

Харьковский государственный университет

На правах рукописи

Пелетминский Владимир Сергеевич



Изучение деканализирования протонов методом анализа
ориентационной зависимости спектров характеристического
рентгеновского излучения

01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков 1995



00755758 (.)

Работа выполнена в Харьковском государственном университете.

Научные руководители: академик НАН Украины, доктор физико-математических наук, профессор
СТОРИЖКО Владимир Ефимович;
кандидат физико-математических наук,
профессор
МУРАТОВ Владимир Иванович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
СОЗНИК Александр Петрович
(Харьковское Высшее Военное Училище
Национальной Гвардии Украины);
кандидат физико-математических наук
КОЛЮТ Владимир Яковлевич
(Харьковский физико-технический институт)

Ведущая организация: Институт металлофизики НАН Украины,
г. Киев.

Защита состоится "6" ~~сентября~~ 1995 г. в 15 часов на заседании Специализированного Совета Д 02.02.12 при Харьковском государственном университете (310108, г. Харьков-108, пр. Курчатова, 31, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан "20" ~~июня~~ 1995 г.

Ученый секретарь Специализированного
Совета, доктор физико-математических
наук, профессор

В. В. Стефаніка
АН України

Н. А. Азаренков

Общая характеристика работы

Актуальность. Успехи в развитии физики ион-атомных столкновений, ядерной физики, а также современной электронной техники определили появление новых оригинальных методов исследования структуры и состава твердых тел. В связи с широким применением пучков ускоренных ионов в науке и технике, исследования их взаимодействия с веществом, приобретают все большую значимость. Одним из основных методов изучения кристаллических твердых тел является метод каналирования пучков ускоренных заряженных частиц. Эффект каналирования частиц сейчас успешно используется для получения информации о дефектах кристаллической решетки, местонахождении примесных атомов, в технике ионного легирования, и т.д.

В большинстве случаев для интерпретации экспериментальных данных по каналированию пучков заряженных частиц необходимо обладать информацией о выходе частиц из канала, а именно знать поведение функции деканалирования $\chi(z)$. Как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения определение функции деканалирования представляет собой сложную задачу. Ее решение затрудняется тем, что переход ионов в режим случайного распространения является специфическим для каждого конкретного кристалла в зависимости от типа имеющихся в нем дефектов и характера их распределения. Поэтому результаты точных измерений и детальных расчетов, выполненных для совершенных кристаллов, проблематично использовать для образцов, с которыми приходится иметь дело в научно-технических приложениях. На практике основным методом определения функции минимального выхода является метод резерфордовского обратного рассеяния частиц (РОР). Функцию деканалирования определяют как отношения выходов обратно рассеянных частиц в режиме каналирования и случайного распространения пучка ионов. При этом ключевая проблема, от которой зависит достоверность получаемых результатов — способ пересчета шкалы энергий в шкалу глубин, который определяется выбором соотношения между тормозными способностями частиц, движущихся в канале и вне его. В частности, самосогласованный

подход к отысканию функции деканалирования и тормозных способностей частиц, движущихся в канале, позволяет вполне корректно построить зависимость от глубины минимального выхода частиц, установить механизм их деканалирования на начальном этапе распространения в кристалле ионного пучка.

Однако, чтобы быть зарегистрированным детектором, рассеянный ион должен иметь энергию, достаточную для обратного выхода из кристалла, поэтому предельная глубина, доступная для исследования методом POP, не превышает половины пробега частицы при заданной начальной энергии. Кроме того, при уменьшении энергии регистрируемых частиц все сильнее сказывается их многократное рассеяние атомами мишени. Это проявляется как в характерном загибе спектра POP, так и в резком нарастании разброса отсчета детектора. Поэтому в кристаллах существуют целые области, которые невозможно исследовать с помощью метода обратного рассеяния, где о деканалировании частиц практически ничего не известно. Вместе с тем в глубине мишени значительная доля частиц все еще может оставаться в режиме каналирования. Наши оценки показывают, что для монокристалла W на предельном расстоянии от поверхности, где информацию о деканалировании, полученную методом POP, еще можно считать достоверной, минимальный выход частиц, имевших начальную энергию $E_0 = 2.0, 1.5$ и 1.0 МэВ, составляет соответственно всего приблизительно 25, 20 и 5%. Существенным является и тот факт, что дифференциальная функция деканалирования имеет здесь максимальное значение либо еще не достигает его. В этой связи актуальной задачей является определение минимального выхода частиц не только на начальном этапе распространения ионного пучка, но и в глубине кристалла.

