

مطالعه تاثیر کاشت یونی بر ساختار بلوری و مورفولوژی سطح تک بلور سیلیسیم

عرفان لطفی^۱، داوود آقا علی گل^۲، مهرداد شیروانی^۳، علی باقی زاده^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، گروه فیزیک؛ ^۲گروه فیزیک پژوهشگاه علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران؛ ^۳بخش لیزر نیمه هادی پژوهشگاه لیزر، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

چکیده

در این مقاله آسیب بلوری ایجاد شده بر اثر کاشت ناخالصی ژرمانیوم با دو دز و انرژی متفاوت در تک بلور سیلیسیم بررسی شده است. دز و انرژی ناخالصی های ژرمانیوم کشت شده در سیلیسیم عبارت است از: $1 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^2$ با انرژی 35 keV و $5 \times 10^{16} \text{ atoms/cm}^2$ با انرژی 100 keV . آسیب بلوری ایجاد شده، با استفاده از تکنیک RBS-Channeling بررسی و پروفایل اتم های سیلیسیم جابجا شده از مکان شبکه ای خود بر حسب عمق، بعد از کاشت یونی به دست آمده است. همچنین اثر بازپخت حرارتی بر ترمیم شبکه بلوری سیلیسیم نیز مطالعه و بررسی شده است. علاوه بر این مورفولوژی سطح بلور سیلیسیم در جهت (۱۰۰) که با یون های ژرمانیوم کاشت شده است، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) قبل و بعد از بازپخت حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است.

Studying of ion implantation effect on crystal structure and surface morphology of Silicon single crystal

Erfan Lotfi,¹ Davoud Agha-Aligol,² Mehrdad Shirvni,³ Ali Baghizadeh

¹Azad University of Sanandaj, Physics Department ² Physics Department, Nuclear Science Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran; ³Semiconductor Laser Lab., Laser Research Institute, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran

Abstract

In this paper, we have investigated the crystal damage created after ion implantation into Si(100) single crystal. The dose and energy of implanted ions are $1 \times 10^{15} \text{ Ge}^+/\text{cm}^2$ with 35keV energy and $5 \times 10^{16} \text{ Ge}^+/\text{cm}^2$ with 100keV energy. The created damage has studied with RBS-Channeling technique and damage depth profile of displaced Si atoms is extracted from RBS-C results. Also, Si surface morphology before and after annealing has studied with Atomic Force Microscopy.

مقدمه

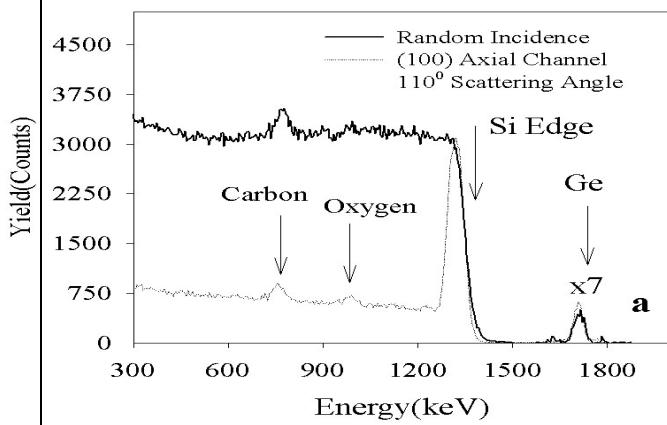
روشها که کاربرد وسیعی در این زمینه دارد-RBS Channeling(RBS-C) است. در این تحقیق آسیب بلوری ایجاد شده بر اثر کاشت یونهای ژرمانیوم و اثر فرآیند بازپخت گرمایی در ترمیم این آسیب با استفاده از تکنیک RBS-C بررسی شده است. همچنین در این تحقیق سعی شده است تا مورفولوژی سطح بلور سیلیسیم در جهت (۱۰۰) که با یون های ژرمانیوم در دزهای مختلف کاشت شده است با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) قبل و بعد از بازپخت گرمایی مورد بررسی گردد.

