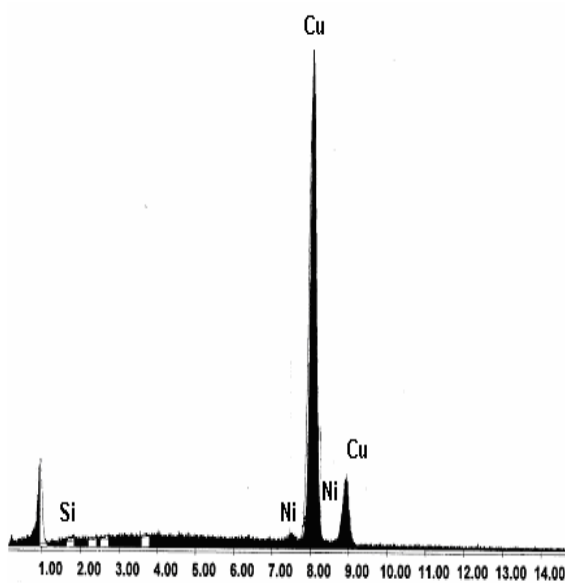
شکل ۶. تصویر SEM از لایه مس آبکاری شده بر روی نیکل.

مشخصه I-V به کمک سیستم Keithley 2361 و آنالیز اطلاعات به دست آمده از آن، مقاومت تماس Cu/Ni/Si محاسبه شده است.

شکل ۹، نمودار تغییرات مقاومت برحسب فاصله میان تماس‌ها برای این ساختار را نشان می‌دهد. مقاومت ویژه تماس محاسبه شده $2/2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ است که مقدار بسیار مناسبی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی کم‌هزینه با بازده بالاست.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش آبکاری الکتریکی برای ساخت اتصالات اهمی کم‌هزینه به کار رفته که قابل استفاده در سلول‌های خورشیدی با بازده بالاست. با استفاده از این شیوه به جای سیستم‌های پرهزینه و وقت‌گیر خلأ، با لایه‌نشانی ساختار ارزان Ni/Cu بر روی پلی کریستال سیلیکون، هزینه ساخت و مقاومت



شکل ۷. آنالیز EDX از لایه مس آبکاری شده.

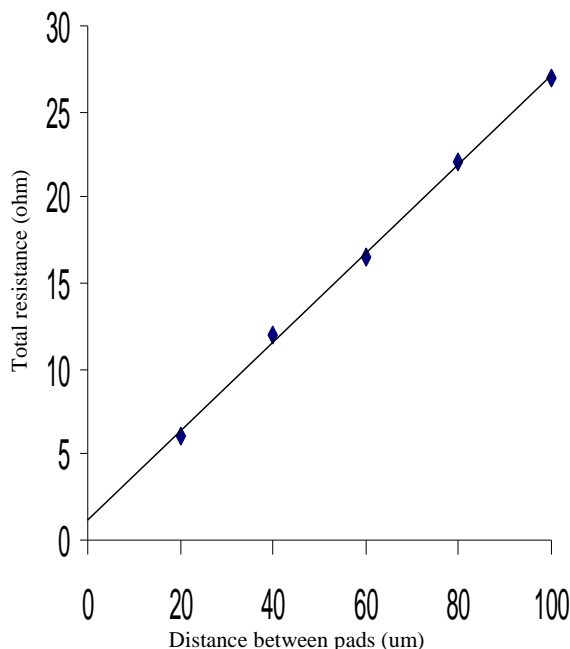
$$\rho_c = R_c A \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، A مساحت هرکدام از تماس‌هاست. با اندازه‌گیری مقاومت بین هر دو تماس متوالی با سیستم اندازه‌گیری

در این مقاله به جای استفاده از سیستم های خلأ بدون تأثیرگذاری بر روی بازده، هزینه ساخت سلول های خورشیدی پلی کریستال سیلیکون را تا حد زیادی پایین می آورد.

