

رشد و مشخصه یابی ساختاری و الکتریکی نانو ذرات Si تهیه شده به روش تبخیر با باریکه الکترونی

رضا ثابت داریانی

گروه فیزیک، دانشگاه الزهراء(س)

نرگس صادق بیگی

گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری

(دریافت مقاله : ۸۹/۱/۲۲ - پذیرش مقاله : ۸۹/۸/۶)

چکیده

نانو ذرات Si به روش تبخیر با باریکه بر روی زیر لایه p-Si(111) در زاویای 0° ، 75° و 85° ساخته شد. مقاومت سطحی نمونه ها به روش ون در پائو اندازه گیری و با نمونه زیر لایه سیلیکان مقایسه شد. نتایج نشان داد به علت افزایش زاویه از 75° به 85° نانو ذرات سیلیکان با تخلخل بیشتری شکل می گیرند در نتیجه نمونه 85° توانایی حمل جریان بیشتر در ولتاژهای مشابه از خود نشان می دهد. این در حالیست که مساحت سطحی و در نتیجه مقاومت سطحی نمونه 75° به مراتب بزرگتر از 85° و نمونه 85° به مراتب بزرگتر از زیر لایه سیلیکان می باشد. مورفولوژی سطحی و تصویر سطح مقطعی فیلمها با استفاده از SEM مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه با تخلخل بیشتر دارای مقاومت سطحی کمتر می شود. همچنین مشخصه I-V پیوندگاه nSi/p-Si(111) مورد بررسی قرار گرفت. این پیوندگاه دارای رفتار غیر خطی الکتریکی و دیود گونه می باشد.

واژه‌های کلیدی: روش نهشت (GLAD) (glancing angle deposition) - نانو ذرات Si - مقاومت سطحی - تخلخل .

Growth, structural characterization and Electrical Behavior of Silicon Nano Particles prepared by Evaporation Method with Electron Beam

R. S. Dariani

Department of Physics, Alzahra University

N. Sadeghbeigi

Department of Physics, Azad Islamic University, Share Rey Branch

Abstract

Silicon nano particles were fabricated at angles, 0, 75 and 85 degrees on p-Si(111) wafer by evaporation method with electron beam. Sheet resistance of samples were measured by Van der Pauw method and compared with silicon wafer one's. Results showed that by increasing angle from 75° to 85° silicon nano particles were formed by more porosity, therefore 85° sample can carry more current in similar voltages. Mean while surface area and sheet resistivity of 75° sample was more than 85° sample and also 85° sample was more than silicon wafer. Surface morphology and SEM surface picture were studied. Results showed that samples with more porosity had low sheet resistance. Also, I-V characteristic of nSi/p-Si(111) junction were reviewed. This junction had non linear electric and diode like behavior.

Keywords: Glancing Angle deposition, Silicon Nano Particles, Surface Resistance, Porosity.

E-mail of corresponding author: dariani@alzahra.ac.ir

مقدمه

به تازگی توجه ویژه ای به سیستم های نانو ساختار معطوف شده است. زیرا با گذراندازه ذرات از میکرو به نانو، بدلیل افزایش نسبت سطح به حجم و اثرات محدودیت کوانتومی ناشی از اندازه ذرات برخی از ویژگی های فیزیکی دستخوش تغییر می شوند [۱]. افزایش نسبت سطح به حجم که با کاهش تدریجی اندازه ذره رخ می دهد، باعث غلبه رفتار اتم های واقع در سطح ذره بر رفتار اتم های درونی می شود. این پدیده بر ویژگی های ذره در حالت منفرد و بر اندرکنش آن با دیگر مواد اثر می گذارد. سطح زیاد، نقش مهمی در کارکرد کاتالیزورها و ساختارهایی مانند الکترودها یا افزایش کارایی فناوری هایی همچون پیل سوختی و باتری ها بازی می کند. سطح زیاد نانوذرات باعث اندرکنش زیاد بین مواد مخلوط در نانو کامپوزیت ها می شود و منجر به ویژگی هایی مانند افزایش استحکام یا افزایش مقاومت حرارتی یا شیمیایی می گردد. این مواد در بازه ی بین اثرات کوانتومی اتم ها مولکول ها و خواص مواد توده ای قرار می گیرند و می توان ویژگی های فیزیکی گوناگون آنها را به پدیده های در گستره ابعاد نانومتری همبسته کرد. این توانایی، امکان تغییر و کسب ویژگی های مطلوب را می دهد.

علاوه بر این، کوچکی ابعاد نانو ساختارها آنها را سازنده بلوک های نانو الکترونیک، فوتونیک و مهندسی زیست می کند که به علت خواص منحصر به فردی مانند مقاومت مکانیکی بالا و شدت لومینسانس زیاد [۲] مورد توجه بسیاری از گروه های تحقیقاتی قرار گرفته اند.

