



آنالیز RBS-Channeling ابزاری توانمند جهت مطالعه ساختار بلوری جامدات

علی باقی‌زاده*، داوود آفاعلی گل، امیدرضا کاکویی، علیرضا طالبی طاهر، محمد لامعی رشتی، محمد فرمهینی فراهانی
آزمایشگاه واندوگراف، پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

چکیده: بررسی ساختار بلوری به روش‌های آنالیز به وسیله باریکه یونی، افق جدیدی از درک ساختار بلوری و نقص‌های موجود در بلور را امروزه به روی پژوهشگران گشوده است. در این مقاله بطور خلاصه مفاهیم و کاربردهای آنالیز RBS-Channeling در بررسی ساختار بلوری مواد معرفی می‌شود؛ مختصری هم از کاربردهای این روش آنالیز در زمینه بررسی نمونه‌های نیم‌رسانا گنجانده شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز با باریکه یونی، بیناب‌نمایی پراکندگی رادرفورد، کانال زنی یونی، ساختار بلوری، نقایص بلوری

RBS-Channeling Analysis as a Powerful Tool to Study the Crystal Structure of Materials

A. Baghizadeh*, D. Agha Ali Gol, O.R. Kakuee, A.R. Talebi Taher, M. Lamehi Rashti,
M. Farmahini Farahani

Van de Graaff Laboratory, Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,
AEOL, P.O. Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Abstract: The Ion Beam Techniques have opened a new window to study crystal structures and imperfections of crystals. In this paper, we try to briefly describe concepts and applications of RBS-Channeling to determine crystal parameters and disorders. Some experimental results of the analysis of semiconductor materials are presented in this paper, which has been obtained by means of RBS-Channeling technique.

Keywords: Ion Beam Analysis, Rutherford Backscattering Spectroscopy, Ion Channeling, Crystal Structure, Defects

*email: mlamehi@aeoi.org.ir

۱- مقدمه

محورها و صفحات بلوری، بررسی مکان اتم‌های شبکه و اتم‌های ناخالصی موجود در شبکه، تعیین ساختار بی‌شکل یا بلوری یک ماده، بررسی نقایص بلوری، مطالعه رشد همگن لایه‌های بلوری مختلف روی یکدیگر، تعیین غلظت و آسیب ایجاد شده بر اثر برخورد یون با جامد و ... از جمله کاربردهای متداول این روش آنالیز به حساب می‌آیند.

در این مقاله ابتدا سعی شده است تا روش‌های معمول آنالیز با باریکه یونی، به عنوان پایه‌ای برای معرفی روش‌های پیچیده‌تر آنالیز با باریکه یونی معرفی گردد. در قسمتهای دوم و سوم مقاله، اصول تجربی و پارامترهای مهم در آنالیز RBS-Channeling بیان می‌شوند. برخی از کاربردهای این روش آنالیز در بخشهای چهارم تا نهم این مقاله ارائه شده‌اند که نتایج آنالیزهای انجام شده توسط نگارندگان مقاله‌اند. در قسمت نتیجه‌گیری، به محدودیتهای این روش آنالیز اشاره مختصری شده است.

۲- معرفی روش RBS و PIXE

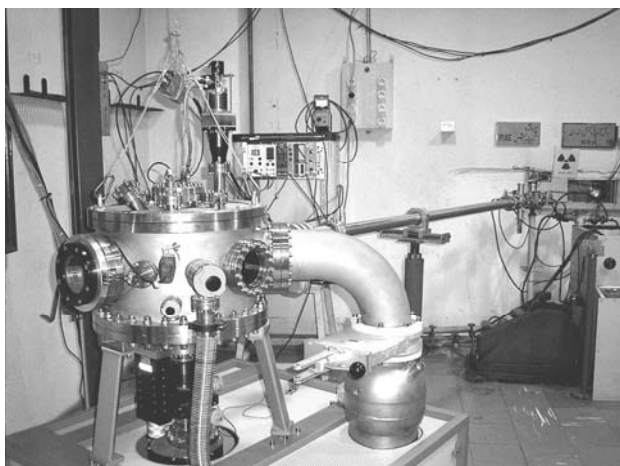
در برخورد ذره باردار پرنانرژی با هدف جامد پدیده‌های مختلفی رخ می‌دهد که از آن جمله می‌توان به پراکندگی کشتان پرتابه و گسیل اشعه X مشخصه عناصر هدف اشاره کرد. این دو روش آنالیز عنصری با باریکه پروتون، دوتریوم یا هلیوم با انرژی در حدود چند MeV قابل اجرا است. در روش RBS، ذره پرتابه پس از برخورد با یکی از اتم‌های هدف به صورت کشتان پراکنده می‌شود. هر چه جرم اتم هدف کوچک‌تر و عمقی که برخورد در آن انجام می‌گیرد بیشتر باشد، انرژی ذره برگشتی کوچک‌تر است. به این ترتیب می‌توان ضخامت و نوع عنصر لایه‌های مختلف هدف را مشخص کرد [۱]. در روش PIXE^(۱)، ذره پرتابه در اثر برخورد با اتم‌های هدف، یکی از الکترون‌های لایه داخلی آن را خارج می‌کند و اتم برای بازگشت به حالت پایه، پرتو X مشخصه خود را گسیل می‌کند [۵]. انرژی این پرتو، نوع اتم و فراوانی آن، غلظت اتم در نمونه را مشخص می‌کند.

در این دو روش آنالیز اساس کار، برخورد ذرات فرودی با اتم‌های هدف است. اندرکنش بین پرتابه و هدف اندرکنشی کولنی است. چنانچه به دلایلی این اندرکنش کاهش یابد، میزان آن و در نتیجه ذرات برگشتی (در مورد RBS) و یا پرتوهای X (در مورد PIXE) کاهش می‌یابد. یکی از موارد کاهش اندرکنش این است که هدف، تک بلور و راستای فرود پرتابه در

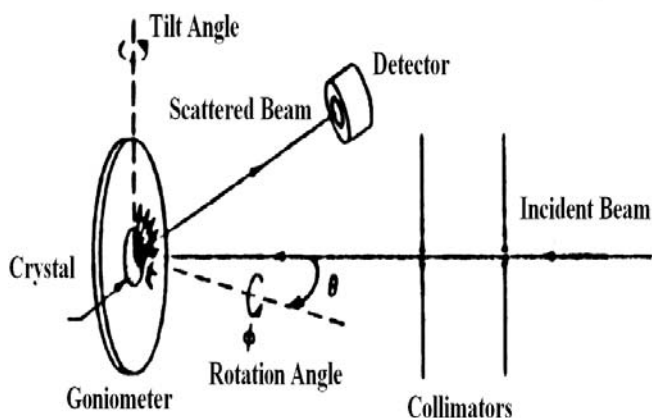
مطالعه مواد به وسیله باریکه یونی در دو دهه اخیر گسترش یافته است. ساخت شتابدهنده‌های مناسب برای آنالیز به وسیله باریکه یونی، استفاده از باریکه‌های متنوع با دامنه وسیع انرژی (از کیلوالکترون‌ولت تا چندین مگاالکترون‌ولت)، به این نوع مطالعه گسترش زیادی داده است. طیف‌سنجی پراکندگی یون‌های برگشتی از نمونه RBS^(۱) را شاید بتوان شناخته‌شده‌ترین و مرسوم‌ترین روش آنالیز به کمک باریکه یونی نام برد که اساس فیزیکی آن بر آزمایش معروف رادرفورد در سال ۱۹۱۹ استوار است [۱]. کاربرد روش RBS به بررسی خواصی مانند ضخامت لایه‌ها، غلظت و توزیع عناصر تشکیل‌دهنده نمونه و بررسی فصل مشترک لایه‌های مختلف محدود می‌شود. در مورد نمونه‌های بلوری، آنالیز RBS معمولی اطلاعات مفیدی از خواص بلوری نمونه در اختیار ما قرار نمی‌دهد.

وقتی باریکه‌ای از یون‌های سریع در راستا صفحات بلوری وارد نمونه تک‌بلور می‌شود، کاهش عمده‌ای در بهره یون‌های برگشتی از نمونه مشاهده می‌گردد که می‌توان آن را به برخوردهای نزدیک هسته‌ای (برهمکنش هسته‌ای)، پراکندگی الاستیک با زاویه بزرگ، تشکیل حفره‌های الکترون در پوسته‌های داخلی اتم هدف و گسیل پرتو X مشخصه و ... مربوط دانست. همه این اثرها مشخص‌کننده پدیده‌ای هستند که کانال‌زنی نامیده می‌شود. در راستای ویژه‌ای در جهت باریکه نسبت به نمونه تک‌بلور، یون پرتابه علاوه بر پتانسیل دو جسمی (کولنی) پرتابه-هسته هدف، تحت تأثیر پتانسیل شبکه بلوری نیز قرار می‌گیرد: در واقع شبکه بلوری یون پرتابه را در راستای محورهای بلور متمرکز می‌کند. به این ترتیب پراکندگی کاهش و عمق نفوذ ذره در بلور افزایش می‌یابد [۲].

