

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

P13-85-288

Р.А.Ильхамов, Д.Махайдик, Г.М.Осетинский,
М.Пайек, И.И.Разгуляев, Р.Шандрик

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ
МЕТОДОМ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ИОНОВ

1985

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена описанию экспериментальной установки, созданной в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ для изучения поверхностных слоев кристаллов, выявления особенностей распределения радиационных разрушений, а также для определения местоположения примесных атомов в кристаллической решетке методом каналирования. Под каналированием ионов, падающих на кристалл, следует понимать движение этих частиц вдоль "каналов", образованных параллельными рядами атомов кристалла. Для осуществления этого процесса необходимо, чтобы угол, образованный вектором скорости налетающего иона с осью цепочки кристалла, был мал $\angle < 2^\circ$ и не превышал некоторого критического значения ψ_k , определяемого формулой

$$\psi_k = \left[\frac{Z_1 Z_2 e^2}{E d} \ln \left[\left(\frac{c a}{\rho} \right)^2 + 1 \right] \right]^{1/2},$$

где Z_1, Z_2 - заряды движущейся частицы и ядер атомов цепочки, E - энергия частицы, d - расстояние между соседними атомами цепочки, e - заряд электрона, ρ - средне-квадратичное значение амплитуды тепловых колебаний атомов решетки, a - радиус экранирования Томаса-Ферми, $c \sim \sqrt{3}$. Если угол падения ионов меньше критического ($\psi < \psi_k$), то все акты рассеяния происходят на малый угол, в результате чего имеет место зеркальное отражение этих ионов цепочкой атомов. В случае $\psi > \psi_k$ ионы рассеиваются на больший угол и выбывают из режима каналирования, двигаясь в дальнейшем, как в аморфной среде.

Наряду с движением падающих частиц вдоль кристаллографической оси теория каналирования рассматривает еще один возможный случай - так называемое плоскостное каналирование, наблюдаемое тогда, когда частицы падают на монокристалл вдоль кристаллографических плоскостей, точнее, в области пространства, заключенного между двумя соседними плоскостями. Анализ такой системы показал, что критический угол в случае плоскостного каналирования меньше аналогичного угла для осевого каналирования. Движение частиц в режиме осевого и плоскостного каналирования приводит к ряду важных следствий, имеющих большое практическое значение.

К ним следует отнести:

1. Заметное уменьшение тормозных способностей падающей частицы и связанное с этим увеличение длины пробега.

2. Резкое подавление всех процессов, происходящих при столкновении падающих ионов с ядрами или внутренними оболочками атомов кристаллической решетки. К таким процессам относятся ядерные реакции, упругое резерфордское рассеяние на большие углы, возбуждение характеристического рентгеновского излучения. Эти свойства дают возможность определить местоположение примесных атомов, смещенных на малые расстояния по отношению к цепочке атомов или к плоскости. Во многих случаях удается найти местоположение примесных атомов в кристаллической решетке при концентрациях примесей до 10^{-2} атомных процента ($\sim 10^{14} \div 10^{15}$ ат/см²).

Информация об указанных процессах может быть получена при измерении энергетических спектров упруго-рассеянных ионов в различных ориентациях кристалла. Отметим, что изучение этих явлений имеет большое практическое значение, поскольку они связаны с электрическими, оптическими, механическими свойствами полупроводников. В настоящий момент опубликовано значительное число экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению процесса каналирования ионов в кристаллах, а также использованию этого метода в прикладных целях. И если теоретические основы метода изложены достаточно подробно, то методическая информация не всегда достаточна для его воспроизведения.

В этой связи настоящая работа в какой-то мере восполняет пробел, с учетом экспериментальных возможностей, которые могут быть реализованы при ее выполнении на электростатическом ускорителе Ван-де-Граафа Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, ускоряющем ионы водорода и ⁴He в интервале энергии 1 - 3,8 МэВ.

В работе приводится описание камеры для исследований, вакуумной системы, детектирующей аппаратуры, измерения тока пучка, падающего на мишень, а также методика измерения энергетического спектра упруго-рассеянных ионов водорода и ⁴He в режиме каналирования. В конце работы приведены основные результаты по ориентационным зависимостям выхода упруго-рассеянных протонов и ионов ⁴He, полученные на созданной аппаратуре.