در حال حاضر یکی از موضوعات بسیار مهم چگونگی ساخت موثر و قابل کنترل این نانو ساختارها است. چندین رهیافت کلی برای ساخت آنها وجود دارد [۳]. یکی از این روش هایی که توانایی کافی برای تغییر قطر، جهت گیری و مکان رشد نانو ساختارها را دارد و در سال ۱۹۹۸ معرفی و ابداع شد، روش نهشت با زاویه مایل (glancing angle (GLAD deposition) می باشد [۴]، که با کنترل موقعیت زیر لایه، امکان ساخت لایه های مختلف ستونی ابعاد نانو با تخلخل و شکل های کنترل شده را فراهم می آورد. همچنین

این روش به علت دارا بودن مزایای گوناگون دیگر، آینده روشنی در ساخت نانوساختارها، پیش رو دارد. ساختارهای به دست آمده در این روش به ساختار فراکتالی نزدیک بوده و به نوعی می توان از روابط مربوط به این ساختار کمک گرفت [۵]. این روش با استفاده از تبخیر حرارتی، تبخیر با باریکه الکترونی و کندوپاش می تواند انجام شود. اگرچه به علت نیاز به باریکه الکترونی متمرکز در یک نقطه، روش کندوپاش فیزیکی در اولویت نمی باشد، مگر اینکه با روش های خاصی باریکه فرودی بر هدف را باریک نمایند [۶-۸]. لایه می تواند از مواد مختلف مانند $Cu[9] SiO, Cr$ ، MgF_2 [۱۰]، [۱۱] و مواد دیگر باشد. زیرلایه نیز می تواند از جنس شیشه، ویفر سیلیکن [۱۲، ۱۳]، سیلیکن متخلخل [۱۳] و مواد دیگر باشد. ساختار لایه نازک بسته به ثابت (استوانه های صاف [۱۳، ۱۴]، ستون های مایل [۱۵، ۱۶]) یا دوار بودن زیرلایه (شبه فراکتالی [۱۷، ۱۸])، تغییر سرعت زاویه ای با زمان (استوانه های با قطر متغیر [۴])، تغییر زاویه شار فرودی نسبت به زیر لایه به طور پیوسته (مارپیچ [۱۸، ۱۹، ۲۰]) و ناپیوسته (زیگ زاگ [۲۰، ۲۱]) [۲۱] و تغییر دمای زیرلایه [۱۵] متفاوت خواهد بود. با ترکیب فرآیندهای مزبور، ساختارهای دیگر، مانند ستون های پوشش داده شده، ستون های موج، استوانه های زیگ زاگی با قطر متغیر و ساختار گل کلم [۳] را نیز با استفاده از این روش ساخت.

لایه نشانی مایل در اغلب خواص مشاهده پذیر فیلم مثل تنش، چگالی، بی نظمی الکتریکی، بی نظمی مغناطیسی، دو شکستی نوری و دورنگ نمایی [۲۰-۲۴، ۱۸]، رفتارهای الکتروکرمیک اثر دارد. شبیه سازی رایانه ای از رشد لایه نازک در درک رفتار الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی و ساختار لایه بسیار کمک می کند [۲۴، ۲۵].

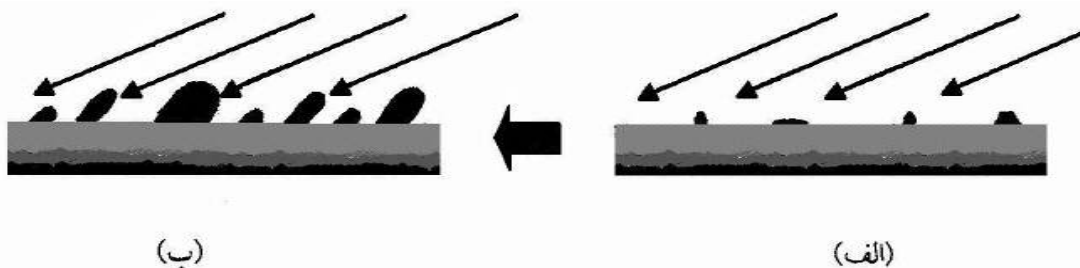
روش GLAD یک روش نهشت تبخیر فیزیکی است که بر پایه روش نهشت زاویه مایل بنا نهاده شده است. بیشتر مکانیزم های اصلی رشد در GLAD مشابه نهشت زاویه مایل است، البته تغییراتی نیز وجود دارد. در شرایط ایده آل در نهشت زاویه مایل در شرایط ایده آل زاویه فرود باریکه تبخیر شده با بردار عمود بر سطح زیر لایه بزرگ است که

در این موارد از روش پل استفاده می شود[۲۶]. در اینجا مساحت اتصال ها ولتاژ و جریان نسبتا بزرگ می باشد، بنابراین مقاومت سطحی اتصال ها کوچک است. یکی دیگر از رایج ترین روش ها در پروب چهار سوزنی است. اشکال عمده این روش محدود بودن چیدمان در یک مربع است. زیرا گاهی اوقات تهیه نمونه ها به شکل مربع دشوار است و در ضمن اغلب نمونه ها به شکل نامنظم هستند.