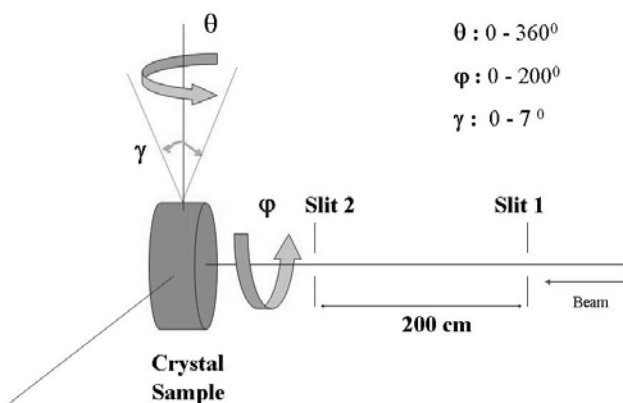
پدیده کانال‌زنی یونی در جامدات بلوری نخستین بار توسط استارک [۳] در سال ۱۹۱۲ پیشگویی شد، اما تأیید تجربی پدیده افزایش نفوذ یون‌ها در راستاهای بلوری تا سال ۱۹۶۳ به تعویق افتاد. در این سال چندین گروه تحقیقاتی شروع به مطالعه تجربی و نظری پدیده کانال‌زنی یونی در جامدات کردند و مقالات اولیه مربوط به این روش آنالیز در سال ۱۹۶۷ منتشر شدند. نخستین کاربردهای آنالیز با باریکه یونی کانالی شده در نمونه‌های مختلف، مانند نمونه‌های کشت شده با ناخالصی‌ها، مربوط به ۱۹۷۰ میلادی است [۴]. امروزه روش کانال‌زنی یونی کاربردهای متنوعی در بررسی ساختار بلوری مواد مختلف دارد. مطالعه



شکل ۱- تصویری از نمای بیرونی محفظه برهمکنش RBS-Channeling آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای.



شکل ۲- نحوه قرار گرفتن آشکارساز، شکاف‌های تعریف کننده باریکه و نمونه.



شکل ۳- نحوه تعریف باریکه فرودی و درجه‌های آزادی چرخش نمونه در محفظه RBS-Channeling.

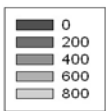
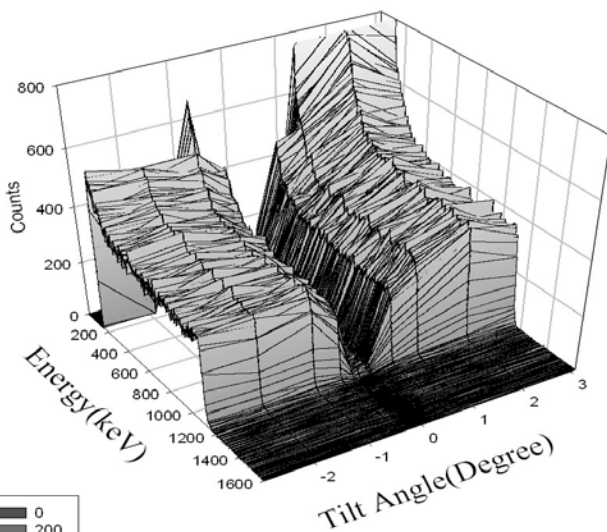
نوع آشکارسازها از بلور خالص سیلیسیوم ساخته شده‌اند که برای آشکارسازی ذرات پراکنده شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. زاویه این آشکارساز را نسبت به جهت باریکه فرودی می‌توان تغییر داد.

جهت یکی از محورها (کانالزنی محوری) یا موازی صفحات بلوری (کانالزنی صفحه‌ای) باشد. در واقع کانالزنی یکی از روش‌های آنالیز تک‌بلور است که این نوع روش آنالیز، RBS-C^(۳) نامیده می‌شود [۳]. بنابراین ناخالصی‌های موجود در شبکه میزبان یا لایه‌های خیلی نازک سطحی، همچنین آسیب‌های بلوری شبکه در طیف حاصل از یون‌های برگشتی از نمونه به راحتی دیده می‌شود. حصول چنین امکانی در RBS معمولی دشوار است یا اصلاً نمی‌توان به آن دست یافت.

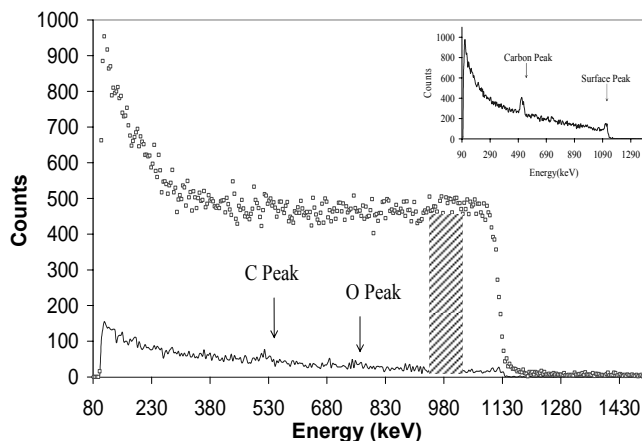
۳- اصول تجربی

در این پژوهش از دستگاه R.B.S FR-50.223 ساخت شرکت High Voltage Engineering (HV) نصب شده در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای استفاده شده است. شکل ۱ دستگاه نصب شده را روی یکی از خطوط باریکه واندوگراف نشان می‌دهد. آزمایش کانالزنی شبیه آزمایش‌های RBS یا پیکسی است. باریکه‌ای از ذرات فرودی به نمونه برخورد می‌کند و ذره برگشتی (آنالیز RBS) یا پرتو X گسیلی (آنالیز پیکسی) به وسیله آشکارساز مناسبی آشکار می‌شود (شکل ۲). برای باریکه فرودی یون‌های He⁺ جهت آنالیز RBS-Channeling شرایطی مانند انرژی باریکه فرودی ۱ تا ۳ MeV، جریان باریکه ۱ تا ۵۰ نانوآمپر و اپتیک مناسب برای ایجاد باریکه یونی با واگرایی کمتر از ۰/۰۵^۰ مورد نیاز است [۵]. برای آنالیز کانالزنی تجهیزاتی جهت ایجاد همراستایی باریکه فرودی نسبت به محورها و صفحات بلوری نمونه در محفظه برهمکنش در نظر گرفته شده است. باریکه یون‌های فرودی از دو دیافراگم همراستاگر که در فاصله ۲۰۰ سانتی‌متری یکدیگر قرار دارند عبور می‌کند. به این ترتیب راستای باریکه فرودی با دقت مورد نیاز (کمتر از ۰/۰۵^۰ درجه) تأمین می‌شود. برای تغییر وضعیت هندسی بلور در دستگاه مورد استفاده و قرار دادن آن در راستای مناسب از گونیومتر با دقت ۰/۰۱^۰ درجه استفاده می‌شود. بلور را می‌توان حول سه محوری که در شکل ۳ نشان داده شده با دقت ۰/۰۱^۰ درجه چرخاند. طرح کلی از نحوه تعریف باریکه مناسب توسط دو شکاف و سه درجه آزادی برای چرخش نمونه در این شکل نشان داده شده است. علاوه بر سه درجه آزادی زاویه‌ای، نمونه را می‌توان در سه جهت x، y و z نیز حرکت داد. یک آشکارساز سد سطحی برای آشکارسازی ذرات پراکنده شده با قدرت تفکیک ۱۵ keV در محفظه تعبیه شده است. این

نمودار تعداد شمارش‌ها برحسب زاویه چرخش γ در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. این نمودار که نمودار بهره زاویه‌ای نامیده می‌شود در بررسی مکان اتمهای شبکه، ناخالصی‌ها و پهنای کانال، زیاد مورد استفاده است [۵]. با توجه به اینکه بازه انرژی انتخابی ممکن است متفاوت باشد، معمولاً شمارش‌ها در زوایای مختلف را به شمارش در حالت کاتوره‌ای بهنجار می‌کنند. در این مرحله باید به این نکته توجه داشت که طیف کاتوره‌ای مناسب تنها با انتخاب همزمان دو زاویه در جهتی غیر از راستای کانالی به دست می‌آید.