Таким образом, представляется полезным иметь методику восстановления функции деканалирования, включающую в себя корректировку на разницу в тормозных способностях частиц и обладающую достаточной точностью описания выхода частиц на глубинах недоступных методу POP.

Выход характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), возбуждаемого в мишени пучком ускоренных ионов, не зависит от глубины его генера-

ции. Интегральность процесса выхода ХРИ, в частности, несет информацию о деканалировании частиц с больших глубин их проникновения в материал мишени. Более того, аппаратура, регистрирующая спектры рентгеновского излучения, является стандартной и ею оснащены большинство установок по ионному анализу. Следовательно, идея использования спектров ХРИ для восстановления функции деканалирования ионов представляется актуальной. Представляет интерес и разработка комбинированной методики, включающей в себя достоинства методов ХРИ и РОР.

Этим обусловлена актуальность темы диссертации, которая посвящена разработке методики исследования деканалирования частиц в широком интервале глубин на основе анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ.

Целью настоящей работы является построение методики исследования деканалирования частиц в монокристаллических мишенях в широком интервале глубин на основе анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработана методика восстановления функций деканалирования частиц на основе анализа ориентационной зависимости ХРИ.
2. Разработана методика восстановления функции деканалирования протонов на основе совместного использования спектров ХРИ и РОР.
3. Предлагается использовать функции деканалирования заряженных частиц, полученные для широких интервалов глубин и спектры ХРИ для определения профилей концентраций примесей в монокристаллических мишенях.
4. Предлагается метод оценки тормозной способности каналирующих частиц на основе анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ.

Научная новизна. Все результаты, перечисленные в "Положениях выносимых на защиту", получены впервые, что и определяет новизну работы.

Практическая ценность работы. Разработанные методики восстановления функций деканалирования частиц в широком интервале глубин могут быть

использованы для исследования монокристаллических образцов методом каналирования частиц до глубин, недоступных методу РОР. Предлагается использовать функции деканалирования частиц и спектров ХРИ для определения профилей концентраций примесей в монокристаллических мишенях.

Достоверность. Разработанные методики применялись для исследования деканалирования частиц с начальной энергией 1-3 МэВ в монокристаллах W и Ge. Полученные результаты хорошо согласуются с данными аналогичных исследований, полученных для глубин, доступных методу РОР.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Содержание работы.

Введение содержит краткое разъяснение актуальности темы, формулируется цель и задачи работы.

В первой главе дан обзор использованной литературы. Рассмотрены особенности исследования процессов каналирования пучков ускоренных ионов в монокристаллических мишенях, выхода ХРИ в условиях каналирования. Затронут вопрос восстановления профилей концентраций примесей в кристаллах.

В разделе 1.1 рассмотрен вопрос о влиянии кристаллической решетки на траектории ускоренных частиц, проникающих в монокристаллическую мишень. Приведен краткий обзор работ, посвященных изучению процессов каналирования и деканалирования ионов в кристаллах. Уделено внимание проблеме соотношения тормозных способностей частиц, движущихся в режимах каналирования и случайного распространения в интервалах мишени. Отмечено, что эта проблема остается центральной в теоретических и экспериментальных исследованиях процессов каналирования частиц. С ней, в частности, связаны несоответствия многих экспериментальных данных, полученных в различных работах.

В разделе 1.2 дан обзор работам, посвященным проблеме выхода ХРИ, возбуждаемого ионами, распространяющимися в монокристаллической мишени. Отмечена возможность использования спектров рентгеновского излу-

чения в исследовании процессов деканализирования частиц. Рассмотрен ряд работ, посвященных использованию спектров ХРИ для определения состава и дефектности кристаллических твердых тел.

В разделе 1.3 рассмотрены работы, посвященные задаче восстановления профиля концентраций примесей методом ХРИ.

Во второй главе рассмотрено экспериментальное оборудование, методика измерений, приведены основные экспериментальные данные и методы их обработки. Дан анализ эффекта изменения относительной интенсивности линий ХРИ при переходе пучка в режим каналирования.

Раздел 2.1 посвящен описанию технической части проведения эксперимента. Рассматривается используемое экспериментальное оборудование и условия проведения измерений.

При проведении эксперимента использовалась вакуумная камера, оснащенная трехосевым гониометром. Источником ускоренных ионов с начальной энергией 1-3 МэВ являлся электростатический ускоритель заряженных частиц. Спектры POP регистрировались поверхностно-барьерным детектором заряженных частиц. Спектры ХРИ, возбуждаемого в монокристаллических мишенях пучком протонов, регистрировались Si(Li) детектором рентгеновского излучения. В разделе приведена схема эксперимента.