روش ون در پاو یکی از مناسب ترین روش ها برای نمونه های با شکل دلخواه است. این روش می تواند توصیفی نظری از اندازه گیری بر روی نمونه های با شکل نامنظم را بر پایه نگاشت هم دیس بنا کند و همینطور، چگونه می توان مقاومت ویژه یک نمونه تخت با شکل دلخواه را بدون داشتن طرح جریان، اندازه گیری کرد[۲۷]. در این روش، اتصال ها می تواند در مدار بسته ای در داخل نمونه و به نحو قابل ملاحظه ای کوچک باشند. همچنین نمونه باید از نظر ضخامت همگن و سطح نمونه یکپارچه بوده و حفره های ایزوله نداشته باشد[۲۸-۲۶]. می توان مقاومت را حتی در نمونه هایی از پودر پرس شده[۲۹]، ممزها (MEMS) Micro Electro Mechanical devices، میکروساختارها (با طراحی مدار به روش لیتوگرافی)[۳۰] و لایه های نازک نیمه رسانا[۳۰] از روش ون در پاو استفاده کرد. برای محاسبه مقاومت سطحی به ویژه روش ون در پاو از روابط زیر استفاده می کنیم، [۳۱-۲۶] که اندیس ها بر اساس شکل ۲ برای هر هشت صورت ممکن بیان شده است.

$$R_{1,2,3,4} = \frac{V_{3,4}}{I_{1,2}} \quad (1)$$

$$R_{horizontal} = \frac{R_{23,41} + R_{41,23} + R_{32,14} + R_{14,32}}{4} \quad (2)$$



شکل ۱. اثر سایه اندازی در طی نهشت زاویه مایل (الف) هسته بندی اولیه برای ایجاد مراکز سایه اندازی (ب) ساختارهای ستونی ایجاد شده بواسطه این اثر[۷].

می توان شار بخار فرودی را بصورت برداری در نظر گرفت. این بردار دارای دو مولفه عمودی و جانبی است که سبب می شوند زیرلایه از هر دو جهت عمودی و افقی شار بخار را دریافت نماید. در طی نهشت بر یک زیرلایه تخت، اتم های فرودی بطور تصادفی جزایری را بر روی زیر لایه ایجاد می کنند. در ادامه فرآیند این جزایر به عنوان مراکز سایه اندازی عمل می کنند و جزایر بزرگ، اتم های بیشتری در مقایسه با نمونه های کوچک دریافت خواهند کرد. اثر سایه اندازی در شکل ۱ نشان داده شده است. این فرآیند رقابتی تنها به بلند ترین جزایر اجازه رشد و تبدیل شدن به ستون را می دهد. آشکار است که مولفه جانبی شار فرودی منشا اثر سایه اندازی است. در این روش به دلیل ثابت ماندن مولفه جانبی در طی نهشت، یک لایه ستونی با زاویه مایل شکل می گیرد که قطر ستون ها قابل مقایسه با طول پخش اتم ها است. اندازه ستون های مجزا توسط تحرک پذیری اتم های ماده و شرایط نهشت مشخص می شود. نهشت مواد با تحرک پذیری اتمی زیاد ستون هایی با قطر بزرگتر از نهشت مواد با تحرک پذیری اتمی کم را ایجاد می کند. بطور کلی لایه های نازک رشد یافته به روش نهشت زاویه مایل دارای ساختارهای نانوستونی متخلخل اند. نانوستون ها به سمت باریکه بخار فرودی مایل می شوند و اندازه و چگالی آنها به صورت تابعی از زاویه فرود است. اندازه گیری خواص الکتریکی و مقاومت ویژه نقش مهمی در پژوهش های مربوط به نیم رساناها به ویژه سیلیکن دارد. اندازه گیری های انجام شده در دمای پایین (دمای نیتروژن مایع) مقاومت اتصال ها را از مرتبه $M\Omega$ می دهد، لذا نمی تواند با دقت مناسبی تعیین شود.

حلال های تتراکلرید کربن، استون و اتانول به طور جداگانه شستشو داده شد. زمان در نظر گرفته برای هرکدام از محلول ها ۸ دقیقه انتخاب شد، تا چربی ها و آلودگی ها از روی ویفر کاملاً پاک شود.

قرص های پرس شده از پودر سیلیکان (Merck، چگالی 2.33 gcm^{-3}) بعنوان ماده اولیه برای تبخیر استفاده شدند. برای رشد لایه به این روش، نگهدارنده زیرلایه ای از جنس ورق گالوانیزه با قابلیت تنظیم زاویه زیرلایه، ساخته شد که زیر لایه ها را به آرامی روی آن قرار داده شد و محکم گردید. اتاق سیستم تبخیر با باریکه الکترونی تا فشار 1.5 Pa تخلیه گردید. بعد از حصول این فشار زمینه، مشخصات کاری سیستم در ولتاژ 5 kV و جریان 60 mA تنظیم گردید و لایه ها بر روی p-Si(111) با زاویه های مایل زیرلایه ای 0° ، 75° و 85° به مدت زمان 170 min با آهنگ رونهشت 1.62 nm/min با ضخامت 275 nm تهیه شدند. عمل نهشت در دمای اتاق صورت گرفته است.

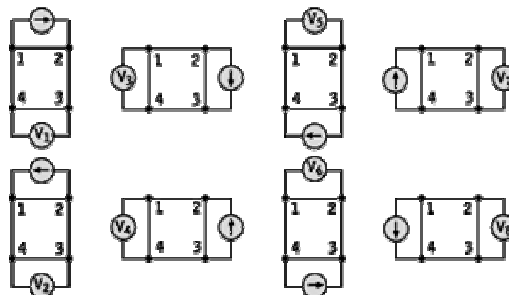
نتایج و بحث

اندازه گیری ها بر روی سه نمونه مختلف انجام شد. نمونه اول زیرلایه سیلیکان، نمونه دوم و سوم نانوذرات سیلیکان که به ترتیب تحت زاویه های 75° و 85° هر دو بر روی زیرلایه سیلیکان به روش GLAD نشانده شد. لازم به ذکر است که نمونه ای در صفر درجه لایه نشانی شد که به علت عدم مشاهده تغییرات قابل ملاحظه در مقادیر مقاومت سطحی اندازه گیری شده به روش ون در پاو، در نمودارها و تصویرهای SEM وارد نشد لیکن در جدول ۱ مقادیر آن آورده شده است