شکل ۴-۲ طیف‌های RBS از مرحله پیدا کردن کانال (نواحی با افت زیاد در بهره یا تعداد ذرات برگشتی) تا طیف‌های کاتوره‌ای (نواحی با شمارش زیاد در طیف‌ها).

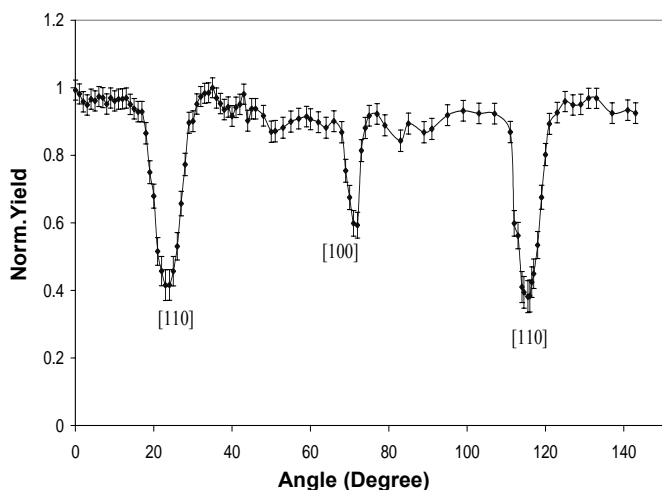


شکل ۴-۳ مقایسه طیف‌های کاتوره‌ای (نقاط پررنگ) و کانالی (خط پیوسته) از نمونه Si تک‌بلور. انرژی ذرات آلفای فرودی ۲ MeV و زاویه پراکندگی ۱۶۵ درجه است. تصویر کوچکتر طیف کانالی با شمارش خیلی بیشتر را نشان می‌دهد.

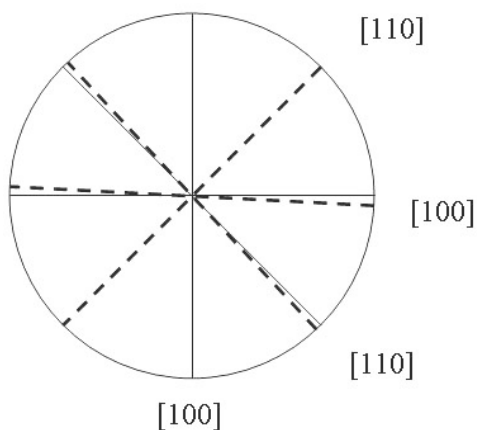
در آزمایش‌هایی که در این مقاله به آنها اشاره شده، زاویه آشکارساز نسبت به جهت باریکه فرودی معمولاً ۱۶۵ درجه است. در اینجا به شرح نمونه‌ای از آزمایش‌های کانال‌زنی می‌پردازیم. در این آزمایش از تک‌بلورهای سیلیسیوم نوع n با محور بلوری (۱۰۰) و مقاومت ویژه $15\Omega\text{-cm}$ تا $10\Omega\text{-cm}$ استفاده شده است. باریکه فرودی یون‌های هلیوم با انرژی ۲ MeV و آشکارساز ذره در زاویه ۱۶۵ درجه جهت آشکارسازی ذرات برگشتی قرار داده شده است [۶]. شکل (۴-۳) نموداری سه بعدی از طیف‌های مختلف RBS از طیف کاتوره‌ای تا پیدا کردن کانال را نشان می‌دهد. بطوری که ملاحظه می‌شود تعداد ذرات برگشتی از نمونه سیلیسیوم در راستای بلوری (۱۰۰) (متناظر با زاویه صفر درجه) کاهش عمده‌ای نسبت به شمارش‌ها در راستای غیربلوری (مثلاً زاویه ۲ درجه) پیدا می‌کند.

برای تعیین محورها یا صفحات بلوری در این روش آنالیز، باید حداقل از دو درجه آزادی زاویه‌ای استفاده کرد. در آزمایش‌های مربوط به شکل (۴-۳)، هدف پیدا کردن محور بلوری (۱۰۰) بوده است. برای این منظور، ابتدا نمونه را چند درجه حول زاویه θ می‌چرخانیم و سعی می‌کنیم تا باریکه عمود بر نمونه تابیده شود. برای مقایسه طیف‌های RBS گرفته شده در زوایای مختلف، بازه انرژی یکسانی از طیف‌ها را انتخاب می‌کنیم (ناحیه هاشور زده شده در شکل (۴-۳)) و شمارش‌ها در این بازه انرژی را به ازای هر زاویه چرخش ثبت می‌نماییم. سپس زاویه دارای کمترین شمارش را انتخاب کرده چرخش نمونه حول زاویه γ را مطابق با حالت قبل انجام می‌دهیم و نمودار تعداد شمارش‌ها را برحسب زاویه چرخش رسم می‌کنیم. طیف‌های RBS به دست آمده برحسب زاویه چرخش γ در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. در شکل (۴-۳) دو طیف در زوایای متناظر با راستای بلوری و خارج از آن با هم مقایسه شده است.

کاهش عمده شمارش در کانال نسبت به شمارش در خارج کانال در هر دو شکل (۴-۳) و (۴-۳) واضح است. افت بهره یون‌های برگشتی از نمونه در طیف کانالی و کاهش زمینه سیلیسیوم باعث ظاهر شدن پیک سطحی در لبه طیف سیلیسیوم و دو پیک دیگر مربوط به آلودگی‌های سطحی در شکل (۴-۳) می‌شود. پیک سطحی ناشی از نحوه پراکندگی یون‌های فرودی از اولین لایه‌های اتمی و مستقل از راستای بلوری است. بنابراین انتظار داریم بهره ذرات برگشتی مانند حالت کاتوره‌ای باشد ولی محدودیت قدرت تفکیک انرژی و ضخامت لایه سطحی باعث کاهش ارتفاع پیک می‌شوند.



شکل ۵-ا نمودار بهره زاویه‌ای نسبت به زاویه چرخش φ حول راستای بلوری (۱۰۰) در بلور سیلیسیوم.



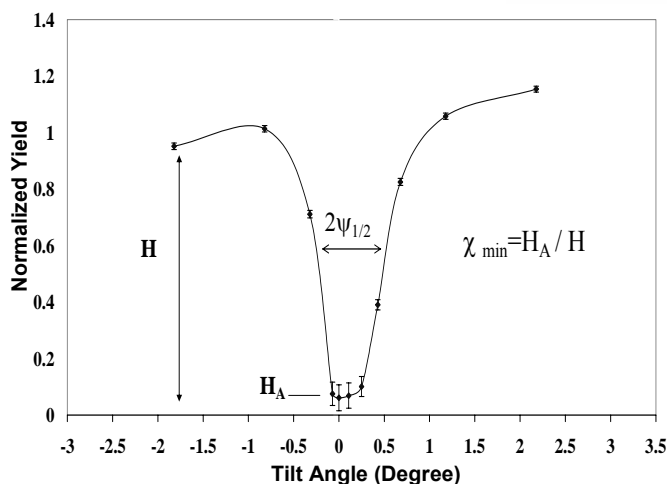
شکل ۵-ب وضعیت قرار گرفتن صفحات بلوری در راستای بلوری (۱۰۰) با چرخش زاویه در نمودار بهره زاویه‌ای (شکل ۵-ا).

۴- پارامترهای اساسی در آنالیز RBS-Channeling

دو پارامتر اساسی در آنالیز کانال‌زنی یونی تعریف شده است که ممکن است از آنها اطلاعات مفیدی در مورد بلور مورد آنالیز در اختیار ما قرار گیرد. اولین پارامتر نصف پهنای نمودار بهره زاویه‌ای بین کمینه بهره (در کانال) و بیشینه بهره (بهره کاتوره‌ای) است که نصف پهنای زاویه‌ای $(\psi_{1/2})$ نامیده می‌شود [۱]. رابطه نظری پیشنهادی برای این کمیت به صورت زیر است:

$$\Psi_{1/2} \sim (2Z_1 Z_2 e^2 / Ed)^{1/2} \quad (1)$$

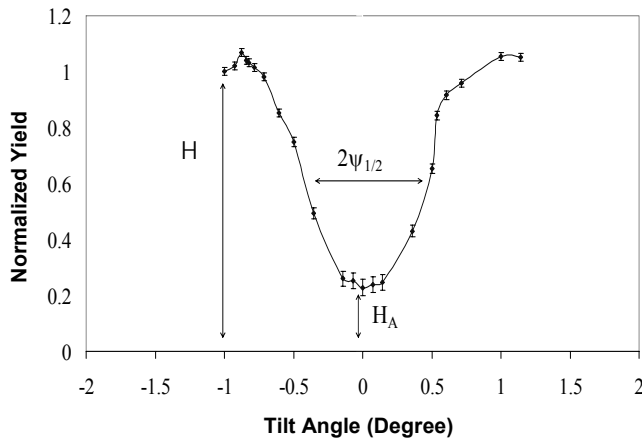
که در آن $\Psi_{1/2}$ با عکس جذر انرژی فرودی (E) و فاصله بین اتمی (d) متناسب است. در این رابطه Z_1 عدد اتمی یون فرودی



شکل ۴-ب نمودار بهره زاویه‌ای بلور Si در راستای (۱۰۰). این نمودار با انتخاب یک پنجره انرژی در ناحیه تحت بررسی از طیف RBS (ناحیه هاشورخورده در نمودار ۴-ب) به دست می‌آید.