1. МЕТОДИКА

Схема опыта представлена на рис.1. Как видно из рисунка, пучок ионов от ускорителя, пройдя участок ионопровода, попадает на многопозиционную мишень 7, находящуюся в центре гониометра 9, укрепленного в центре камеры 10. На участке ионопровода от раздаточного магнита СП-10 до гониометра пучок формируется тремя диафрагмами 3. Входная диафрагма диаметром 1 мм расположена в начале ионопровода. Выходная - диаметром 1 мм

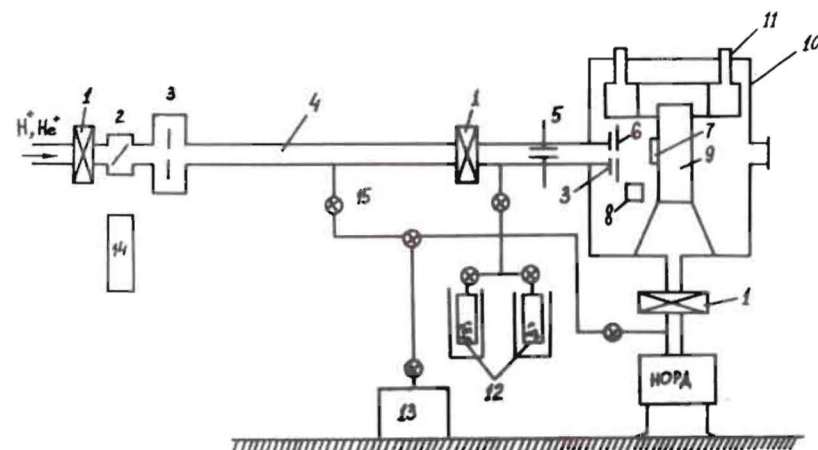


Рис.1. Схема установки для ориентирования кристалла: 1 - вакуумные затворы; 2 - подвижное зеркало; 3 - диафрагма; 4 - ионопровод; 5 - отклоняющие пластины; 6 - экран; 7 - мишень; 8 - Si-детектор; 9 - гониометр; 10 - камера измерений; 11 - азотная ловушка; 12 - цеолитовые насосы; 13 - форвакуумный насос; 14 - лазер ЛБ-153; 15 - вакуумные вентили.

внутри камеры на расстоянии 100 мм от центра мишени. Расстояние между указанными диафрагмами - 3000 мм, что обеспечивает расходимость пучка на мишени, равную - $0,02^\circ$. Для ускорения процесса вывода пучка на мишень входная диафрагма сделана подвижной, и на том же кронштейне, на котором она расположена, помещены еще две диафрагмы диаметром 2 и 4 мм. Третья диафрагма /на рисунке не показана/, установленная на входе в камеру, имеет диаметр 6 мм и ограничивает попадание расходящегося пучка на входную диафрагму, снижая тем самым фоновое излучение в камере. Как видно из рис.1, перед входной диафрагмой устанавливается участок ионопровода 2, в котором установлено подвижное зеркало и прозрачное окно диаметром 60 мм. Вне ионопровода, в перпендикулярном направлении к этому окну, устанавливается газовый лазер 14, с помощью которого проводится юстировка ионопровода и исследуемого кристалла относительно оси пучка от ускорителя. При юстировке луч лазера направляется через входную и выходную диафрагмы. Для успешного проведения этой юстировки лазер устанавливается на гониометрическом устройстве, имеющем три степени свободы перемещения. Важной особенностью конструкции, облегчающей прохождение лазерного луча через диафрагмы, является расположение указанного гониометра на кронштейне, с помощью которого можно, дополнительно к имеющимся степеням свободы, осуществлять плавный прецизионный наклон всей системы в любом направлении вокруг вертикальной оси.

С этой целью основание кронштейна лазера укрепляется на основной подставке четырьмя болтами через резиновую прокладку диаметром 180 мм, толщиной 15 мм. Жесткость крепления создается за счет сжатия резиновой прокладки. Поджимая или отпуская болты, можно наклонять всю систему на необходимый угол и в необходимом направлении.

Камера 10 имеет форму цилиндра с внутренним диаметром 410 мм, высотой 400 мм. На высоте 200 мм от основания камера имеет ряд вакуумных вводов, используемых для ввода проводов управления шестью шаговыми двигателями, для управления работой детектора, измерения тока пучка, освещения камеры и т.д.

Камера устанавливается на специальном кронштейне, укрепленном на массивной подставке, исключающей ее колебание. Кронштейн совместно с камерой может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости и по высоте, обеспечивая тем самым возможность юстировки центра камеры относительно оси пучка. На дне камеры есть отверстие диаметром 150 мм, через которое осуществляется дополнительная откачка объема камеры на высокий вакуум с помощью газоразрядного насоса НОРД-250. На рис.1 приводится также принципиальная схема вакуумной системы, состоящей из форвакуумного насоса типа НВЗ-20, двух цеолитовых насосов и высоковакуумного насоса НОРД-250. Система обеспечивает дифференцированную откачку любого узла всей установки, а также подключение ее к вакуумной системе электростатического ускорителя. Для получения максимально возможного вакуума в камеру введена ловушка 11 объемом 6 л, охлаждаемая жидким азотом. Ее установка улучшила предельно достижимый вакуум от $2 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ Тор и, главное, снизила концентрацию паров углерода в объеме камеры. Последнее оказалось весьма существенным при продолжительных исследованиях концентрированного профиля монокристалла в режиме каналирования.