الف - تصویر SEM : برای مشاهده ساختار و تخلخل لایه ها از میکروسکپ الکترونی روبشی (Philips, XL30) استفاده شد. تصاویر SEM مربوط به مرفولوژی و چگونگی سطح فیلم های تهیه شده در زوایای مایل 0° ، 75° و 85° با مقایسه شد، که بیانگر این است که با افزایش زاویه مایل میزان خلل و فرج به دلیل سایه اندازی افزایش می یابد.

$$R_{vertical} = \frac{R_{12,34} + R_{34,12} + R_{21,43} + R_{43,21}}{4} \quad (3)$$

$$\exp\left[\frac{-\pi d}{\rho} R_{vertical}\right] + \exp\left[\frac{-\pi d}{\rho} R_{horizontal}\right] = 1 \quad (4)$$



شکل ۲. اشکال ممکن اندازه گیری ولتاژ و جریان به طور مستقیم

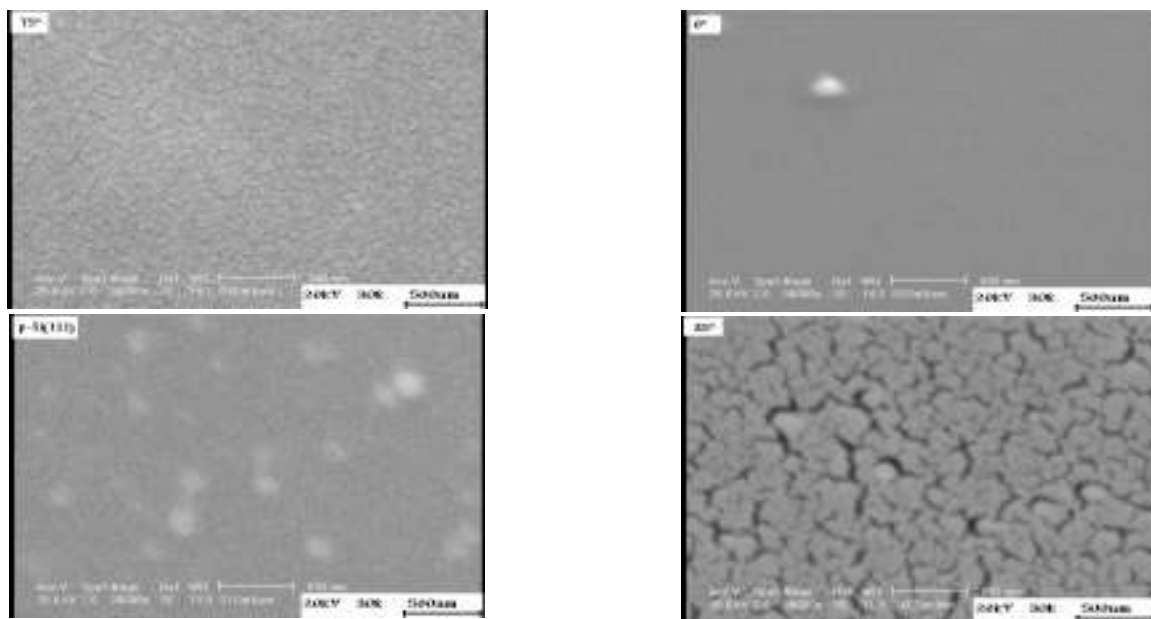
و معکوس [۳۱].

با حل معادله ۴ بر حسب ρ مقاومت سطحی (دو بعدی) نمونه را بدست می آید. ارتباط مقاومت ویژه دو بعدی با مقاومت ویژه سه بعدی $\rho_{2D} = \frac{\rho_{3D}}{d}$ می باشد، که d ضخامت فیلم است [۳۱].

برای استفاده از روش ون در پاو ضخامت نمونه باید بسیار کوچکتر از طول و عرض نمونه باشد. همچنین برای اندازه گیری، باید چهار اتصال اهمی روی نمونه قرار گیرد بطوری که شرایط زیر برآورده شود: اتصال ها روی مرز نمونه باشند (تا جای ممکن نزدیک به مرز) و اتصال ها کاملاً کوچک باشند. در واقع آنها باید تا جای ممکن کوچک باشند. خطای ناشی از صفر نبودن اندازه اتصال ها از مرتبه D/s است که D متوسط شعاع اتصال و s فاصله میان اتصال ها است. به علاوه سرهای اتصال ها باید از یک نوع سیم ساخته شده باشند تا اثرات ترموالکتریک کمینه شوند. به همین دلیل هر چهار اتصال باید از ماده مشابه باشند.