طیف شکل ۵-ا تعداد شمارش‌ها برحسب زاویه چرخش است. چون در این آزمایش، هدف پیدا کردن صفحات بلوری حول محور (۱۰۰) بلور سیلیسیوم است، بعد از پیدا کردن راستای بلوری (۱۰۰) در شکل ۴-ب، نمونه را به اندازه ۱۴۰ درجه حول زاویه φ می‌چرخانیم و برای هر زاویه، شمارش‌ها را در بازه انرژی انتخابی ثبت می‌نماییم. نمودار بهره زاویه‌ای حاصل را می‌توان در شکل ۵-ا مشاهده نمود. زاویه‌هایی که در آنها کاهش بهره به وضوح دیده می‌شود بیشتر مربوط به صفحات بلوری با اندیس کوچک هستند.

شکل ۵-ب وضعیت صفحات بلوری را در مختصات قطبی و حول محور بلوری (۱۰۰) نسبت به هم نشان می‌دهد. طبق شکل ۵-ب با هر چرخش ۴۵ درجه می‌توان به یکی از صفحات (۱۰۰) یا (۱۱۰) رسید (قطرهای دایره) [۱]. در طیف شکل ۵-ا تنها می‌توان سه زاویه را با کاهش واضح در شمارش‌ها مشاهده کرد. با توجه به اینکه در ساختار الماسی کاهش شمارش در صفحه بلوری (۱۱۰) بیشتر از کاهش شمارش در صفحه (۱۰۰) است [۱]، می‌توان صفحات بلوری را به ترتیب مشخص شده در شکل ۵-ا در نظر گرفت. خطوط گسسته در شکل ۵-ب متناظر با زاویه‌های به دست آمده در اندازه‌گیری‌های شکل ۵-ا است که اختلاف اندکی با زاویه ۴۵ درجه بین صفحات دارد. این اختلاف به پهن بودن کانال و انتخاب دقیق زاویه‌ای که در آن کمینه شمارش‌ها درون کانال اتفاق می‌افتد، مربوط می‌شود.



نمودار ۶- بهره زاویه‌ای 1550Å اکسید سیلیسیوم رشد داده شده بر روی بلور سیلیسیوم در راستای بلوری (۱۰۰).

وارد کردن آلاینده‌ها در بلور بویژه در مواد نیمرسانا، خواص الکتریکی بلور را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. آنالیز RBS-C ابزاری توانمند جهت بررسی ارتباط موجود بین مکان اتم‌های میزبان و ناخالصی موجود در بلور یا ناراستی‌های ایجاد شده در آن با خواص الکتریکی یا گرمایی بلور است [۹]. به عنوان مثال، در فرایند کاشت یون در نیمرساناها، ناخالصی کاشته شده در صورتی می‌تواند نقش فعالی در خواص الکتریکی نیمرسانا داشته باشد که بیشتر اتم‌های ناخالصی در مکان اتم‌های شبکه میزبان قرار بگیرند [۸]. بررسی مکان اتم‌های ناخالصی در فرایند کاشت یون، همچنین بعد از فرایندهای حرارتی مسأله جالبی است که هنوز هم مورد مطالعه زیاد قرار می‌گیرد [۱۰].

در این قسمت از مقاله سعی کرده‌ایم با ارایه مثالی از نمونه سیلیسیوم کاشت شده با ژرمانیوم، توانایی روش RBS-Channeling را در بررسی این نوع ساختارها نشان دهیم. قسمتی از هر بلور سیلیسیوم توسط یون‌های ژرمانیوم با انرژی 100keV و دز $1 \times 10^{16}\text{atoms/cm}^2$ بمباران شده است. نمونه‌های موردنظر در آزمایشگاه Oak Ridge آمریکا تهیه شده‌اند. پیش از آنالیز و در حین آن، هیچگونه فرایند حرارتی بر روی نمونه‌ها اعمال نشده است تا احیاناً در اثر حرارت، آرایش اتم‌های ناخالصی و بلور تغییر نکند. آنالیز در هر دو قسمت کشت شده و بکر انجام یافته است [۶].

نمودار (V-a) مقایسه طیف کانالی و کاتوره‌ای از دو ناحیه‌ای که بدون ناخالصی و دارای ناخالصی هستند. در این آزمایش در ناحیه‌ای که بدون ناخالصی است، کانال را به روشی که قبلاً توضیح داده شد پیدا می‌کنیم. مقایسه طیف کاتوره‌ای با طیف

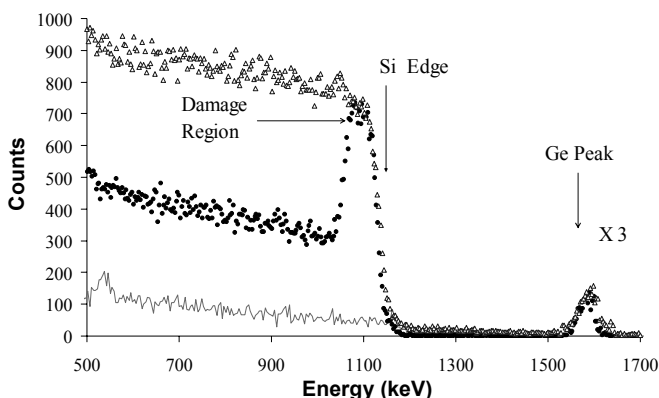
Z_2 عدد اتمی اتم هدف است. بنابراین هر چه فاصله بین اتمی و انرژی ذرات فرودی کوچکتر باشند $\Psi_{1/2}$ بزرگتر است. پس با مقایسه این کمیت در دو نمودار بهره زاویه‌ای از یک نمونه بلوری که تحت فرایندهای جداگانه مانند بازپخت حرارتی در دماهای متفاوت قرار گرفته‌اند، می‌توان تخمینی از تغییر فواصل اتمی در این نمونه را در دو فرایند مختلف به دست آورد. با توجه به شکل (۴-۲) مقدار این کمیت برای بلور سیلیسیوم در راستای (۱۰۰)، برابر $\Psi_{1/2} = 0.37^\circ$ است. پارامتر مهم دیگر در آنالیز کانالزنی کمینه بهره نرمالیزه شده (χ_{\min}) در راستای کانالی است. کمینه بهره در راستای کانالی را می‌توان به سادگی با کسری از مساحت کانال که توسط اتم‌هایی که در شبکه قرار ندارند یا حول مکان شبکه نوسان می‌کنند بیان کرد. رابطه $\chi_{\min} = Nd\pi\rho^2$ ارتباط کمینه بهره را برای بلور کامل با فاصله بین اتمی (d)، دامنه ارتعاشات گرمایی عمود بر محور بلوری (ρ) و چگالی اتمی (N) نشان می‌دهد. بطوری که ملاحظه می‌شود این پارامتر مستقل از پارامترهای باریکه فرودی است و تنها به خواص بلور وابسته است. با توجه به متفاوت بودن فاصله بین اتمی در محورها یا صفحات بلوری مختلف در یک بلور، مقدار χ_{\min} نیز متفاوت خواهد بود. از مقایسه بین مقادیر تجربی و مقدار بالا می‌توان به کیفیت بلور پی برد [۵]. شکل (۴-۲) این پارامتر را برای سیلیسیوم، 0.069 مقدار کاتوره‌ای به دست می‌دهد. وجود آسیب‌های بلوری یا آلودگی‌های سطح، مانند لایه اکسید، ممکن است مقدار کمینه تجربی را افزایش دهد.

نمودار ۶ بهره زاویه‌ای اکسید سیلیسیوم را بر روی بلور سیلیسیوم نشان می‌دهد که با گرم کردن آن در بخار آب رشد پیدا کرده است [۷]. اثر لایه‌های بی‌شکل، مانند لایه اکسید، بستگی به ضخامت لایه دارد. در لایه‌های بی‌شکل، یون‌های فرودی متحمل برخوردهای پراکندگی رو به جلو می‌شوند بطوریکه یون‌ها با زوایای بزرگتر از زاویه بحرانی ($\Psi_{1/2}$) از راستای اولیه باریکه منحرف می‌شوند. اثر این پدیده افزایش مقدار پهنای زاویه‌ای و کاهش بهره نسبت به مقادیر مربوطه در ماده تک‌بلور است [۱]. در مورد این نمونه، پهنای $\Psi_{1/2}$ از 0.37° به 0.45° درجه و کمینه بهره نیز از 0.069 به 0.22 افزایش می‌یابد.