مراجع

1. Lee, E. J., Kim, D. S. and Lee, S. H., "Ni/Cu Metallization for Low-Cost High-Efficiency PERC Cells", *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 74 Issues 1-4 (2002) 65-70.
2. Fong, H. P., Wu, Y., Wang, Y. Y. and Wan, C. C., "Electro Less Cu Deposition Process on TiN for ULSI Interconnect Fabrication via Pd/Sn Colloid Activation", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 32 (2003).
3. Miles, R. W., Hynes, K. M. and Forbes, I., "Photovoltaic Solar Cells, an Overview of State-of-the-Art Cell Development and Environmental Issues", *Journal of Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, Vol. 51 Issues 1-3 (2005) 1-42.
4. Green, M. A., "Crystalline and Thin-Film Silicon Solar Cells, State of the Art and Future Potential", *Solar Energy*, Vol. 74 (2003) 181-192.
5. Neu, W., Kress, A., Jooss, W., Fath, P. and Bucher, E., "Low-Cost Multi Crystalline Back-Contact Silicon Solar Cells with Screen Printed Metallization", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 74 (2002) 139-146.
6. Diehl, W., Sittinger, V. and Szyszka, B., "Thin Film Solar Cell Technology in Germany", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 193 (2005) 329-334.
7. Yamaguchi, M., Takamoto, T., Araki, K. and Ekins-Daukes, N., "Multi-Junction III-V Solar Cell, Current Status and Future Potential", *Solar Energy*, Vol. 79 (2005) 78-85.
8. Lawrence, J., "Electroplating Engineering Handbook", Durney (ed.), 4th Edition, Van Nostrand Reinhold, 1984.
9. Riedel, W., "Electro less Nickel Plating", Finishing Publications Ltd, AMS INTERNATIONAL Metals Park, Ohio, U.S.A (1991).
10. Kang, J., You, J., Kang, C., Jungho, Pak, J. and Kim, D., "Investigation of Cu Metallization for Si Solar Cells", *Journal of Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 74 Issues 1-4 (2002) 91-96.
11. Foggiato, J., Yoo, W. S., Ouaknine, M., Murakami, T. and Fukada, T., "Optimizing the Formation of Nickel Silicate", *Materials Science and Engineering*, Vol. 114-115 Trans B (2004) 56-60.
12. 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).
13. Schroder, D. K., "Semiconductor Material and Device Characterization", 2nd edition, John Wiley and Sons,



شکل ۹. محاسبه مقاومت کل تماس برای ساختار Cu/Ni/Si.

تماس تا حد ممکن کاهش می یابد. با دستگاه ماوراء صوت ساختار Ni/Cu با کیفیت بسیار بالایی، (ناهمواری کمتر از 80 \AA) بر روی پلی کریستال سیلیکون لایه نشانی شده است. همچنین آنالیزهای SEM، XRD و EDX برای بررسی خصوصیات سطحی، بلوری و عناصر تشکیل دهنده لایه ها بر روی نمونه ها انجام گرفته است.

با الگودهی نمونه ها و استفاده از شیوه TLM و اندازه گیری مشخصه I-V به کمک سیستم Keithley 2361 مقاومت تماس نمونه ها اندازه گیری شده است.

اندازه گیری های انجام شده این مطلب را تایید می کند که مقاومت ویژه تماس برابر با $2/2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ است که مقاومت تماس پایینی برای کاربرد در سلول های خورشیدی مبتنی بر پلی کریستال سیلیکون است. استفاده از ساختار و شیوه ارائه شده

-
- 3 Vol. 5 (1982) 111.
15. Schroder, D. K. and Meier, D. L., "Solar Cell Contact Resistance-a Review", *IEEE Trans. Electron Dev. ED31*, Vol. 5 (1984) 63.
14. Reeves, G. K. and Harrison, H. B., "Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Model Measurements", *IEEE Electron Device Lett.*, EDL, No. chapter 3 (1998) 138-162.