На рис.2 представлена фотография гониометра, установленного в камере. Гониометр изготовлен в НИИЯФ МГУ. Как видно из фотографии, мишень или несколько мишеней устанавливаются /чаще всего путем приклеивания/ на подвижной пластине 1, перемещаемой вдоль осей X и Y с помощью шаговых двигателей /на фотографии они не видны, так как расположены на обратной стороне гониометра/. Пластина 1 с мишенями укреплена на вращающихся кронштейнах 2 и 3, обеспечивающих поворот мишени вокруг вертикальной оси /обозначен угол ω /, поворот вокруг оси пучка /угол ψ / и наклон мишени к пучку и от него / ϕ /. Перемещение мишени по осям X и Y обеспечивает исследование любой точки мишени в радиусе 10 мм. Поворот на углы ω , ϕ , ψ обеспечивает возможность установки плоскости мишени в направлении, строго перпендикулярном оси пучка, а также возможность прохождения пучка вдоль кристаллографических осей и плоскостей этой мишени /кристалла/. Для установки поверхности кристалла перпендикулярно оси пучка используется лазер, луч которого, проведенный через входную

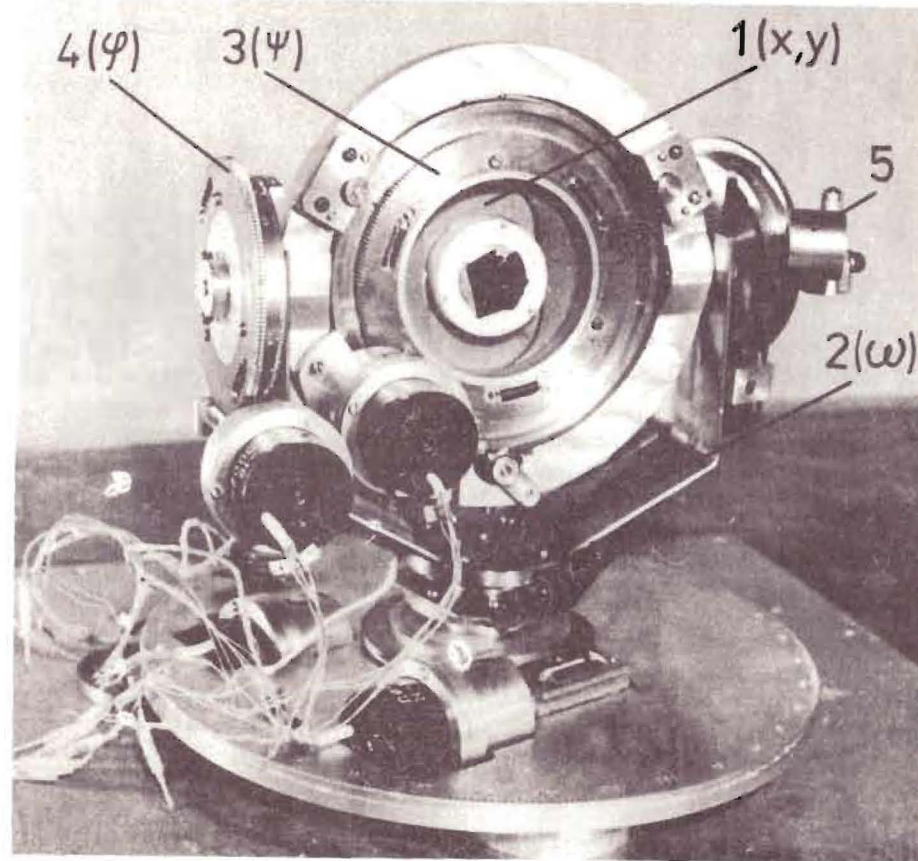


Рис.2. Фотография гониометра. 1 - кронштейн, смещающийся по осям X и Y; 2 - механизм вращения по ω ; 3,4 - то же под углами ϕ и ψ ; 5 - Si-детектор.

и выходную диафрагмы, направляется на мишень. Отразившись от мишени, он попадает на экран 6 /рис.1/, установленный в плоскости выходной диафрагмы. Вращая мишень под углами ω , ϕ , ψ , можно найти такое их сочетание, при котором луч лазера отразится в направлении оси пучка, что и будет соответствовать перпендикулярности плоскости мишени к этой оси. Перемещение мишени в указанных направлениях также осуществляется шаговыми двигателями /углы ω , ϕ , ψ и установленными на гониометре /см.рис.2/. Управление двигателями производится дистанционно с помощью системы ручного управления, где в качестве индикатора поворота осей двигателей используется механическая система, построенная на базе счетчика СБ-1.