روش انجام آزمایش:

در آزمایشات حاضر از ویفرهای سیلیسیم با جهت بلوری (۱۰۰) که دارای مقاومت ویژه $15 \Omega - \text{cm}$ بودند استفاده شده است و یونهای Ge^+ به روش کاشت یونی وارد زیر لایه سیلیسیم شده‌اند. دزهای کاشته شده در سیلیسیم $1 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^2$ با انرژی 35 keV و 5×10^{16} با انرژی 100 keV می‌باشند. فرایند باز

امروزه در بین ناخالصی‌هایی که در زیر لایه سیلیسیم کشت می‌شود ژرمانیوم از اهمیت خاصی برخوردار است و استفاده فراوانی در صنایع نیمه هادی پیدا کرده است. مطالعات نشان می‌دهد که خواص الکتریکی و گرمایی بلورسیلیسیم ارتباط تنگاتنگی با ساختار سطحی و عمقی بلور دارد.[۱].

یکی از مسائل قابل توجه در بررسی نمونه های تحت بمباران یونی، اثر اولیه ایجاد شده توسط یونهای بمباران کننده بر شبکه بلور میزبان می باشد. در حین انجام کشت یونی در سیلیسیم، زیر لایه بلوری سیلیسیم دچار برخی آسیب‌ها و ناآرامی‌های بلوری می‌شود که این کار باعث می‌شود زیر لایه سیلیسیم از حالت بلوری خارج شده و به صورت آمورف(غیر کریستالی) درآید. برای مطالعه آسیب‌های شبکه‌ای ایجاد شده در کریستال‌ها روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که از میان آنها می‌توان به XRD، TEM و RBS-C اشاره کرد[۲]. اما یکی از این



شکل ۱. طیف های RBS به دست آمده با ذرات هلیوم فرودی با انرژی keV ۲۰۰۰ و زاویه پراکندگی ۱۱۰ درجه در دو راستای کانالی (خط کمرنگ) و کاتوره ای (خط پررنگ) برای دز و انرژی کاشت کمتر.

دلیل این امر جابجایی اتم های سیلیسیم از مکان های شبکه ای بر اثر برخورد یون های ژرمانیوم در فرآیند کاشت یون است. ناحیه آسیب مشابهی نیز برای بلور سیلیسیم کاشت شده با دز $5 \times 10^{16} \text{ Ge}^+/\text{cm}^2$ و انرژی ۱۰۰ keV در طیف کانالی دیده می شود که طیف آن نشان داده نشده است. مطابق با نظریه مشهور Modified Kinchin Pease [۳] پارامتر اصلی در ایجاد آسیب بلوری اتلاف انرژی یون های ژرمانیوم کاشت شده در نمونه است که این انرژی تلف شده می تواند به اتم های ماده هدف منتقل شود و این اتم ها را از مکان های شبکه ای خود جابجا کند. علاوه بر پیشگویی مدل بالا، پارامتر مهم دیگری که در چگالی اتم های جابجا شده سیلیسیم موثر است مقدار دز ژرمانیوم کاشت شده است، به طوریکه افزایش دز، افزایش تعداد برخوردهای یون کاشت شده با اتم های هدف را به دنبال دارد. این پارامتر به خصوص در دزهای بالای کاشت، باعث ایجاد لایه های کاملاً آمورف در بلور می گردد، زیرا در زمان یکسان تعداد برخوردهای یون - اتم هدف افزایش پیدا می کند. محاسبه عمق آسیب دیده در سطح دو نمونه کاشت شده با انرژی و دزهای متفاوت با استفاده از طیف های RBS، نشان می دهد که برای دز کمتر \AA ۵۵۰ از سطح بلور آمورف می شود در حالیکه برای دز و انرژی بالاتر \AA ۱۵۰۰ از سطح نمونه آمورف می شود.