В разделе 2.2 приведены экспериментальные спектры ХРИ и POP, полученные при облучении пучком ускоренных протонов монокристаллов W, Ge и GaAs. Дан анализ полученных экспериментальных результатов.

В разделе 2.3 кратко изложены методы обработки экспериментальных данных. Рассчитаны энергетические зависимости коэффициентов массового ослабления для исследуемых кристаллов. Обсуждается метод расчета выхода ХРИ, возбуждаемого пучком ускоренных ионов в монокристаллической мишени. Приведены аналитические выражения, которые легли в основу счетной программы восстановления функции деканализирования ионов методом POP. Все программы расчетов и обработки экспериментальных данных написаны на алгоритмическом языке "Фортран-77" и реализованы на персональном компьютере IBM PC/AT-386.

В разделе 2.4 произведен анализ эффекта изменения относительной интенсивности линий ХРИ, возбуждаемого протонами в монокристаллах W, Ge и GaAs, при переходе пучка в режим каналирования. Обнаружена зависимость изменения относительной интенсивности линий ХРИ при случайном и ориентированном положении мишени от длины волны рентгеновского излучения. Между энергетическими зависимостями отношения интенсивностей линий и коэффициентами массового ослабления существует очевидная корреляция. При переводе образца в ориентированное положение интенсивность линии падает тем слабее, чем меньше соответствующий ей коэффициент массового ослабления. Так как ионы, движущиеся в режиме каналирования практически не ионизируют внутренние оболочки атомов мишени, то ХРИ возбуждается лишь деканализованными ионами. В этой связи в данном случае ХРИ излучается в среднем с большей глубины по сравнению с неориентированным положением мишени, что и должно приводить к наблюдаемому эффекту.

В третьей главе, которую можно считать основной, рассмотрены предлагаемые методы восстановления функций деканалирования ионов в широком интервале глубин на основе анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ и РОР. Обсуждается возможность использования полученных результатов для определения профилей концентрационных примесей в монокристаллических мишенях. Также рассмотрен метод получения информации о торсионных способностях каналированных частиц при помощи анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ.

В разделе 3.1 дано описание предлагаемой методики изучения деканалирования частиц, основанной на эффекте изменения относительной интенсивности линий ХРИ при переводе кристаллической мишени в ориентированное положение. Возможность использования ориентационной зависимости спектров рентгеновского излучения для определения доли деканализованных частиц основана на допущении, что каналирующие частицы практически не ионизируют К- и L- оболочки атомов мишени. Поэтому, рентгеновское излучение возбуждается лишь частицами, деканализовавшими на поверхности и в глубине образца, а выход ХРИ является характеристикой процесса деканалирования.

Из экспериментальных спектров ХРИ были получены ориентационные зависимости отношения интенсивности линий, отражающие изменение формы функции деканалирования частиц.

Если ограничиться заданным функциональным видом функции деканалирования $\chi(z)$, то и сама эта зависимость может быть восстановлена по изменению интенсивности выхода ХРИ при переводе пучка ионов в режим каналирования.

Принимая во внимание допущение о равенстве тормозных способностей частиц в режиме каналирования и случайного распространения, выход ХРИ можно записать в виде:

$$I_{\lambda}^{(R)} = N_0 \Omega n \int_0^{E_0} \sigma_{\lambda}(E) \exp[-\mu_{\lambda} k z(E_0, E)] \frac{dE}{S(E)}, \quad (1)$$

В режиме каналирования :

$$I_{\lambda}^{(c)} = N_0 \Omega n \int_0^{E_0} \sigma_{\lambda}(E) \exp[-\mu_{\lambda} k z(E_0, E)] \chi(z(E_0, E)) \frac{dE}{S(E)}, \quad (2)$$

где N_0 - число налетающих частиц; Ω - телесный угол регистрации ХРИ; n - плотность вещества мишени; σ - сечение генерации ХРИ, μ - коэффициент массового ослабления; k - геометрический фактор; $S(E) = -\frac{dE}{dx}$.