روش تجربی

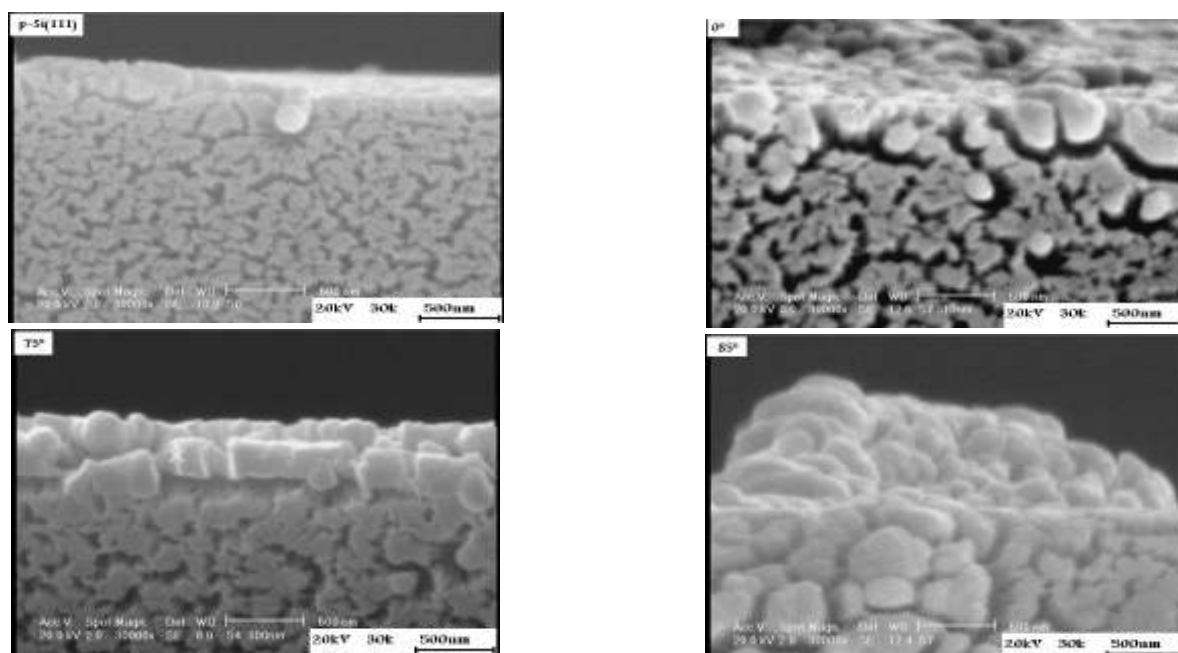
ویفر p type-Si(111) با آلایش بر با ابعاد $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 500 \mu\text{m}$ به عنوان زیرلایه استفاده شد. ویفر زیرلایه ها به روش فراصوتی RCA به ترتیب با



شکل ۳. تصاویر SEM مربوط به ویفر p-Si(111) و لایه های تهیه شده در زاویه های مایل زیر لایه ۰، ۷۵ و ۸۵ درجه بر روی p-Si(111)

ب - مقاومت سطحی : برای اینکه اندازه گیری های روش ون در پاو در شرایط مشابه انجام شود، هر سه نمونه مختلف را به روش زیر آماده سازی نمودیم. برای هر نمونه از چهار سیم مسی به قطر ۰/۵ mm در چهار راس نمونه با چسب نقره چسباندیم.

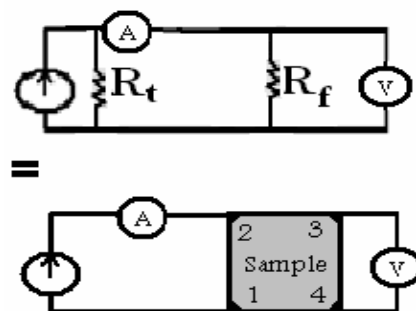
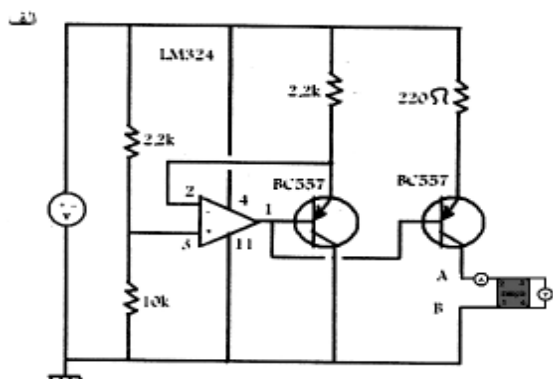
همچنین در شکل های تصویر SEM از مقطع عرضی ویفر سیلیکان و نمونه های ۰°، ۷۵° و ۸۵° نشان داده شده است. هر دو شکل ۴ ب و ج تایید می کند که لایه نشانده دارای ضخامت ۲۰۰nm می باشد. ضمناً شکل ۴ ج در مقایسه با شکل ۴ ب بوضوح نشان می دهد که نمونه ۸۵° نسبت به نمونه ۷۵° دارای میزان تخلخل نسبتاً زیادتری می باشد.



شکل ۴. تصاویر SEM مربوط به سطح مقطع ویفر p-Si(111) و لایه های تهیه شده در زاویه های مایل زیر لایه ۰، ۷۵ و ۸۵ درجه بر روی p-Si(111)

عمل تکرار و با استفاده از معادلات ۱ و ۲ مقادیر $R_{vertical}$ و $R_{horizontal}$ محاسبه شدند. با حل معادله غیرخطی ۳ به وسیله برنامه نوشته شده به زبان فرترن، مقاومت سطحی نمونه ها به دست آمد. مقادیر مقاومت سطحی سه نمونه در بازه جریان از $0.5mA$ تا $10mA$ در جدول ۱ داده شده است.