شکل (۲-الف) طیف RBS-C از نمونه کاشت شده با دز و انرژی پایین تر بعد از بازپخت گرمایی در دمای 800°C به مدت ۳۰ دقیقه در محیط گاز N_2 را نشان می دهد. همانطور که طیف نشان می دهد ناحیه آسیب دیده از شبکه بلوری سیلیسیم بر اثر کاشت یون بعد از بازپخت ترمیم شده است.

پخت حرارتی در کوره ای لوله ای با ناحیه یکنواخت دمایی در حدود ده سانتیمتر با عبور گاز N_2 در دماهای مختلفی انجام شده است و اندازه گیری دما با دقت سه درجه سانتیگراد انجام گرفته است.

برای اندازه گیری آسیب های بلوری ایجاد شده در سیلیسیم از شتابدهنده و اندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شده است. آنالیز RBS-C با یون های فرودی هلیوم با انرژی ۲ MeV در زاویه فرود عمود بر سطح نمونه و زاویه برگشتی ۱۶۵ درجه انجام شده است. تصاویر AFM نمونه ها در مرکز لیزر نیمه هادی پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران گرفته شده است.

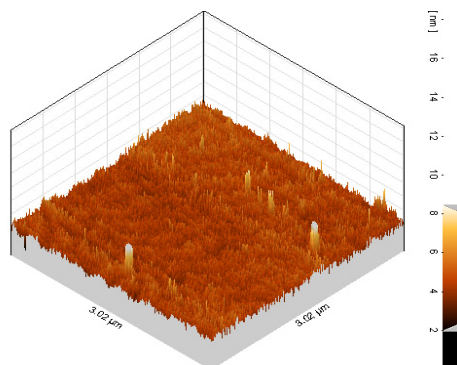
نتایج تجربی و بررسی نتایج:

در این بخش نتایج تجربی به دست آمده از آنالیز RBS-C و AFM ارائه و بررسی می شود. شکل ۱ طیف RBS نمونه کاشت شده با دز $1 \times 10^{16} \text{ Ge}^+/\text{cm}^2$ و انرژی ۳۵ keV را در دو راستای کانالی و کاتوره ای نشان می دهد. همان طور که طیف کانالی نشان می دهد به دلیل اینکه در راستای بلوری چگالی اتم های هدف کاهش پیدا می کند بنابراین تعداد برخوردهای یون های فرودی با اتم های هدف نیز کاهش می یابد. در نتیجه آسیب های بلوری ایجاد شده در این راستای بلوری و همچنین ناخالصی هایی که در این راستای بلور قرار دارند با دقت بیشتری نسبت به طیف کاتوره ای دیده می شوند. در شکل ۱ طیف پررنگ مربوط به ذرات هلیوم برگشتی از نمونه است که در راستای غیر بلوری به سطح نمونه تابیده شده اند. طیف کم رنگ نیز ذرات هلیوم برگشتی را نشان می دهد که در راستای بلوری (۱۰۰) به سمت نمونه سیلیسیم تابیده شده اند. به دلیل کاهش تعداد اتم های سیلیسیم در این راستای بلوری نسبت به راستای غیر بلوری (کاتوره ای)، کاهش واضح در تعداد ذرات هلیوم برگشتی از نمونه دیده می شود (شکل ۱).

در طیف کانالی و در لبه سیلیسیم تعداد ذرات برگشتی افزایش و سپس کاهش ناگهانی را نشان می دهد. این پیک در لبه طیف نشان می دهد که در این راستای بلوری چگالی اتم های سیلیسیم نزدیک به چگالی اتم های سیلیسیم در راستای غیر بلوری (کاتوره ای) است.