Если считать, что функциональный вид $\chi(z)$ задан, но при этом зависит от нескольких вариационных параметров a_i : $\chi(z) = \chi_{a_1, a_2, \dots, a_m}(z)$, тогда можно произвести численный расчет отношения интенсивностей линий ХРИ :

$$f_{\lambda}^{(cal)} = I_{\lambda}^c / I_{\lambda}^R \quad (3)$$

Приравнявая рассчитанные и экспериментальные отношения интенсивностей, можно получить уравнение для определения параметров a_i функции деканалирования:

$$f_{\lambda}^{(ex)} = f_{\lambda}^{(cal)} \quad (4)$$

Если функция деканалирования зависит от m параметров, то (4) можно рассматривать как систему уравнений для определения a_i . Таким образом, количество параметров, которое можно ввести для вариации функции деканалирования, равно числу уравнений типа (4). Последнее определяется количеством различных линий в спектре ХРИ измеряемой серии. Причем реально могут быть использованы лишь те линии, для которых величины $f_{\lambda}^{(ex)}$ отличаются достаточно сильно, иначе соответствующие уравнения становятся тождественными.

Как известно, вполне адекватной аппроксимацией $\chi(z)$, позволяющей удовлетворительно описывать экспериментальные данные, является функция вида: $\chi(z) = \chi_0 + (1 - \chi_0) \exp(-\frac{z}{l})$, где χ_0 — минимальный выход с поверхности кристалла, l — длина деканалирования. В нашем случае χ_0 и l — параметры, подлежащие определению. Найдя численные значения χ_0 и l легко восстановить поведение функции деканалирования частиц. Однако, задачу можно упростить, если величину χ_0 выделить из спектров РОР как отношение выходов обратно рассеянных частиц с поверхности кристалла в режиме каналирования и случайного распространения пучка.

В разделе 3.2 рассматриваются экспериментальные результаты исследования деканалирования протонов с начальными энергиями 1–3 МэВ в монокристаллах Ge и W предположенным методом.

В разделе 3.3 предлагается методика восстановления функции деканалирования ионов в широком интервале глубин на основе совместного анализа ориентационных зависимостей спектров ХРИ и РОР.

Минимальный выход частиц представляется в виде:

$$\chi(z) = \vartheta(z - z_0)\chi_{<}(z) + \vartheta(z_0 - z)\chi_{>}(z), \quad (5)$$

где $\chi_{<}(z)$ — полиномиальная аппроксимация функции деканалирования восстановленной из спектров РОР. Функция минимального выхода на больших

глубинах представляется в виде:

$$\chi_{>} = A + B \left(1 + \frac{l}{(z-a)} \right) \exp \left[- \frac{l}{(z-a)} \right], \quad (6)$$

где A, B, l и a — параметры, подлежащие определению. Это выражение для определения функции деканалирования на больших глубинах использовалось с тремя наборами из четырех параметров A, B, l и a , два из которых задаются, а два других находятся из условий спивания $\chi_{<}$ и $\chi_{>}$ в точке z_0 . Сама же z_0 находится из требования равенства рассчитанных и экспериментальных значений отношения интенсивности линий ХРИ в режиме каналирования и случайного распространения пучка ионов. Эта методика была применена для исследования деканалирования частиц с начальными энергиями 1.0; 1.5 и 2.0 МэВ в монокристалле W (раздел 3.4). Полученные данные хорошо согласуются с данными аналогичных исследований.

Функции деканалирования, восстановленные для широких интервалов глубин предлагается использовать для определения зависимости от глубины выхода ХРИ (раздел 3.5). Полученные кривые имеют максимумы, положение которых смещается при изменении начальной энергии протонов. Отмечается возможность использования этого эффекта для восстановления профиля концентраций элементов в монокристаллических решетках.

В разделе 3.6 предлагается новая экспериментальная методика, позволяющая оценить тормозную способность каналирующей частицы на основе анализа энергетической зависимости отношения интенсивностей линий ХРИ при ориентированном и случайном положении монокристалла. Вводится эффективная глубина T , при достижении которой все частицы, (до этого каналированные) переходят в режим случайного распространения. Это позволяет записать для E_T — энергии частицы на глубине T — уравнение:

$$F_{\alpha\alpha}^{(R)}(E_T, E) [F_{\beta\alpha}^{(R)}(E_T, E_T)]^{M_{\alpha\beta}} = [F_{\beta\alpha}^{(Ch)}(E, E)]^{M_{\alpha\beta}} f_{\alpha}(E) \quad (7)$$

здесь $M_{\alpha\beta} = \mu_{\alpha} / (\mu_{\alpha} - \mu_{\beta})$, $\mu_{\alpha, \beta}$ — коэффициенты массового ослабления,

$$F_{\alpha\beta}^{(R, Ch)}(E_1, E_2) = I_{\alpha}^{(R, Ch)}(E_1) / I_{\beta}^{(R, Ch)}(E_2), f_{\alpha}(E) = I_{\alpha}^{(Ch)}(E) / I_{\alpha}^{(R)}(E) \quad (8)$$