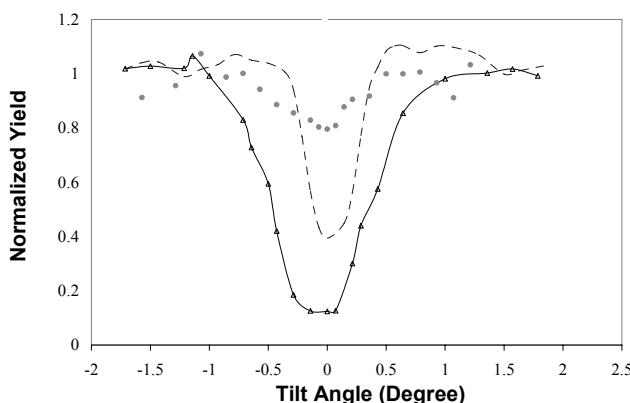
۵- بررسی ارتباط ساختار بلوری با خواص الکتریکی بلور

بررسی‌ها نشان می‌دهند که خواص الکتریکی و گرمایی بلورها ارتباط تنگاتنگی با ساختار سطحی و حجمی بلور دارد [۸].

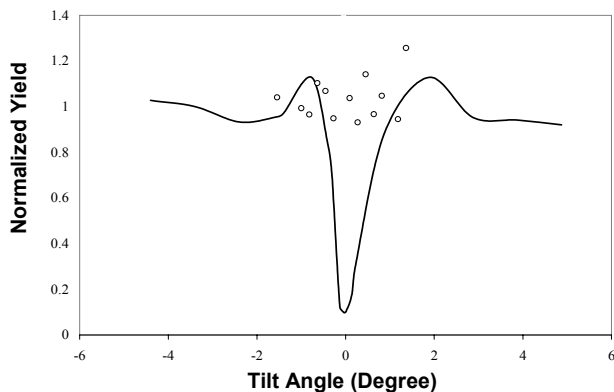
اتم‌های ژرمانیوم در این راستای کانالی کاملاً کاتوره‌ای بوده و رفتار دیده شده در راستای بلوری (۱۰۰) از اتم‌های ژرمانیوم در این راستا دیده نمی‌شود.



نمودار (Y-a) طیف کاتوره‌ای (نقاط مثلثی) و کانالی (نقاط دایره‌ای شکل) بلور Si کاشت شده با اتم‌های ژرمانیوم دارای انرژی ۱۰۰ keV و دز 1×10^{16} atoms/cm².



نمودار (Y-b) مقایسه نمودار بهره زاویه‌ای اتم‌های سیلیسیوم و ژرمانیوم (نقاط دایره‌ای) در شبکه بلوری سیلیسیوم قبل از کشت ژرمانیوم (خط پیوسته) و بعد از کاشت آن (خط گسسته).



نمودار (Y-c) نمودار بهره زاویه‌ای توزیع اتم‌های ژرمانیوم (دایره‌های توخالی) از نمونه بررسی شده در شکل (Y-a) در راستای بلوری (۱۱۰).

کانالی (خط پیوسته) افت زیاد در شمارش را نشان می‌دهد. نمودار بهره زاویه‌ای مربوط به این ناحیه از روی نمونه شکل (Y-b) رسم شده است (خط پیوسته). پس از این مرحله، باریکه را به ناحیه کاشت شده می‌تابانیم. طیف RBS حاصل در شکل (Y-a) نشان داده شده است. نمودار بهره زاویه‌ای عناصر سیلیسیوم (خط گسسته) و ژرمانیوم (دایره‌های توپر) با انتخاب دو بازه انرژی مناسب بر روی این دو عنصر به ترتیبی که قبلاً بیان شد در شکل (Y-b) به دست آمده است. اثر آسیب بلوری حاصل از کاشت یون در ناحیه کاشت شده در شکل (Y-a) به وضوح دیده می‌شود. مقایسه پیک مربوط به ژرمانیوم در دو طیف کاتوره‌ای و کانالی در ناحیه کاشت شده نشان می‌دهد که ارتفاع قله ژرمانیوم در این دو طیف دقیقاً یکسان نیست. نمودار بهره زاویه‌ای در شکل (Y-b) نیز کاهش مقدار کمی ژرمانیوم را درون کانال نسبت به حالت کاتوره‌ای نشان می‌دهد (دایره توپر).

کاهش ارتفاع قله ژرمانیوم درون کانال را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که توزیع اتم‌های ژرمانیوم درون کانال به گونه‌ای است که یون‌های فرودی به تعداد کمتری از این اتم‌ها نسبت به حالت کاتوره‌ای برخورد می‌کنند. کاهش اندک بهره اتم‌های ژرمانیوم در شکل (Y-b) نسبت به بهره اتم‌های سیلیسیوم در ناحیه کاشت شده (خط گسسته) نشان می‌دهد که محل قرار گرفتن اتم‌های ژرمانیوم در مرکز کانال یا در مکان شبکه اتم‌های سیلیسیوم نیست، زیرا در مورد اول هیچ کاهشی در شمارش اتم‌های ژرمانیوم در حالت‌های کانالی و کاتوره‌ای نباید دیده شود بلکه شمارش در مرکز کانال نسبت به بقیه زوایا بیشترین مقدار را خواهد داشت و در مورد دوم، روند کاهش شمارش در نمودار بهره زاویه‌ای برای اتم‌های ژرمانیوم باید تا حد زیادی از نمودار بهره زاویه‌ای برای اتم‌های سیلیسیوم (خط گسسته) پیروی کند (اختلاف اندک را می‌توان به تفاوت اندازه این اتم‌ها نسبت داد) [۱۱]. پس می‌توان نتیجه گرفت که توزیع اتم‌های ژرمانیوم بعد از کاشت در راستای بلوری (۱۰۰) بلور سیلیسیوم به گونه‌ای است که این اتم‌ها نه کاملاً در مرکز کانال قرار می‌گیرند و نه کاملاً در مکان اتم‌های سیلیسیوم، بلکه توزیع در ناحیه‌ای بین این دو مکان است.

به منظور بررسی توزیع اتم‌های ژرمانیوم در راستای بلوری دیگر سیلیسیوم، آزمایش را برای محور بلوری (۱۱۰) سیلیسیوم انجام می‌دهیم. نمودار بهره زاویه‌ای در این راستای بلوری در شکل (Y-c) نشان داده شده است. بر طبق این شکل، توزیع

مراکز پراکندگی در کانال در ناحیه مورد نظر بیشتر می شود و می توان این اثر را در طیف یون های برگشتی از نمونه مشاهده نمود. این فرایند اساس بررسی آسیب ها یا بی نظمی های بلوری است که باعث حضور اتم ها در راستای کانالی می شود [۱۴].

بررسی تعداد اتم های جابجا شده شبکه میزبان از مکان شبکه ای خود و عمق آسیب ایجاد شده، همچنین بررسی حضور اتم های ناخالصی و تعیین عمق آنها در راستای بلوری خاصی در نمونه از توانایی های مهم آنالیز RBS-C در نمونه های بلوری است. این روش آنالیز به نام RBS-Dechanneling شناخته شده است [۶]. در واقع فرایند انحراف یون فرودی در راستای کانالی به وسیله مراکز پراکندگی را که باعث برخورد های بزرگ زاویه ای می شوند Dechanneling می نامند. در این آنالیز افزایش در بهره طیف کانالی در عمقی خاص با افزایش آسیب یا تعداد اتم های جابجا شده از مکان شبکه ای متناظر است [۱۴]. روشی ساده برای بدست آوردن چگالی تخمینی اتم های جابجا شده بر حسب عمق، استفاده از رابطه زیر است:

$$N_D(z) = \left(\frac{X_D(z) - X_R(z)}{1 - X_R(z)} \right) N \quad (2)$$

که در آن X_D و X_R به ترتیب بهره نرمالیزه شده طیف کانالی و سهم Dechanneling و N چگالی اتمی بلور است.