Archive of SID

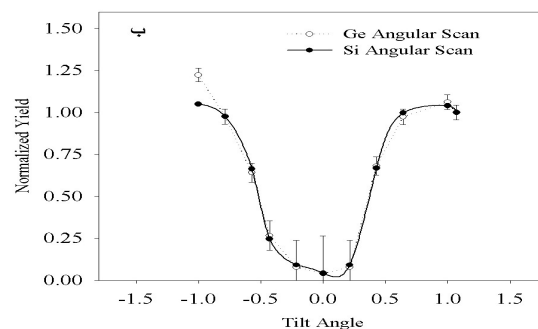
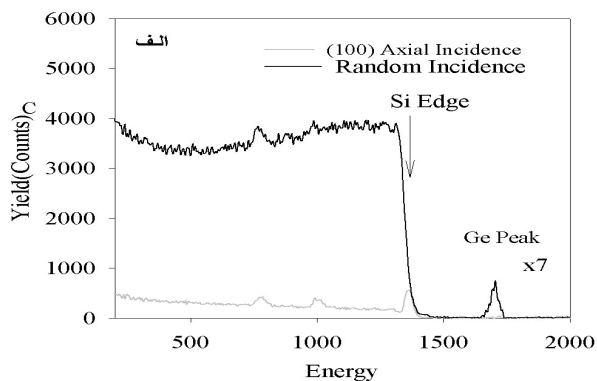
توزیع اتم های ژرمانیوم در این نمونه قبل از کاشت به گونه ای بوده است که بخش عمده ای از اتم های ژرمانیوم نزدیک مرکز کانال متمرکز شده بودند (شکل ۱) که این مطلب از مقایسه پیک های ژرمانیوم در این شکل و کاهش ارتفاع پیک ژرمانیوم در طیف کانالی نسبت به طیف غیرکانالی واضح است. بنابراین اتم های ژرمانیوم به انرژی بیشتری نیاز دارند تا بتوانند بر سد پتانسیل اتم های سیلیسیم در مکان شبکه ای غلبه کنند و جایگزین این اتم ها در مکان های بلوری شوند.



شکل ۳. تصویر سه بعدی از سطح بلور سیلیسیم کاشت شده با دز و انرژی ۳۵ keV در ناحیه ای با ابعاد $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$.

بررسی مورفولوژی نمونه های کریستالی کاشت شده یا بازپخت شده بعد از فرآیند مورد نظر با کمک آنالیز AFM امکان پذیر است. شکل ۳ تصویر AFM از نمونه سیلیسیم کاشت شده با دز و انرژی کمتر را نشان می دهد. تصویر سه بعدی شکل ۴ نشان می دهد که آسیب بلوری ایجاد شده در عمق بلور در سطح بلور وجود ندارد. نتیجه مشابهی برای نمونه کاشت شده با دز و انرژی بیشتر به دست می آید (تصویر آن نشان داده نشده است).

مطابق با پیشگویی نظریه Kinchin-Pease چون در سطح بلور اتلاف انرژی یون های ژرمانیوم فرودی بسیار کم است بنابراین آسیب بلوری قابل ملاحظه ای وجود ندارد. جهت به دست آوردن و مقایسه پستی و بلندی های سطح از پارامتر S_q استفاده می شود که نتیجه محاسبه آماری توسط نرم افزاری مانند DME-SPM [۵] روی ناحیه مورد نظر از تصویر AFM است. پارامتر S_q اندازه پراکندگی داده ها از مقدار میانگین ارتفاع در ناحیه مورد بررسی است. مقدار این پارامتر برای نمونه های مختلف در جدول ۱ داده شده است. به وضوح دیده می شود که مقدار این پارامتر برای دو نمونه کاشت شده قبل از بازپخت تفاوت چندانی با هم ندارند چرا که اتلاف انرژی برای این دو انرژی کاشت یون های ژرمانیوم در سطح تقریباً یکسان است.