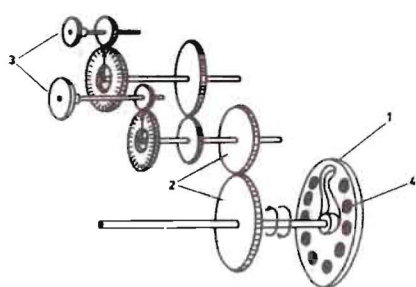


Рис.3. Схема счетчика оборотов шагового двигателя. 1 - переключатель типа ЗП2 412; 2 - шестерни; 3 - установка нуля шкалы счетчика; 4 - ламели.

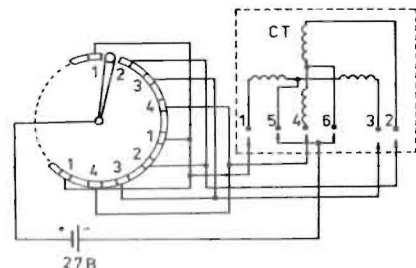


Рис.4. Схема управления шаговыми двигателями. 1 - 4 обмотки двигателя.

Рассмотрим конструкцию управления /рис.3/.

Ручное управление шаговым двигателем состоит из многопозиционного переключателя типа ЗП2412 и некоторых деталей механического счетчика СБ-1. Использована та его часть, которая осуществляет управление стрелками счетчика. В конструкцию переключателя и счетчика СБ-1 вводится одно дополнение. Как на оси переключателя, так и на одной из осей счетчика, устанавливаются /как это указано на рис.3/ в зацеплении шестерни 2 одного и того же модуля. Тогда поворот оси с подвижным контактом на некоторый угол будет фиксироваться шкалой счетчика.

На рис.4 приведена предлагаемая схема управления шаговым двигателем с использованием указанных выше элементов. Из рисунка видно, что напряжение питания +27 В через подвижной контакт, укрепленный на оси многопозиционного переключателя, последовательно подводится к обмоткам 1 - 4 шагового двигателя, общая точка которого присоединена к минусовому электроду источника напряжения. Такое последовательное подключение напряжения к обмотке 1, 2, 3 или 4 приводит к последовательным поворотам ротора двигателя на угол $\theta / \theta = 3,2^\circ$, и поскольку на указанном переключателе имеется 24 контакта, то, сделав соответствующую коммутацию /как это представлено на рис.4/, можно при повороте подвижного контакта переключателя получить вращение оси двигателя на любой угол θ . Причем число переключений, проводимых по часовой стрелке или против нее, можно контролировать по шкалам механического счетчика СБ-1 /единичные повороты и каждый сотый/. Важной особенностью схемы управления является то, что выключение источника питания не приводит к потере визуальной информации об угле поворота, сделанном осью двигателя от нулевого отсчета.

Схема управления допускает установку перед началом работы нулевой точки отсчета. Это достигается путем установки подвижных шкал счетчиков СБ-1 на нуль без вращения оси переключателя.

Таблица

	Углы поворота, град			Смещение, мм	
	ϕ	ω	ψ	X	Y
Шаг двигателя	0,019	0,019	0,10	0,042	0,035

В таблице приведены результаты, показывающие, на сколько градусов поворачивается мишень под углами ϕ , ω , ψ при одном шаге соответствующих шаговых двигателей. В этой же таблице /последние два столбца/ приведены данные по смещению мишени по осям X и Y при одном "шаге" двигателей.

Мониторизация числа частиц, падающих на мишень, проводится по измерению тока пучка. Для обеспечения этих измерений мишень изолирована от корпуса камеры и подключена к интегратору тока. Интегратор тока обеспечивает измерение тока пучка в интервале $5 \cdot 10^{-10} - 10^{-7}$ А с линейностью $\sim 1\%$. Для подавления вторичной электронной эмиссии, возникающей при бомбардировке мишени пучком ионов водорода или ^4He , мишень окружена экраном, к которому подключено отрицательное напряжение -600 В. Как показала практика измерений, в режиме каналирования, при продолжительной бомбардировке исследуемой мишени пучком ионов происходит нарушение кристаллической структуры исследуемого образца, затрудняющее исследование ориентационной зависимости выхода упруго рассеянных ионов в кристаллах. Для уменьшения этого эффекта в работе использована система отклонения пучка, сокращающая "нерабочее" время пребывания пучка на мишени. Это осуществляется с помощью двух пластин 5 /рис.1/, установленных в ионопроводе перед выходной диафрагмой. Одна из пластин заземлена, а на другую подается напряжение $2 \div 3$ кВ. После прекращения измерений, для записи информации, на пластину автоматически подается напряжение ~ 2 кВ, и пучок отклоняется на некоторый угол, не попадая тем самым на мишень.