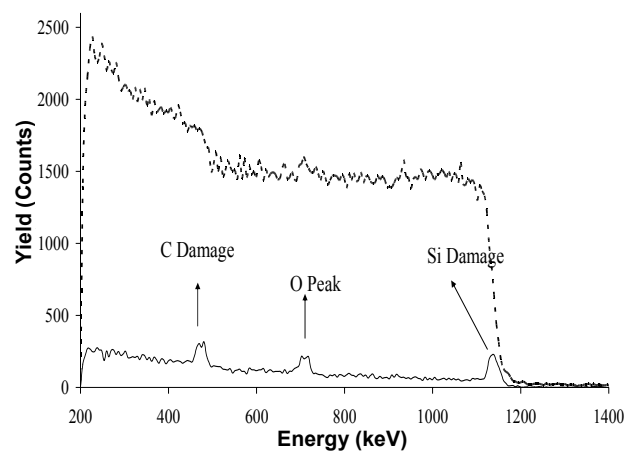
نکته بسیار مهم در تبدیل انرژی به عمق در طیف های کانالی، تفاوت توان توقف یا اتلاف انرژی یون فرودی در راستای بلوری و کاتوره ای است [۱۵]. در این رابطه فرض بر این است که همه اتم های جابجا شده به طور یکسان در پراکندگی باریکه فرودی سهم دارند؛ اما تحت بعضی شرایط همانند وقتی که اتم های جابجا شده به طور کاتوره ای در کانال های شبکه توزیع شده اند این اثرها ضعیف می شوند. مشکل اساسی در استفاده از رابطه بالا تعیین $X_R(z)$ «سهم Dechanneling» است. تعیین این سهم در ارتباط مستقیم با تعیین درست سطح مقطع Dechanneling، « σ_D » است [۱۶]. ولی مقدار درست این پارامتر به طبیعت ناراستی ها و آسیب های بلوری در ناحیه مورد بررسی بستگی دارد [۱۷]. روش های عددی در حل رابطه بالا در یک فرایند تکراری خودسازگار ممکن است معادله بالا را مستقل از سطح مقطع Dechanneling کند [۱۶ و ۱۸]. شکل (b-7) نیم رخ اتم های سیلیسیوم جابجا شده از مکان شبکه ای بلور بر حسب عمق را نشان

بررسی استرس های ایجاد شده در رانشانی لایه ها بر روی یکدیگر نیز از کاربردهای جالب RBS-C است [۵]. به عنوان مثال استرس ایجاد شده در رانشانی لایه ژرمانیوم بر روی بلور سیلیسیوم به روش MBE^(۴) ممکن است خواص الکتریکی بلور را تحت تأثیر قرار دهد [۱۲]. مطالعه استرس ها در راستاهای مختلف بلوری، حتی طبیعت این استرس ها به همراه تکنیک های میکروسکوپ الکترونی، ممکن است به درک بهتر طبیعت انحراف های بلوری کمک شایانی نمایند.

از نمونه های بلوری مورد توجه در آنالیز RBS-C، بررسی اثر کاشت هیدروژن در تک بلور ۶H-SiC است. شکل ۸ طیف کاتوره ای و کانالی بلور ۶H-SiC را بعد از کاشت هیدروژن با انرژی ۱۵ کیلو الکترون ولت و دز کم نشان می دهد. به دلیل دز کم ناخالصی کاشت شده، آسیب بلوری قابل ملاحظه ای در نمونه ایجاد نمی شود. کاهش واضح در بهره طیف کانالی نسبت به بهره طیف در حالت کاتوره ای نشان از کیفیت خوب بلور مورد بررسی دارد. محل آسیب دیده ناشی از برخورد اتم های هیدروژن با اتم های Si و C بلور میزبان، به دلیل تفاوت جرم آنها، در انرژی های مختلفی از طیف کانالی دیده می شود [۱۳].

۶- بررسی آسیب بلوری

هنگامی که یون های فرودی در راستای بلوری وارد نمونه می شوند هر گونه ناخالصی یا آسیب بلوری که در کانال وجود داشته باشد ممکن است سد راه یون های فرودی در راستای کانالی شود که این حرکت یون های فرودی در راستای کانالی را مختل کرده، تعداد برخوردهای زاویه بزرگ یون های فرودی با



شکل ۸- طیف کاتوره ای (خط چین) و کانالی (پیوسته) از بلور ۶H-SiC به دست آمده با ذرات آلفا با انرژی ۲MeV.

انرژی یون‌های فرودی در راستای کانالی، بویژه در نواحی که آسیب بلوری وجود دارد دارای پیچیدگی‌هایی است که ممکن است کار آنالیز RBS-Dechanneling را با مشکل مواجه سازد (در ناحیه آسیب بلوری رابطه $\varepsilon = X_R \varepsilon^R + (1 - X_R) \varepsilon^{Alig}$ را داریم که ε^R و ε^{Alig} به ترتیب اتلاف انرژی در راستای کانال‌های و کانالی هستند [۲۰].

با تعیین مقدار σ_D و مشخص شدن بستگی میزان آسیب بلوری $N_D(z)$ با عمق، می‌توان از حاصلضرب این دو کمیت جهت بررسی نوع نقص بلوری استفاده کرد [۵]. بستگی به انرژی سطح مقطع Dechanneling برای تعدادی از نقایص مهم بلوری بررسی شده‌اند. مثلاً برای اتم‌های بینابین یا خوشه‌های بی‌شکل (آمورف) بستگی به صورت E^{-1} است، یا برای ناراستی‌های خطی و حلقه‌ای، بستگی $E^{1/2}$ را داریم.

۷- PIXE-Channeling

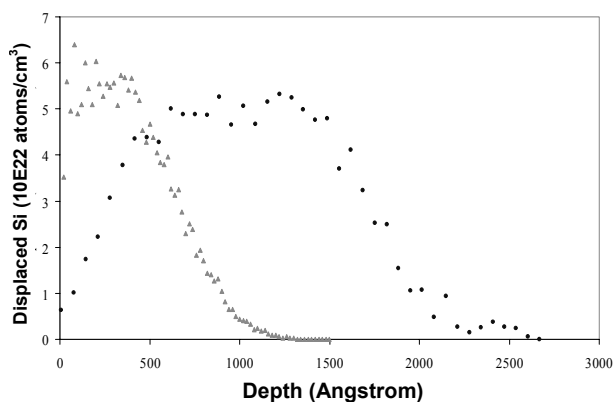
در نمونه‌هایی که شامل عناصر ناخالصی با عدد اتمی کمتر از عدد اتمی اتم‌های میزبان باشند یا در بررسی مکان شبکه‌ای اتم‌هایی با عدد اتمی نزدیک به هم در یک نمونه، آنالیز PIXE همراه با کانال‌زنی یونی جهت مطالعات کمی نمونه‌های بلوری ممکن است اطلاعات مفیدی در اختیار ما قرار دهند. آنالیز PIXE بطور کلی به بررسی تغییرات مساحت زیر قله خطوط K یا L پرتو X مشخصه عنصر مورد بررسی در راستای کانالی و غیرکانالی مربوط می‌شود [۵]. دستیابی به این آنالیزها به دلیل نداشتن نرم‌افزار مناسب با مشکل مواجه است، علاوه بر این برخی پارامترهای هسته‌ای مانند سطح مقطع یونیزاسیون پرتوهای X در راستای کانالی، بطور وسیعی بررسی نشده است [۲۱]. عمده مطالعات انجام شده در استفاده از روش PIXE-Channeling به نمونه‌های مهمی مانند GaAs، InP و ZnSe مربوط می‌شود که هدف این مطالعات، بررسی مکان شبکه‌ای اتم‌های ناخالصی یا اتم‌های میزبان در این نمونه‌ها بوده است [۵، ۲۱، ۲۲ و ۲۳]. در کار انجام شده توسط Salonen بر روی نمونه‌های ZnSe رشد داده شده روی GaAs، اثر ضخامت لایه (عمق آنالیز) و انرژی پروتون روی کمینه بهره به دست آمده از PIXE-Channeling بررسی شد [۲۲]. نتایج این کار نشان داد که برای ضخامت‌های مختلف از لایه ZnSe، بهره پرتو X متفاوت است و دلیل آن را می‌توان در گسیل پرتو X از کل عمقی دانست که یون‌های فرودی در نمونه طی می‌کنند. تحت این شرایط،

می‌دهد که با روش ارایه شده در مراجع [۱۶ و ۱۸] و بر اساس شکل (۷-۲) به دست آمده است [۶].