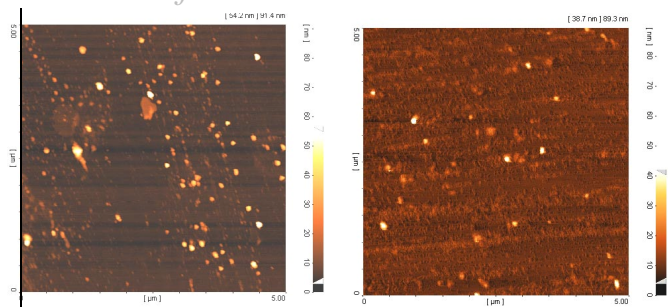


شکل ۲. طیف های RBS در دو راستای کانالی و کاتوره ای به دست آمده با ذرات He^+ با انرژی ۲ MeV و زاویه پراکندگی 165° (الف) و نمودار بهره زاویه ای که با انتخاب دو ناحیه مشخص از طیف های RBS شامل پیک ژرمانیوم و لبه سیلیسیم در زوایای فرود متفاوت باریکه He^+ نسبت به نمونه به دست می آید (ب).

درصد اتم های ژرمانیوم که بعد از بازپخت در مکان های شبکه ای اتم های سیلیسیم قرار می گیرند را می توان با رابطه (۱) محاسبه نمود:

$$F_s = \frac{1 - \chi_{\min}(Ge)}{1 - \chi_{\min}(Si)} \quad (1)$$

که در این رابطه $\chi_{\min}(Ge)$ مینیمم بهره مربوط به ژرمانیوم و $\chi_{\min}(Si)$ مینیمم بهره مربوط به اتم های سیلیسیم است [۴]. نتایج محاسبات برای یون های کاشت شده با دز و انرژی پایین تر در شکل (۲-ب) نشان می دهد که ۹۵ درصد اتم های ژرمانیوم در مکان های شبکه ای سیلیسیم قرار گرفته اند، این مقدار برای دمای بازپخت 700°C حدود ۷۰ درصد به دست می آید. این نتیجه نشان می دهد دمای بازپخت بالاتر برای جایگزینی اتم های ژرمانیوم در دز و انرژی کاشت پایین تر ضروری است. در حالیکه جایگزینی اتم های ژرمانیوم برای دز و انرژی بالاتر در دمای بازپخت 700°C بیشتر از ۹۰ درصد است. علت پایین بودن دمای بازپخت 700°C برای جایگزینی اتم های ژرمانیوم در شبکه در نمونه ای با دز و انرژی کمتر این است که



شکل ۵. تصاویر AFM از سطح سیلیسیم کاشت شده با 1×10^{15} یون ژرمانیوم و 200 keV انرژی بعد از بازپخت در دمای 700°C (تصویر سمت چپ) و دمای 800°C (تصویر سمت راست).

نتیجه گیری

نتایج بدست نشان می دهد که کاشت یون های ژرمانیوم با دز و انرژی استفاده شده در این آزمایش می تواند سطح بلور را آمورف کند. ولی میزان آسیب ایجاد شده در شبکه برای دزها و انرژی های کاشت متفاوت یکسان نیست. آنالیز RBS-C نشان می دهد برای دز کمتر تجمع اتم های ژرمانیوم در مرکز کانال زیاد است در حالیکه برای دز کاشت بیشتر توزیع کاتوره ای اتم های ژرمانیوم وجود دارد. همچنین بازپخت حرارتی نمونه ها نشان می دهد که برای دز کمتر، دمای بازپخت بالاتری نیاز است تا جایگزینی تقریباً کاملی از اتم های ناخالصی در مکان های شبکه ای بلور را به دست آوریم در حالیکه برای دز کاشت بالاتر دمای پایین تری مورد نیاز است. بررسی مورفولوژی سطح با AFM نشان داد بعد از بازپخت، جزایر کوچکی در سطح بلور در حال شکل گیری است، در حالیکه قبل از بازپخت، چنین جزایری وجود نداشتند. همچنین پستی و بلندی های سطح بعد از بازپخت افزایش قابل ملاحظه ای پیدا می کند، بطوریکه در نمونه کاشت شده با دز و انرژی کمتر، با افزایش دمای بازپخت مقدار پستی و بلندی های سطح افزایش پیدا می کند.