Как указано на рис.1, в камере расположен кремниевый поверхностно-барьерный детектор 8, с помощью которого измеряются упруго-рассеянные ионы от атомов мишени. Детектор установлен на одном из кронштейнов гониометра и может перемещаться на большие углы $/100-172^\circ/$ с помощью шагового двигателя. Импульсы от детектора через предусилитель, усилитель и эмиттерный повторитель посылаются на многоканальный анализатор импульсов /типа "DIDAC" фирмы "Интертехник"/ или на ЭВМ MERA-60 для их последующей обработки.

Геометрический фактор детектора Ω составляет $5 \cdot 10^{-4} / \Omega = S/R^2$, где S - площадь входной диафрагмы детектора, R - расстояние от мишени до диафрагмы/. Для периодических калибровок детек-

тора в крышке камеры установлен подвижной вакуумный ввод, на котором установлен α -источник ^{238}Pu / $E_\alpha = 5,49$ МэВ/. Энергетическое разрешение детектора для протонов с энергией 3,0 МэВ составляет ~ 25 кэВ.

Калибровка энергетической шкалы электростатического ускорителя проводилась по измерению положения пика неупругого рассеяния протона в реакции $^{24}\text{Mg}(p,p'\gamma)^{24}\text{Mg}$ с энергией 2,41 МэВ. Она проводилась на тонкой мишени, полученной путем напыления магния на тонкую / ~ 30 мкг/см²/ пленку углерода. Ошибка в определении энергии не превышает 0,1%.

2. ПОИСК УГЛОВЫХ КООРДИНАТ КРИСТАЛЛА, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ОСЕВОМУ И ПЛОСКОСТНОМУ КАНАЛИРОВАНИЮ ИОНОВ ВОДОРОДА И ^4He

Как уже указывалось, заключение о каналировании ионов в кристалле проводится по результатам измерения интенсивности упруго рассеянных ионов на большие углы. Для случая неориентированного кристалла энергетический спектр упруго-рассеянных ионов имеет форму пологой кривой, падающей к нулевому значению при $E = kE_0$, где E_0 - энергия пучка. Энергии kE_0 соответствует нулевая глубина проникновения частиц в кристалл, k - кинематический фактор рассеяния. Когда условия каналирования для падающих на мишень ионов выполнены, вероятность их столкновения с ядрами уменьшается, и число рассеивающихся частиц, регистрируемых детектором, резко падает, за исключением низкоэнергетической области, где кривая вследствие эффекта деканалирования имеет некоторый подъем. Последнее происходит под влиянием таких факторов, как многократное рассеяние каналированных частиц на тепловых колебаниях атомов решетки, наличие дефектов кристаллической структуры и т.д.

Поиск канала проводился по измерению угловой зависимости выхода упруго-рассеянных частиц. Эти измерения проводились при последовательном изменении угла наклона мишени в направлении ϕ и ω при неизменном угле ψ . Измерения проводились в два этапа. Вначале с помощью луча лазера ЛБ-153 поверхность кристалла устанавливалась перпендикулярно оси пучка падающих ионов /погрешность $\sim 1^\circ$ /. С учетом того, что для исследуемых нами кристаллов Si направление кристаллографической оси по отношению к поверхности кристалла известно в пределах $\pm 3^\circ$, дальнейший, второй этап измерений состоит в уточнении этого направления путем последовательного, дискретного перемещения кристалла под углами ϕ и ω в пределах этого диапазона. Так, например, сканирование по ϕ проводилось при неизменном значении углов ω , ψ и наоборот /сканирование проводится по углу ω при неизменном значении ϕ , ψ /.

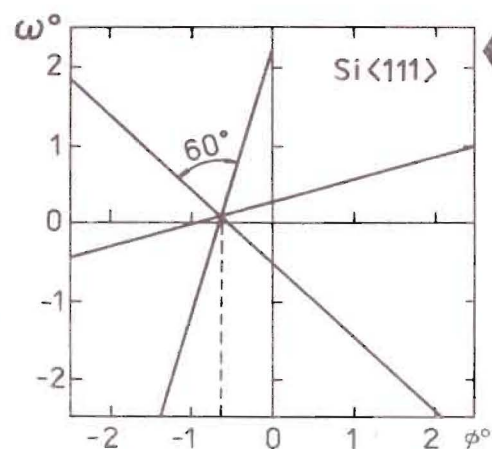
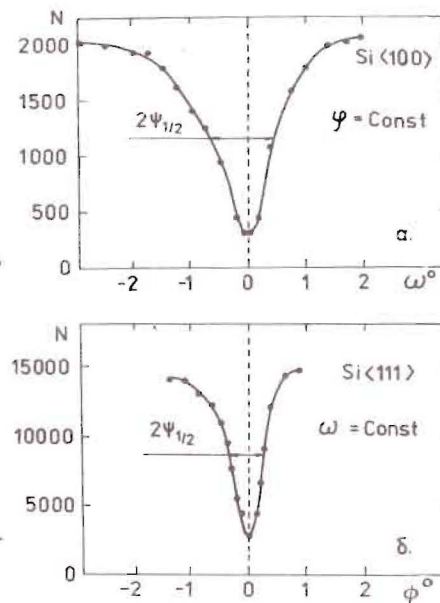


Рис. 5. Стереодиаграмма для определения координат кристаллографического канала $\langle III \rangle$ в кристалле Si.