где $I_{\alpha}^{(R,Ch)}$ — интенсивность линии α , возбуждаемой ионами с энергией E при случайном и ориентированном наложении кристалла.

$$T = k^{-1}(\mu_{\alpha} - \mu_{\beta})^{-1} \ln[F_{\beta\alpha}^{(Ch)}(E, E)/F_{\beta\alpha}^{(R)}(E_T, E_T)], \quad (9)$$

где k — геометрический фактор. Зная функции $T = T(E)$ и $E_T = E_T(E)$ можно легко восстановить тормозную способность каналирующей частицы.

$$S_{Ch}(E_T) = \left(\frac{dT}{dE}\right)^{-1} \left(1 - \frac{dE_T}{dE}\right). \quad (10)$$

Отметим, что предлагаемая методика пригодна для проведения оценок и качественного изучения энергетической зависимости тормозных способностей каналированной частицы. Заметим, что подбором образцов можно достичь точного определения S_c . Для этого необходим подбор мишеней, вид функции деканалирования которых имеет ступенчатый вид, например, монокристаллические пленки толщиной T , расположенные на поликристаллической подложке.

В заключении перечислены основные результаты работы, которые в основном совпадают с положениями, выносимыми на защиту.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Григорьев А.Н., Дедик А.Н., Кульментьев А.И., Муратов В.И., Пелетминский В.С., Савушкин Е.В., Сторижко В.Е. Изменение относительной интенсивности линий возбуждаемого ионами H^+ спектра ХРИ при переходе от случайного к ориентированному положению монокристалла. — Поверхность, 1991, № 9, с.157–159.

2. Пелетминский В.С., Савушкин Е.В., Сторижко В.Е., Григорьев А.Н., Муратов В.И. Исследование деканалирования протонов в монокристалле Ge на основе ориентационной зависимости спектров характеристического рентгеновского излучения. — Поверхность, 1992, № 12, с.97–99.

3. Пелетминский В.С., Савушкин Е.В., Сторижко В.Е., Муратов В.И. Определение функции деканалирования в широком интервале глубин на основе со-

вместного использования спектров ХРИ и РОР. — Поверхность, 1994, № 1, с.92-98.

4. Пелетминский В.С., Савушкин Е.В., Сторишко В.Е. Определение тормозной способности каналирующих частиц на основе анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ. — Материалы XXI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. — М.: Издательство МГУ, 1992, с.78-80. 5. Пелетминский В.С., Савушкин Е.В., Сторишко В.Е. Определение тормозной способности каналирующих частиц на основе анализа ориентационной зависимости спектров ХРИ. — Тезисы докладов XXI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. — М.: Издательство МГУ, 1991, с.44.

6. Григорьев А.Н., Дедик А.Н., Кульментьев А.И., Муратов В.И., Пелетминский В.С., Савушкин Е.В., Сторишко В.Е. Изменение относительной интенсивности линий возбуждаемого ионами H^+ спектра ХРИ при переходе от случайного к ориентированному положению монокристалла. — Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Микроанализ на ионных пучках". Сумы: редакционно-издательский отдел. 1990, с.23.

Пелетмінський В.С. "Дослідження деканалювання протонів методом аналізу орієнтаційної залежності спектрів характеристичного рентгенівського випромінювання".

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок. Харківський держуніверситет, Харків, 1994.

Розроблені методики поновлення функції деканалювання іонів за основою аналізу орієнтаційної залежності спектрів ХРВ до глибин недоступних методу РЗР. Одержані функції деканалювання пропонується використати для визначення залежності від глибини виходу ХРВ, а також для визначення профілей концентрації домішок у кристалічних мішенях. Розглянена можливість визначення гальмової здатності каналююваних частинок за основою аналізу орієнтаційної залежності спектрів ХРВ.

Ключові слова: каналювання, монокристал, рентгенівське випромінювання.

Peletminsky V.S. "The study of proton dechanneling on the basis of analysis of an an orientation depece of PIXE spectra". Candidate of scince thesis of physics of atomic nuclear and elementary particles. Kharkov State University, Kharkov, 1995.

The method of determination of ion dechanneling function on dependence of PIXE spectra in inner regions of crystal is obtained. Presents results have been used for the X-rays emission relative yield on the distance from the crystal surface and for the restoration of an elements concentration profile in single crystals. The possibility of determination ions stopping power on the basis of an orientation dependence of PIXE spectra is considered.

Подписано в печать 30.06.95. Формат 60x84/16. Офсетн. печ.
Усл.п.л. 1,0. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100. Заказ № 102.

Харьков-108, ротапринт ННЦ ХФТИ

454450

AB 32.796

AB 32.796