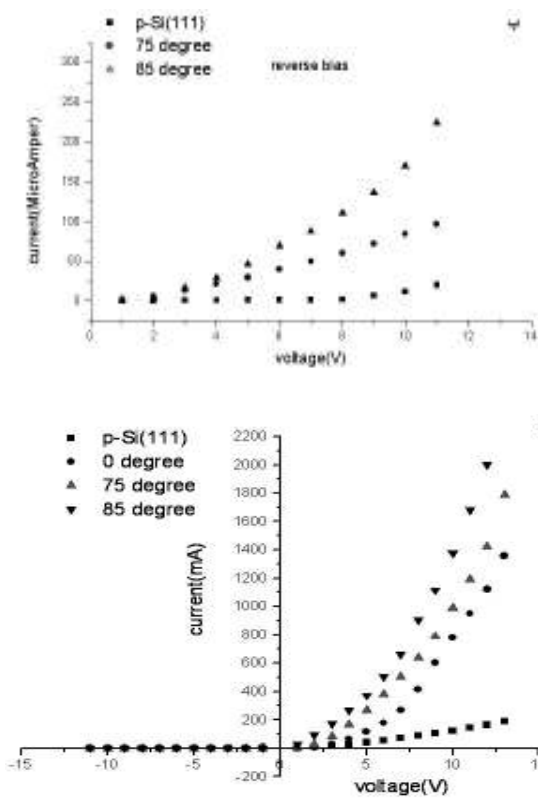
برای ثابت نگه داشتن جریان ورودی به نمونه که با تغییر مقاومت، تغییر می کرد از مدار شکل ۵ استفاده کردیم. این مدار، یک مدار مولد جریان بوده و مستقل از مقاومت نمونه (کمتر از $10K\Omega$) با استفاده از اختلاف پتانسیل کمتر از $12V$ می توان جریان تا $10mA$ را به نمونه اعمال کرد. بدین ترتیب جریان ورودی توسط مولد تنظیم و ولتاژ دو سر نمونه خوانده می شود، سپس برای هر ۸ حالت شکل ۲ این



شکل ۵. الف- مدار استفاده شده به عنوان منبع جریان [۳۲] در شرایط $R_t \ll R_f$

جدول ۱. مقاومت سطحی ویفر سیلیکان و نمونه های لایه نشانی شده در زوایای صفر، ۷۵ و ۸۵ درجه (بر حسب $k\Omega$) در بازه جریان $0.5mA-10mA$

جریان (mA)	ویفر سیلیکان	صفر درجه	۷۵ درجه	۸۵ درجه
0.5	0.48789	0.15023	0.39021	0.38602
0.7	0.58292	0.1331	0.5207	0.51015
1	0.75123	0.12958	0.72461	0.70246
1.5	--	1.12672	1.06276	1.03362
2	1.38861	0.13406	1.40191	1.36818
2.5	--	0.14592	1.73841	1.70183
3	2.05172	0.16041	2.07809	2.0406
3.24	2.38499	0.17064	2.24175	2.20421
4	--	0.17858	2.75262	2.71832
4.5	--	0.19608	3.09172	3.05723
5	--	0.20137	3.43092	3.39646
5.5	3.72729	0.20218	3.76809	3.73494
6	--	0.19767	4.10532	4.0726
6.5	4.39997	0.20456	4.44464	4.41067
7	--	0.2125	4.78238	4.74868
7.5	5.07374	0.20913	5.12087	5.08621
8	--	0.21478	5.45888	5.42395
8.5	5.74748	--	5.7966	5.76174
9	--	--	6.13459	6.09931
9.5	6.42184	--	6.47257	6.43708
10	6.75859	--	6.8109	6.77442



شکل ۶. نمودار ولتاژ جریان، الف) بایاس مستقیم و ب) بایاس معکوس، °۰ مشابه p-Si(111) است ج) ادغام نمودار الف و ب

این ساختار نشان دهنده یک سد دیودی می باشد. یعنی نانوذرات سیلیکان نشانداده شده بر روی زیرلایه ویفر سیلیکان ایجاد یک ساختار متجانس نموده است. این یافته می تواند مبنایی برای ساخت ساختارهای نامتجانس دیگر باشد و بررسی خواص فیزیکی آنها دارای اهمیت قابل توجهی می باشد.

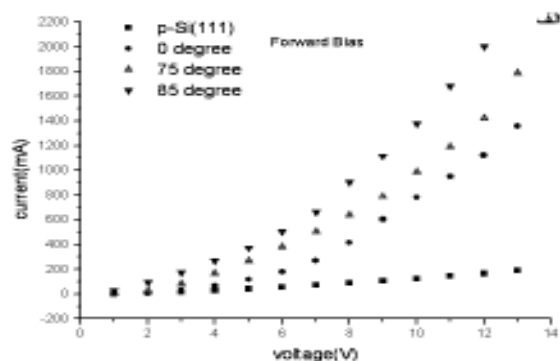
نتیجه گیری

با لایه نشانی با زاویه فرودی مایل در ۷۵° یک لایه نانوذرات سیلیکان با تخلخل کمتر بر روی ویفر سیلیکان تشکیل می شود. نتایج امان نشان داد که بین ویفر سیلیکان و نانوذرات سیلیکان یک ساختار نامتجانس بوجود می آید. این ساختار نامتجانس یک سد دیودی است. در نتیجه طبق منحنی I-V شکل ۶ جریان بیشتری در نمونه ۷۵° نسبت به نمونه سیلیکان در ولتاژهای یکسان مشاهده می شود و این موضوع موید بوجود آمدن سد دیودی است. با لایه نشانی با زاویه فرودی