Рис. 6. Угловая зависимость выхода упруго-рассеянных протонов с энергией 1,5 МэВ в направлении кристаллографической оси $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ для кристалла Si. По оси абсцисс - угол поворота кристалла в град. По оси ординат - относительный счет упруго-рассеянных протонов.



Измерение проводилось с шагом от $0,02^\circ$ до $0,1$. На рис. 5 приведена типичная стереодиаграмма одного из измерений, где по оси абсцисс и оси ординат обозначены углы наклона плоскости кристалла ϕ и ω к оси пучка. Измерение выхода упруго рассеянных ионов проходило по периметру квадрата, показанному на рисунке, и аналогично измерениям, проводимым в работе^{2/}. Выход упруго-рассеянных ионов по этому периметру имеет ряд минимумов, которые соответствуют плоскостному каналированию ионов в кристалле. Для случая, когда тип кристаллографической оси кристалла известен / $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ и т.д./, определение координат ϕ_0 , ω_0 гониометра, при которых наблюдается каналирование частиц, несколько облегчено. Для этого необходимо провести прямые линии по минимумам, соответствующим определяемым кристаллографическим плоскостям, так, чтобы все проведенные прямые пересекались в одной точке под углами, соответствующими известному типу кристаллографической оси. Точка их пересечения и определяется искомыми координатами ϕ_0 , ω_0 , т.е. координатами, при которых кристаллографическая ось совпадает с осью пучка. Эти координаты ϕ_0 , ω_0 устанавливаются на гониометре для последующих исследований кристалла с использованием осевого каналирования.

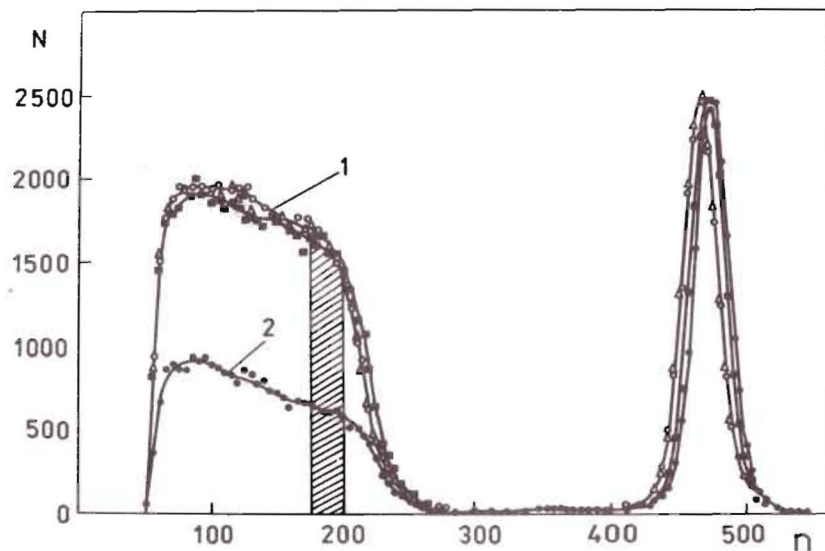


Рис.7. Энергетический спектр упруго-рассеянных ионов ^4He на кристалле $\text{Si} \langle 111 \rangle$, на поверхность которого напылена Pt: 1 - спектр для неориентированного кристалла при различных углах ϕ и ω ; 2 - спектр для случая, когда пучок ускоренных ионов падает вдоль кристаллографической оси.

На рис.6 приведены кривые угловых зависимостей выхода упруго-рассеянных протонов в направлении кристаллографических осей $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ в кристалле Si. Полученные значения полуширины кривой $\psi_{1/2}$, равные для $\text{Si} \langle 111 \rangle$ - $0,54^\circ$ и для $\text{Si} \langle 110 \rangle$ - $0,29^\circ$, хорошо согласуются с теоретическими расчетами [1]. Экспериментальные возможности описываемой установки проверялись при проведении следующих работ:

1. Измерен выход упруго-рассеянных ионов от кристалла $\text{Si} \langle 111 \rangle$, на поверхность которого напылен слой платины / $d \sim 1000 \text{ \AA}$ /. Измерения проводились при неориентированном и ориентированном направлениях кристаллографической оси относительно оси пучка. Для неориентированного направления измерения проводились при нескольких углах поворота мишени ϕ и ω . При этом выход упруго-рассеянных ионов в пределах 5% оставался неизменным.