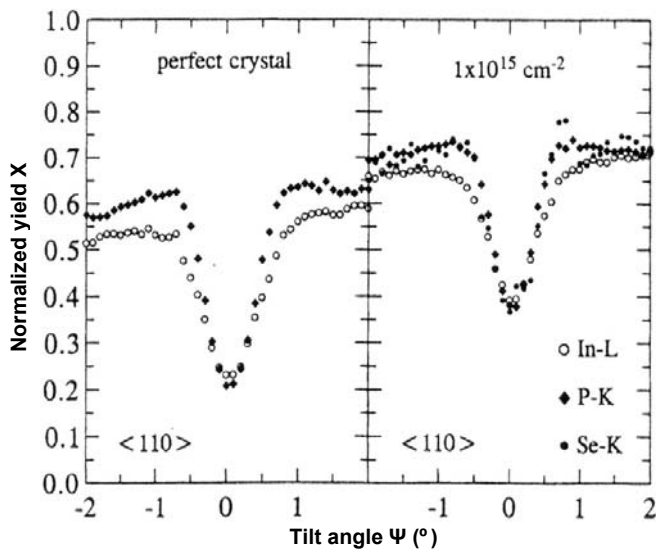
در این روش، ابتدا سهم Dechanneling به صورت خط راستی که دو انتهای ناحیه آسیب را به هم وصل می‌کند در نظر گرفته می‌شود (تقریب مرتبه اول)، سپس سعی می‌شود تا در یک فرایند تکراری، منحنی مشخص‌کننده سهم Dechanneling به حالت واقعی نزدیک شود. با مشخص شدن این سهم $(X_R(z))$ ، می‌توان نمودار تعداد اتم‌های سیلیسیوم جابجا شده برحسب عمق را از رابطه ۲ به دست آورد.

شکل ۹ منحنی تعداد اتم‌های جابجا شده سیلیسیوم برحسب عمق را که نتیجه‌ای از کاشت یون بوده و با روش بیان شده در بالا حساب شده است، نشان می‌دهد (نقاط دایره‌ای). تعداد اتم‌های جابجا شده بر اساس محاسبات نرم‌افزار TRIM [۱۹] برای سیلیسیوم بی‌شکل نیز آورده شده است (نقاط مثلثی). واحد محور عمودی برای منحنی به دست آمده از محاسبات TRIM، دلخواه است. مطابق با شکل ۹ بیشینه آسیب ایجاد شده در شبکه بلوری سیلیسیوم، در ناحیه‌ای به عمق ۱۰۰۰ آنگستروم از سطح سیلیسیوم است. محاسبات با نرم‌افزار TRIM بیشینه غلظت اتم‌های ژرمانیوم کاشته شده با انرژی ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت را در عمق ۷۰۰ آنگستروم به دست می‌دهد. چون محاسبات TRIM برای هدف‌های بی‌شکل بکار می‌رود، انتظار افزایش عمق بیشینه غلظت اتم‌های ژرمانیوم را که متناظر با بیشینه جابجایی اتم‌های سیلیسیوم است داریم.

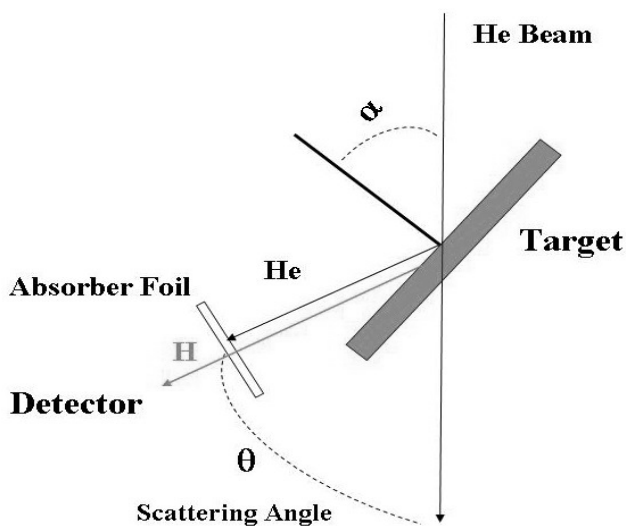
چنان که قبلاً تأکید شد تبدیل دقیق انرژی به عمق برای به دست آوردن نمای آسیب ایجاد شده مورد نیاز است. اتلاف



نمودار ۹- توزیع تعداد اتم‌های جابجا شده سیلیسیوم بر اثر کاشت اتم‌های ژرمانیوم برحسب عمق از سطح سیلیسیوم (نقاط دایره‌ای). نقاط مثلثی مربوط به محاسبه تعداد اتم‌های جابجا شده Si با نرم‌افزار TRIM است.



شکل ۱۰- مقایسه نمودار بهره زاویه‌ای به دست آمده از آنالیز PIXE برای دو حالت بدون کاشت و بعد از کاشت ناخالصی. افزایش کمینه بهره بر اثر کاشت یون در شکل مشخص است.



شکل ۱۱- طرحی از هندسه لازم جهت انجام آزمایش ERD.

ورقه جاذب، انتخاب مناسب انرژی ذره فرودی و زاویه پراکندگی، تعیین دقیق بار و تابع اتلاف انرژی و سطح مقطع پراکندگی در زاویه پراکندگی مورد نظر از پارامترهایی هستند که باید در این آزمایش آنها را مدنظر داشت.

۹- نتیجه‌گیری

آنچه که در این مقاله عرضه شده مروری بر روش RBS-C و کاربردهای آن در آنالیز مواد است. طیف‌های ارایه شده در این مقاله (به استثنای نمودار شکل ۱۰) حاصل اندازه‌گیریهای انجام

Dechanneling به طور مؤثری بهره کمینه حاصل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج این کار همچنین نشان دادند که از انرژی فرودی ویژه‌ای، بهره برای ضخامت‌های مختلف یکسان می‌شود. بنابراین انتخاب انرژی و یون فرودی از پارامترهای مهم در بدست آوردن نتیجه مناسبند. در طیف شکل ۱۰ بهره‌های زاویه‌ای به دست آمده از PIXE برای بلور InP به راستای بلوری (۱۱۰) کاشت شده با 60 keV از یون‌های Se^+ با دز 10^{15} at/cm^2 نشان داده شده است [۲۳].

همانطور که در شکل مشخص است در راستای بلوری (۱۱۰) تغییرات بهره پرتو X ناشی از Se توافق خوبی با تغییرات بهره X از P برحسب زاویه (Ψ) دارد. بنابراین اتم‌های Se باید مکان‌های شبکه P را اشغال کرده باشند.

۸- بررسی مکان عناصر سبک در شبکه

بررسی عناصر سبک در آنالیز RBS معمولاً با بررسی این عناصر در انرژی‌های رزونانس آنها صورت می‌گیرد. در مورد عناصری مانند هیدروژن یا دوتریوم، تعیین مقدار این عناصر و بررسی نحوه توزیع آنها در نمونه‌ها با یون‌های فرودی هلیوم معمولاً از هندسه پراکندگی متفاوت با هندسه استفاده شده در آنالیز RBS استفاده می‌شود [۵].

یون‌های فرودی هلیوم در راستاهای مایل مطابق با شکل ۱۱ به نمونه برخورد می‌کنند. به دلیل جرم سنگین‌تر هلیوم نسبت به هیدروژن درون نمونه، اتم‌های هیدروژن نیز از نمونه کنده می‌شوند. ذرات پراکنده شده از نمونه در زوایای پراکندگی کوچک (در جهت رو به جلو) از لایه جاذب هلیوم در جلوی آشکارساز عبور می‌کنند و در نهایت، تنها اتم‌های هیدروژن به آشکارساز می‌رسند. این روش آنالیز پراکندگی الاستیک رو به جلو (ERD)^(۵)، در تعیین عناصر سبکی مانند هیدروژن کاربرد زیاد دارد. بررسی مکان اتم‌های هیدروژن و ... در شبکه بلوری نمونه‌ای مانند سیلیسیم از مسایل مورد توجه و پیچیده آنالیز با باریکه یونی است. ترکیب دو روش آنالیز ERD و RBS-C، معرف آنالیز ERD-Channeling است و هدف آن بررسی مکان اتم‌های سبکی در بلور است که می‌توان آنها را به روش ERD آشکار کرد [۲۴]. در این روش، باریکه فرودی در راستای کانال مورد نظر به نمونه تابانده می‌شود و ذرات پراکنده شده به طرف جلو، بعد از عبور از یک ورقه مناسب جاذب هلیوم، به آشکارساز می‌رسند. تعیین دقیق ترکیب و ضخامت