نتایج نشان می دهد با افزایش جریان ورودی به نمونه از ۰/۵mA تا ۱۰ mA مقاومت سطحی نمونه لایه نشانی شده در صفر درجه از ۰/۱۵ kΩ/□ به ۰/۲۲ kΩ/□ افزایش می یابد در حالیکه در ویفر سیلیکان این افزایش از ۰/۳۹ kΩ/□ به ۰/۴۹ kΩ/□، در نمونه ۷۵ درجه از ۰/۳۹ kΩ/□ به ۰/۸۱ kΩ/□ و در نمونه ۸۵ درجه از ۰/۳۹ kΩ/□ به ۰/۷۷ kΩ/□ می باشد. این نشان می دهد که تغییرات مقاومت سطحی نمونه لایه نشانی شده در صفر درجه در این بازه کم می باشد، در حالیکه تغییرات مقاومت سطحی نمونه های ویفر سیلیکن، ۷۵ و ۸۵ درجه در این بازه قابل توجه می باشد. همچنین می توان مشاهده کرد که در هر جریان مقاومت سطحی نمونه ۸۵ درجه قدری کمتر از نمونه ۷۵ درجه می باشد که آن را می توان به افزایش تخلخل در نمونه ها نسبت داد. پس نمونه ۸۵ درجه توانایی حمل جریان بیشتر در جریان های مشابه از خود را نشان می دهد.

ج- منحنی I-V : مشخصه I-V پیوندگاه زیرلایه- نانوذرات سیلیکان [nSi/p-Si(111)] در دو حالت بایاس مستقیم و معکوس اندازه گیری شد. نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. این پیوندگاه متجانس دارای رفتار غیرخطی مانند دیودگونه یا یکسوساز است.

نکته حایز اهمیت در هر دو بایاس این است که نمونه های ۷۵° و ۸۵° حتی در ولتاژهای پایین نیز رفتار نمایی را از خود نشان می دهند و این نشان دهنده به وجود آمدن یک سد یکسوساز در نمونه های ۷۵° و ۸۵° می باشد. بدین ترتیب به روش لایه نشانی GLAD توانستیم لایه ای متخلخل از سیلیکان را بر روی زیرلایه ویفر سیلیکان بنشانیم که یک ساختار جدید بوجود آمده است.



منابع

1. G. Schmid, *Nanoparticles: From Theory to Application*, Wiley-VCH, (2004).
2. X. Duan, Y. Huang, Y. Cui, J. Wang, and C. M. Lieber, *Nature*, 409 (2001)66-69.
3. Y. P. Zhao, D. X. Ye, G. C. Wang, and T. M. Lub *Novel nano-column and nano-flower arrays by Glancing Angle Deposition*, *Nano Letters*, 2(2002)351-354.
4. K. Robbie, G. Beydaghyan, T. Brown, C. Dean, J. Adams, and C. Buzea, *Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure*, *Review of Scientific Instruments*. Instrum. 75(2004)1089-1097.
5. K. Kaminska, A. Amassian, L. Martinu, and K. Robbie, *Growth of vacuum evaporated ultra porous silicon studied with spectroscopic ellipsometry and scanning electron microscopy*, *Journal of Applied Physics*. 97,013511,(2005).
6. J. C. Sit, D. Vick, K. Robbie, and M. J. Brett, *Thin film microstructure control using glancing angle deposition by sputtering*, *J. Mater. Journal of Materials Research*., 14(1999)1197-1199.
7. K. Robbie, *Glancing angle deposition*, Ph. D. Thesis, University of Alberta (1998).
8. J. P. Singh, T. Karabacak, T. M. Lu, and G. C. Wang, *Field ionization of argon using β -phase W nanorods*, *Applied Physics Letters*, 85(2004) 3226-3228.
9. K. Robbie, J. C. Sit, and M. J. Brett, *Advanced techniques for glancing angle deposition*, *J. Vac. Sci. Journal of Vacuum Science and Technology B*, 16(1998)1115-1122.
10. H. Alouach and G. J. Mankey *Critical height and growth mode in epitaxial copper nanowire arrays fabricated using glancing angle deposition*, *Applied Physics Letters*, 86(2005)123114.
11. <http://physics.queensu.ca>
12. C. Buzea, G. Beydaghyan, C. Elliott, and K. Robbie, *Control of power low scaling in growth of silicon nanocolumn pseudo-regular arrays deposited by glancing angle deposition*, *Nanotechnology*, 16(2005)1986-1992.
13. S. V. Kesapragada and D. Gall, *Two-component nanopillar arrays grown by Glancing Angle Deposition*, *Thin Solid Film*, 494(2009)234-239.