На рис.7 /кривая 1/ приведены энергетические спектры упруго-рассеянных ионов, на основании которых проводились эти определения /для наглядности на рисунке приведены два спектра из 5 измеренных/. Для ориентированного кристалла выход упруго-рассеянных ионов уменьшился на 65% /кривая 2/. Столь небольшое уменьшение выхода упруго-рассеянных ионов Si связано с наличием

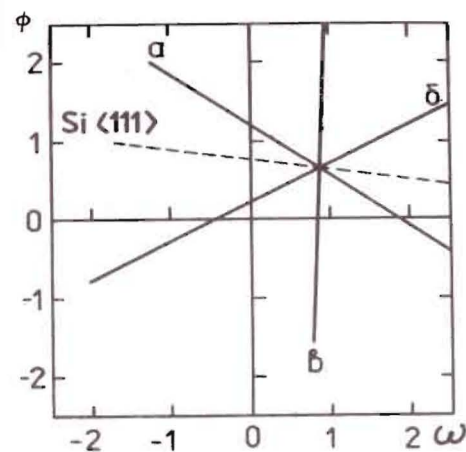


Рис.8. Стереограмма для определения координат кристаллографического канала $\langle 111 \rangle$ в кристалле Si с имплантированными в нем атомами As.

пленки Pt на ее поверхности, которая приводит к увеличению расходимости пучка при прохождении этого слоя, ухудшая тем самым условия каналирования.

Заметим, что заштрихованная часть спектра - область, по которой ведется суммирование спектра. Ширина этой области выбиралась такой, чтобы отношение интегрального счета упруго-рассеянных ионов для неориентированного кристалла к тому же счету при измерениях, проводимых в режиме каналирования, было возможно большим.

2. Рассмотрены изменения в структуре кристалла с имплантированным в него As, в результате термообработки этого кристалла. Исследовались образцы, имеющие следующие характеристики:

а/ исходный кристалл $\text{Si} \langle 111 \rangle$; б/ исходный кристалл $\text{Si} \langle 111 \rangle$ с отжигом; в/ исходный кристалл $\text{Si} \langle 111 \rangle$, в котором имплантирован As /энергия имплантированных ионов $E_{\text{As}} = 20 \text{ кэВ}$, число имплантированных атомов $6 \cdot 10^{15} \text{ атома/см}^2$; г/ исходный кристалл $\text{Si} \langle 111 \rangle$ с имплантированным в него As, но прошедшим отжиг.

Результаты измерения представлены на рис.8-10. На рис.8 показана стереограмма исследуемого кристалла, где индексами а,б,в указаны направления кристаллографических плоскостей, пересечение которых определяет координаты кристаллографического канала $\langle 111 \rangle$. На рис.9А представлена ориентационная зависимость для исследуемого кристалла $\text{Si} \langle 111 \rangle$ с имплантированным в него As без термической обработки. Для наглядности данные для Si и As нормированы на единицу. Видно, что для As ориентационная зависимость имеет вид прямой, параллельной оси абсцисс. Это указывает на то, что атомы As после имплантации распределены в поверхностном слое равномерно. Ориентационная кривая для этого же кристалла /б, рис.9/, но прошедшего отжиг, имеет для As минимум, составляющий ~40% от минимума для Si. Это говорит о том, что отжиг частично усовершенствовал структуру предповерхностного слоя, и часть атомов As после отжига диффундировала в узлы и межузлия кристаллографической решетки Si. Эти изменения можно проследить и на рис.10, где приведен энергетический спектр упруго-рассеянных ионов ^4He для обоих случаев. Кривая 1 представляет энергетический спектр для неориентированного кристалла. Кривая 2 - для

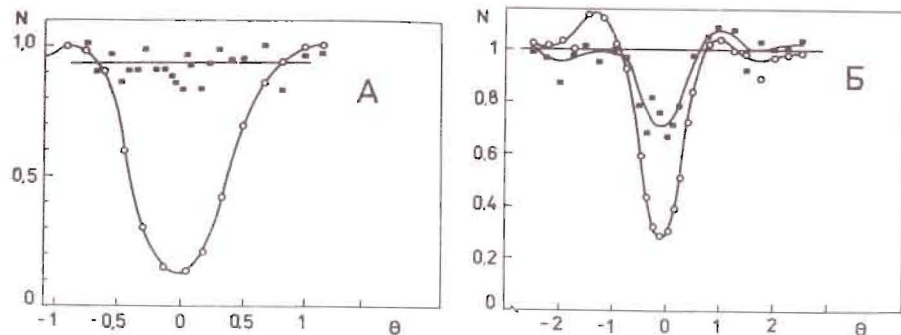


Рис.9. Ориентационная зависимость для кристалла Si<111> с имплантированным в нем As, измеренная на пучке ионов ^4He с энергией 1,5 МэВ: А - ориентационная зависимость, когда образец не прошел термической обработки; Б - та же зависимость, но после термической обработки.