می‌کند. سیستم‌های RBS-C امکان هندسه‌های متفاوتی را دارند که تحت شرایط ویژه‌ای به افزایش حد آشکارسازی کمک می‌کنند، از آن جمله می‌توان به هندسه‌ای اشاره کرد که در آن یون‌ها در یک راستای بلوری وارد نمونه می‌شوند و آشکارساز در راستای بلوری دیگری قرار می‌گیرد [۵]. از این تکنیک می‌توان در بررسی ناخالصی‌های کم مقدار استفاده کرد. در پایان باید به این نکته نیز اشاره کرد که انجام آزمایش‌های دقیق به روش RBS-C به دقت و زمان زیادی نیاز دارد.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم است تا از زحمات رئیس و کارکنان محترم آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای جهت راه‌اندازی سیستم RBS-Channeling و کمک‌های فراوان در انجام آزمایش‌های RBS-Channeling تشکر کنیم.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- RBS: Rutherford Backscattering Spectroscopy
- ۲- PIXE: Proton Induced X-Ray Emission
- ۳- RBS-C: Rutherford Backscattering Spectroscopy Channeling
- ۴- MBE: Molecular Beam Epitaxy
- ۵- ERD: Elastic Recoil Detection

گرفته در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای است. هدف از ارائه این مثال‌ها نمایش گوشه‌ای از توانایی‌های روش RBS-C در بررسی طبیعت اتمی بلورها و آسیب‌های ایجاد شده در این شبکه‌ها است. محدودیت‌هایی در استفاده از این روش آنالیز مانند هر روش دیگر آنالیز وجود دارد که عمده‌ترین آنها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- بلورهایی با درجه خلوص مناسب مورد نیاز است. بویژه این مطلب در مورد بلور استفاده شده به عنوان زیرماده اهمیت فراوانی دارد. همچنین سطح نمونه باید به اندازه کافی تمیز باشد.
- گرچه روش آنالیز با باریکه یونی غیرمخرب است، اما آنالیزهای طولانی مدت یا استفاده از جریان بالای یون‌های فرودی ممکن است در بعضی از نمونه‌ها اثرهای مخربی ایجاد کنند. انجام آزمایش در راستاهای کانالی، مقدار آسیب ایجاد شده را کاهش می‌دهد.
- سطح بزرگ ناحیه مورد آنالیز (1mm×1mm) به ویژه برای نمونه‌هایی با پوشش سطحی غیریکنواخت (مانند جزیره‌های کوانتومی تشکیل شده در لایه‌های نازک فلزی) ممکن است کیفیت آنالیز را تحت تأثیر قرار دهد. استفاده از میکروسکوپ پروتونی با قطر باریکه‌ای در حد یک میکرون یا کمتر ممکن است تا حدی در حل این مسأله مفید باشد [۲۵].
- تفسیر برخی از نتایج به دست آمده مشکل است. در نمونه‌هایی که انواع مختلف نقایص نقطه‌ای و آسیب‌های بلوری وجود دارند تمایز بین آنها دشوار است.
- شبیه‌سازی طیف‌های به دست آمده از RBS-C برای همه نمونه‌ها امکان‌پذیر نیست. به علت طبیعت متنوع ساختارهای بلوری و نیاز به دانستن پارامترهایی مانند اتلاف انرژی ذرات فرودی در آن ساختار و راستای ویژه، تاکنون کد عمومی برای شبیه‌سازی طیف‌های RBS-C نوشته نشده است. معمولاً، کدهای نوشته شده بر اساس روش مونت کارلو کار می‌کنند و متناسب با ساختار مورد بررسی نوشته می‌شوند. از کدهای نوشته شده می‌توان به کد FLUX [۲۶] بر اساس محاسبات مونت کارلو و کد RBX [۲۷] که از الگوریتم‌های مورد استفاده در برنامه‌های معمول شبیه‌سازی RBS استفاده شده است اشاره کرد.
- محدودیت در توان تفکیک آشکارساز ذرات، حد آشکارسازی ناخالصی‌ها یا لایه‌های خیلی نازک را محدود

References:

1. W.K. Chu, J.W. Mayer, M.A. Nicolet, "Backscattering Spectrometry," Academic Press (1978).
2. C. Cohen, D. Dauvergne, "High Energy Ion Channeling: Principles and Typical Applications," Nucl. Instr. Meth. B225, 40 (2004).
3. J. Stark, "Bemerkung über zerstreung und absorption von β -strahlen und röntgenstrahlen in kristallen," Phys. Z, Vol. 13, 9783 (1912).
4. J.W. Mayer, L. Erikson, J.A. Davies, "Ion Implantation in Semiconductors," Academic Press (1970).
5. J.R. Bird, "Ion Beam for Materials Analysis," Academic Press (1989).
6. ع. باقی‌زاده، د. آقاعلی‌گل، ا.ر. کاکوئی، م. لامعی‌رشتی، د. فتحی، "توانایی روش RBS-Channeling جهت مطالعه اثر یون‌های ژرمانیوم کاشت شده در شبکه بلوری سیلیسیوم،" کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه خرم‌آباد (شهریور ۱۳۸۴).
7. د. آقاعلی‌گل، ع. باقی‌زاده، د. فتحی، "باز توزیع ناخالصی آرسنیک در رشد گرمایی و سرعت رشد اکسید سیلیسیوم،" مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۵، شماره ۴ (۱۳۸۴).
8. S.M. Sze, "VLSI Technology," McGraw-Hill Book Company (1983).
9. A. Seppala, "Ion Beam Channeling Studies of Compound Semiconductor Materials," Report Series in Physics, University of Helsinki (2001).
10. T. Alzanki, R. Gwilliam, N. Emerson, Z. Tabatabaian, C. Jeynes, B.J. Sealy, "Concentration Profiles of Sb-Doped Shallow Layers in Si," Semic. Sci. Tech. Vol. 19, 728 (2004).
11. M.L. Swanson, "The Study of Lattice Defects by Channeling," Report Progress in Physics, Vol. 45, 47 (1982).
12. M. Bohr, "Intel's 90nm Logic Technology Using Standard Si Transistors," www.intel.com, December (2003).
13. ع. باقی‌زاده، م. شیروانی، د. آقاعلی‌گل، م. فرمهبینی‌فراهانی، م. لامعی‌رشتی، "بررسی اثر کاشت هیدروژن بر روی شبکه بلوری SiC در مقیاس نانومتر با روش‌های AFM و RBS-Channeling،" کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه شاهرود (شهریور ۱۳۸۵).
14. O.W. Holland, D. Fathy, J. Narayan, O.S. Oen, "Dose Rate Dependence of Damage Clustering During Heavy Ion Irradiation in Si," Radi. Eff. & Def, Vol. 90, 127 (1985).
15. L. Shao, Y.Q. Wang, X. Zhang, C.J. Wetteland, M. Nastasi, "Optimized Energy Window of He Beam for Accurate Determination of Depth in Channeling Rutherford Backscattering," Appl. Phys. Lett, Vol. 86, 221913 (2005).
16. L. Shao, M. Nastasi, "Methods for the Accurate Analysis Rutherford Backscattering Spectrometry," Appl. Phys. Lett, Vol. 87 064103 (2005).
17. S.D. Gemmell, "Channelling and Related Effects in the Motion of Charged Particles through Crystals," Rev. Mod. Phys. 46, 129 (1974).
18. L. Shao, Y.Q. Wang, M. Nastasi, "A New Iterative Process for Accurate Analysis of Displaced Atoms from Channeling-RBS," Nucl. Instr. Meth B249, 51 (2006).
19. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids," Pergamon Press (1985).
20. E. Kotai, "Measurement of the Stopping Powers for Channeled Ions in Ion Implanted Single Crystals," Nucl. Instr. Meth B118, 43 (1996).
21. R. Giulian, R.C. Fadaneli, J.F. Dias, M. Behar, P.L. Grande, "Consideration about PIXE Analysis under Channeling Conditions," 10th Int. Conf. on PIXE, Slovenia, 4-8 June (2004).
22. R. Salonen, A. Seppala, T. Ahlgren, "Characteristics of PIXE Channeling and its Application to ZnSe Thin Film," Nucl. Instr. Meth B145, 539 (1998).
23. F. Schrepel, T. Opfermann, E. Wendler, W. Wesch, "Determination of Lattice Displacements in Se Implanted InP by RBS and PIXE Channeling Experiments," Nucl. Instr. Meth B161-163, 515 (2000).
24. L. Shao, Y.Q. Wang, M. Nastasi, J.W. Mayer, "A Technique to Study the Lattice Location of Light Elements in Silicon by Channeling Elastic Recoil Detection Analysis," Nucl. Instr. Meth B249, 230 (2006).
25. د. آقاعلی‌گل، ع. باقی‌زاده، ا.ر. کاکوئی، م. لامعی‌رشتی، "میکروسکوپ روبشی پروتون، ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری توزیع عناصر کم مقدار در کبد انسان،" کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه خرم‌آباد (شهریور ۱۳۸۴).
26. P.J.M. Smulders, D.O. Boerma, "Computer Simulation of Channeling in Single Crystals," Nucl. Instr. Meth B26, 471 (1987).
27. E. Kotai, "KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics," Budapest, Hungary.