مراجع

- [۱]- S. M. Sze, "VLSI Technology", Mc Graw-Hill, 1983.
 [۲]- J.R. Bird and J.S. Williams "Ion Beam For Materials Analysis" Academic Press, 1989
 [۳]- J.F. Ziegler, J.P. Biersack, and U. Littmark. *The Stopping and Range of Ions in Solids* (Pergamon Press, New York, 1985) Vol. 1
 [۴]- L. Shao and M. Nastasi, Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 064103
 [۵]- www.DME-SPM.com
 [۶]- A. Terrasi, S. Scalese, M. Re, E. Rimini, J. Appl. Phys. **91**(2002)6754

جدول ۱. نتایج محاسبه پارامترهای S_q ، اندازه پراکندگی داده ها از مقدار میانگین ارتفاع و S_q که انحراف از مقدار میانگین ارتفاع در ناحیه مورد نظر است برای نمونه های مختلف داده شده است

| دز کاشت | انرژی | دمای بازپخت | $S_q(\text{nm})$ | $S_q(\text{nm})$ |
|---------------------------------------|---------|---------------------|------------------|------------------|
| $1 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ | ۳۵ keV | - | ۰.۳۹۱ | ۰.۵۲۷ |
| $1 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ | ۳۵ keV | 700°C | ۰.۴۷۳ | ۰.۶۵۵ |
| $1 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ | ۳۵ keV | 800°C | ۱.۳۹ | ۱.۸۷۰ |
| $5 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ | ۱۰۰ keV | - | ۰.۴۳۱ | ۰.۵۴۶ |
| $5 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ | ۱۰۰ keV | 700°C | ۸.۱۳۰ | ۱.۱۷۰ |

جدول ۱ نشان می دهد برای نمونه کاشت شده با دز و انرژی کمتر بعد از بازپخت مقدار S_q در دمای 700°C کمتر از دمای 800°C است. شکل ۴ تصویر دو بعدی از سطح بلور برای دو دمای بازپخت متفاوت را نشان می دهد. همانطور که از این تصاویر مشخص است تشکیل جزیره های کوچک ژرمانیوم بر اثر رسوب اتم های کاشت شده موجود در سطح نمونه قابل مشاهده است. البته باید توجه کرد که بعد از بازپخت در محیط نیتروژن امکان تشکیل لایه نازک اکسید سیلیسیم در سطح وجود دارد. در شکل (۲-الف) از طیف RBS-C می توان دو قله کوچک مشاهده نمود که قله مشاهده شده در انرژی کمتر (750 keV) مربوط به کربن و قله بعدی در انرژی 1100 keV مربوط به اکسیژن است. مقدار کم این عناصر در طیف RBS نشان دهنده ضخامت نازکی از لایه اکسید تشکیل شده بر روی سطح سیلیسیم است. نتایج اندازه گیری های AFM برای دزها و انرژی کاشت متفاوت ژرمانیوم بعد از اکسیداسیون توسط A. Terrasi et al

[۶] نشان می دهد برای زمان های اکسیداسیون خیلی کم مقدار S_q کمتر از 1 nm است که این مقدار با اندازه گیری های ما در این آزمایش توافق خوبی دارد. در شکل ۴ اندازه میانگین جزایر تشکیل شده برای دمای بازپخت کمتر حدود 90 nm به دست می آید در حالیکه برای دمای بازپخت بالاتر این مقدار در حدود 130 nm است. مطابق با جدول ۱ مقدار S_q برای دز و انرژی بالاتر بعد از بازپخت در 700°C تغییر عمده ای پیدا می کند. تصویر AFM نشان می دهد که جزایر به وجود آمده در سطح این نمونه بزرگتر از جزایر به وجود آمده برای دز و انرژی کمتر است. علت این تغییر را می توان به مقدار بیشتر اتم های ژرمانیوم در واحد سطح نسبت داد.