مایل 85° روی ویفر سیلیکان، دوباره میان ویفر سیلیکان و لایه نانوذرات سیلیکان یک سد دیودی به وجود می آید. سد دیودی 75° با سد دیودی 85° متفاوت می باشد. این تفاوت به علت افزایش زاویه از 75° به 85° می باشد، زیرا نانوذرات سیلیکان با افزایش زاویه یا تخلخل بیشتری بوجود می آیند. در نتیجه سد دیودی 85° توانایی حمل جریان بیشتری در ولتاژهای یکسان از خود نشان می دهد. از سوی دیگر می توان اینگونه تعبیر کرد که در نمونه 85° سد بوجود آمده یک سد دیودی بزرگتر نسبت به سد 75° می باشد و در نتیجه افزایش جریان بیشتری را انتظار داریم.

مقاومت سطحی با مساحت سطحی ارتباط مستقیم دارد و اندازه گیری مقاومت سطحی نمونه های ساخته شده با استفاده از تکنیک ون در پائو برای نمونه های ویفر سیلیکان، نمونه 75° و نمونه 85° در جدول ۱ تحت جریان های متفاوت داده شده است. در هر جریان، مقاومت ویفر سیلیکان کمتر از نمونه های 75° و 85° می باشد. این اختلاف در تمام بازه جریان 10mA - 0.5mA مشاهده گردید (جدول ۱). علت آن را می توان به شرح زیر توضیح داد، به این صورت که با افزایش مساحت سطحی، مقاومت سطحی نیز بزرگ خواهد شد. در سه نمونه مورد بررسی به ترتیب نمونه 85° دارای مساحت سطحی بزرگتری نسبت به ویفر سیلیکن و نمونه 75° نیز دارای مساحت سطحی بزرگتری نسبت به نمونه 85° می باشد. علت این امر به تعداد نانوذرات نشانده شده بر روی زیرلایه بستگی دارد. همانطور که قبلا توضیح داده شد و در شکل ۸ الف و ب نشان دادیم، تعداد نانوذرات بیشتری در زاویه 75° وجود دارد که پستی و بلندی های بیشتری ایجاد می کند در حالیکه در نمونه 85° تعداد نانوذرات کاهش می یابد. پس مساحت سطحی نمونه 75° به مراتب بزرگتر از 85° و همچنین مساحت سطحی 85° به مراتب بزرگتر از ویفر سیلیکان می باشد. پس مشاهده می کنیم جدول ۱ توافق کاملی با نظریه ارایه شده دارد.

14. G. Beydaghyan, C. Buzea, Y. Cui, C. Elliott, and K. Robbie, *Ex situ ellipsometric investigation of nanocolumns inclination angle of obliquely evaporated silicon thin films*, Applied Physics Letters. 87(2005)153103.
15. F. Chaffar Akkari, M. Kanzari, and B. Rezig, *Nanocolumnar CuInS₂ thin films by glancing angle deposition*, Physica E, 40(2008)2577-2582.
16. K. Robbie and M. J. Brett, *Sculptured thin films and GLAD (Glancing Angle Deposition): growth mechanics and applications*, Journal of Vacuum Science and Technology A 15(1997)1460-1465.
17. K. Robbie, L. J. Friedrich, S. K. Dew, T. Smy, and M. J. Brett, *Fabrication of thin films with highly porous microstructures*, Journal of Vacuum Science and Technology A. 13(1995)1032-1035.
18. K. Robbie, M. J. Brett, and A. Lakhtakia, *Chiral sculptured thin films*, Nature, 384(1996)616-616.
19. K. Robbie, D.J. Broer, and M.J. Brett, *Chiral nematic order in liquid crystals imposed by an engineered inorganic nanostructure*, Nature 399(1999)764-766.
20. K. Kaminska and K. Robbie, *Birefringent omnidirectional reflector*, Applied Optics, 43(2004)1570-1576.
21. C. Bzuea and K. Robbie, *Nano-Sculptured Thin Film Thickness Variation With Incidence Angle*, J. Optoelectronics and Advanced Materials, 6(2004)1263-1268.
22. K. Kaminska, T. Brown, G. Beydaghyan, and K. Robbie, *Vacuum evaporated porous silicon photonic interference filters*, Applied Optics, 42(2003)4212-4219.
23. G. Beydaghyan, K. Kaminska, T. Brown, and K. Robbie, *Enhanced birefringence in vacuum evaporated silicon thin films*, Applied Optics, 43(2004)5343-5349.
24. K. Kaminska, M. Suzuki, K. Kimura, Y. Taga, and K. Robbie, *Simulating structure and optical response of vacuum evaporated porous rugate filters*, Journal of Applied Physics, 95(2004)3055-3062.
25. J. Yu and J. G. Amar, *Dynamical scaling behavior in two-dimensional ballistic deposition with shadowing*, Physical Review E, 66(2002)021603.
26. L. J. van der Pauw, *A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape*, Philips Technical Review, 20(1958)220-224.
27. L. J. van der Pauw, *A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape*, Philips Research Reports, 13(1958)1-9.
28. D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley and Sons Inc. (2006).
29. R. Bissessur, W. White, and D. C. Dahn, *Electrical characterization of conductive polymers and their intercalated nanocomposites with molybdenum disulfide*, Materials Letters, 60(2006)248-251.
30. M. Din and R. D. Gould, *Van der Pauw resistivity measurements on evaporated thin films of cadmium arsenide, Cd₃As₂*, Applied Surface Science, 252(2006)5508-5511.
31. *Applied Mathematics*, G. D. Mahan, Springer,(2001).
32. J. Millman, *Integrated Electronics*, Mcgraw Hill Higher Education, 23rd Edition (2002).