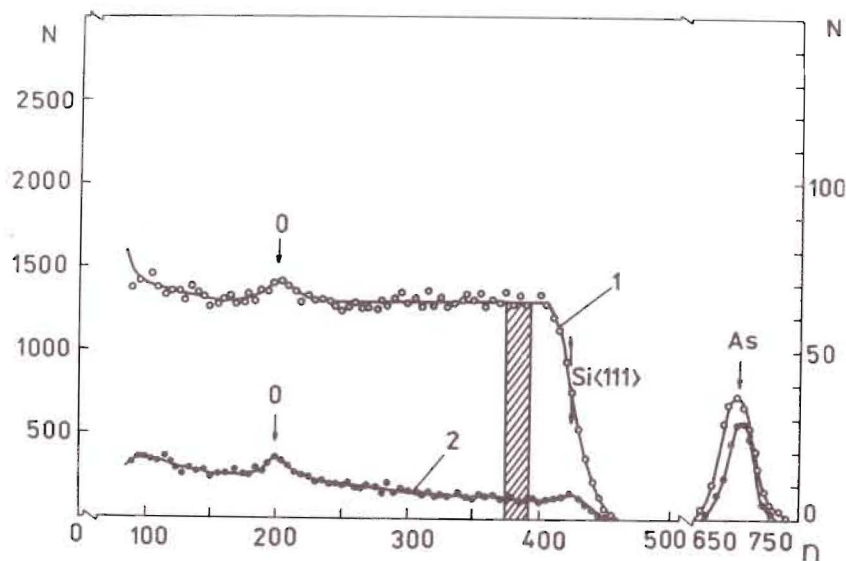


Рис.10. Энергетический спектр упруго-рассеянных ионов ^4He с энергией 1,5 МэВ от кристалла Si<111> с имплантированным в нем As: 1 - кристалл не ориентирован; 2 - кристаллографическая ось ориентирована вдоль пучка. По оси абсцисс - каналы анализатора импульсов. По оси ординат - относительный счет.

ориентированного. Из рисунка видно, что площадь спектра на кривой 2 уменьшается /по расчету на 35%/. Это подтверждает сделанное выше заключение.

3. Рассмотрено влияние времени облучения кристалла ионами на структуру его поверхностного и предповерхностного слоев. Измерения проводились как на неориентированном кристалле, так и в режиме каналирования. Были замечены следующие закономерности:

а/ При 8-часовом облучении кристалла Si<111> на нем дополнительно образуется пленка углерода. В результате наблюдается как смещение пика упруго-рассеянных ионов ^4He на кислороде, так и смещение границы спектра упругого рассеяния ^4He на Si.

б/ Выход упруго-рассеянных ионов ^4He в режиме каналирования при длительном облучении увеличивается, а сама ориентационная зависимость становится не столь явно выраженной. Последнее, по-видимому, является результатом радиационных повреждений решетки кристалла, а также появления на нем пленки углерода. Естественно, все это необходимо учитывать при планировании эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенной работы:

1. Построена экспериментальная установка для изучения структуры кристалла методом упругого рассеяния ионов водорода и ^4He в режиме их каналирования в кристаллах.

2. Показана возможность получения на мишени пучка ускоренных ионов диаметром 1 мм с расходимостью пучка $0,02^\circ$ при токе пучка 10 нА, а также возможность ориентирования кристаллографической оси кристалла вдоль этого пучка в пределах $\pm 0,02^\circ$.

3. На примере исследования 4 образцов Si<111>, в двух из которых имплантирован мышьяк, показана возможность получения информации об изменениях, происходящих в структуре кристалла в процессе его отжига.

4. Выяснены некоторые особенности работ установки, которые необходимо учитывать при планировании исследований одного и того же кристалла. К ним следует отнести в первую очередь увеличение со временем толщины углеродной пленки на поверхности кристалла.

Авторы весьма благодарны С.Н.Ткаченко, З.Д.Трошкину, С.Ю.Безногих за помощь в работе по сборке и наладке установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leonard C.Feldman, James W.Mayer, S.Thomas Picraux. Materials Analysis by Ion Channeling. Academic Press, New-York, London, 1982.

2. Picraux S.T. *New Uses of Ion Accelerations*, Edited by James F.Ziegler, Plenum Press, New York and London, 1975.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "*Краткие сообщения ОИЯИ*". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "*Сообщений ОИЯИ*", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "*Краткие сообщения ОИЯИ*" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.
Theoretical physics.
Experimental techniques and methods.
Accelerators.
Cryogenics.
Computing mathematics and methods.
Solid state physics. Liquids.
Theory of condensed matter.
Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

JINR Rapid Communications will be issued regularly.

