

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

T-995

1-84-44

ТЯПКИН
Игорь Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ
ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЗИТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ
В МОНОКРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник, профессор

ЦЫГАНОВ
Эдуард Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник, профессор

ФЕДЯНИН
Виктор Константинович

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник, профессор

ЕРМОЛОВ
Павел Федорович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Харьковский физико-технический институт

Защита диссертации состоится 29 марта 1984 года в
10³⁰ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЦЭА ОИЯИ

Автореферат разослан 17 февр. 1984 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета *Михаил* М.Ф. ЛИХАЧЕВ

Актуальность проблемы. Изучение взаимодействия частиц высокой энергии с кристаллической мишенью является одним из новых направлений физики высоких энергий. В случае, когда вещество мишени однородно и изотропно, интенсивность наблюдаемых процессов не зависит от ориентации мишени. Когда мишень представляет собой кристалл, ситуация меняется. Распределение по прицельным параметрам и интенсивность наблюдаемых процессов в этом случае сильно зависят от взаимной ориентации пучка частиц и мишени. Исследования взаимодействия частиц с монокристаллами дают информацию как о возникающих при этом физических эффектах, так и о строении самого кристалла.

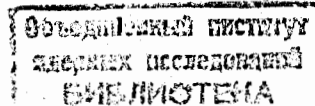
В работе^{*} показано, что при движении легких заряженных частиц вдоль кристаллографических направлений должно возникать мощное электромагнитное излучение, на несколько порядков более интенсивное, чем тормозное или синхротронное излучение. Это открывает возможность использования излучения этого типа при создании пучков гамма-квантов для ядерно-физических экспериментов. По-видимому, существует возможность создать для частиц сверхвысоких энергий детектор нового типа, чувствительный к массе частиц. Перечисленные прикладные применения предсказанного излучения, наряду с чисто теоретическим интересом, делают исследование данного эффекта достаточно актуальной задачей.

К моменту предложения нашего эксперимента излучение частиц, движущихся вдоль оси или плоскости кристалла, было только предсказано, и его экспериментальное открытие не было осуществлено. К настоящему времени проведено несколько экспериментов, в которых наблюдалось предсказанное излучение и изучались некоторые его характеристики. Однако использовалась довольно простая методика, и ряд вопросов остался недостаточно исследованным.

Цель работы - исследование излучения, возникающего при прохождении позитронов с энергией 10 ГэВ через монокристалл кремния. Сравнение характеристик излучения с предсказаниями теории, хорошо разработанной к настоящему времени.

Новизна работы: Впервые применена современная электронная методика физики высоких энергий к исследованию эффектов, возникающих при прохождении легких заряженных частиц вдоль оси и плоскости кристалла. Исследовались характеристики излучения в широком диапазоне углов падения частиц на кристалл. Это позволило впервые получить данные, показывающие динамику перехода от излучения, возникающего при движении позитронов вдоль плоскости (ПП), к когерентному тормозному излу-

*Kumakhov M.A. Phys. Lett. Ser.A. 1976, v.57, p.17.



чению. Впервые исследовались угловые распределения излучаемых гамма-квантов. Впервые показано, что в спектре излучения позитронов, движущихся вдоль плоскости (110) кристалла, имеются особенности, не предсказанные теорией.

Практическая и научная ценность. Получены новые данные, как подтверждающие принятую теоретическую модель, так и не описываемые в рамках существующих теорий. Результаты работы могут быть использованы для проверки различных теоретических моделей.

Универсальный электрон-позитронный пучок, созданный для этой работы, использовался в дальнейшем в целой серии экспериментов. В настоящее время пучок используется всеми потребителями канала №4 ИФВЭ для настройки и калибровки аппаратуры.

Дрейфовая камера низкого давления, созданная для этого эксперимента, впоследствии работала в целом ряде опытов на установке "Кристалл". Камера может быть использована в тех экспериментах, где требуется высокое угловое разрешение и малое количество вещества по пути частиц.

Программы, полученные при обработке данных, использовались в других экспериментах, проведенных на установке "Кристалл".

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при планировании и проведении экспериментов на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ и т.д.

Апробация и публикации. Основные результаты диссертации докладывались на конференции в Лионе (1980г.) и опубликованы в работах ^{1-6/}.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 107 страниц, включая 48 рисунков, таблицу и библиографический список литературы из 79 наименований.

Автор защищает:

1. Расчет основных характеристик исследуемого излучения. Определены требования к создаваемому спектрометру.
2. Создание универсального электрон-позитронного пучка на канале №4 ИФВЭ и исследование его характеристик.
3. Создание дрейфовой камеры низкого давления. Результаты испытания камеры и исследования ее характеристик.
4. Создание программ для обработки данных эксперимента по исследованию излучения позитронов в тонком монокристалле кремния.
5. Результаты исследования излучения, возникающего при прохождении позитронов с энергией 10 ГэВ вдоль плоскости (110) монокристалла кремния толщиной 110 мкм.
6. Результаты исследования излучения, возникающего при прохождении позитронов с энергией 10 ГэВ вдоль направления осей <111> монокристалла кремния толщиной 110 мкм.

Во введении рассматриваются основные теоретические представления, лежащие в основе экспериментов по исследованию электромагнитного излучения, возникающего при прохождении легких заряженных частиц через монокристаллы. Дается краткий обзор экспериментов по исследованию данного излучения. Приводятся основные экспериментальные результаты.

Вследствие эффекта Доплера энергия гамма-кванта, наблюдаемого при переходе между уровнями в потенциальной яме, образованной цепочкой или плоскостью атомов кристалла, не совпадает с разностью энергий этих уровней. Поэтому максимум спектральной плотности излучения релятивистских частиц сдвигается в область рентгеновских и жестких гамма-квантов. Мощность излучения в той области частот, где оно существует, оказывается очень большой.

Впервые эффект наблюдался группой Мирошниченко И.И. в СЛАК в 1979г. Авторами исследовалось излучение позитронов с энергией от 4 до 14 ГэВ в монокристалле алмаза толщиной 80 мкм. Проведен ряд экспериментов, в которых исследовалось излучение частиц низкой и средней энергий. Все эти эксперименты выполнены с применением простых и во многом ограниченных методик, и поэтому, хотя и являются достаточно интересными, не дают ответа на многие вопросы, решение которых возможно в экспериментах на современных установках с частицами высоких энергий. В 1981г. в ЦЕРНе был проведен эксперимент на пучках электронов и позитронов с энергиями 5-55 ГэВ. Авторами создана установка, аналогичная описываемой в диссертации. Исследовались спектрально-угловые характеристики излучения электронов и позитронов в тонком кристалле кремния. Авторы подтверждают некоторые результаты, опубликованные нами как ранее, так и в последнее время, и являющиеся частью диссертации. Несомненным достоинством эксперимента, выполненного в ЦЕРНе, является исследование эффекта в широком диапазоне энергий частиц. Однако авторам не удалось получить достаточного углового разрешения установки, что делает их результаты недостаточно надежными и полными. В первой главе описываются основные идеи и критерии, использованные при проектировании установки, а также наиболее важные узлы и блоки созданного спектрометра.

Для получения спектра излучения без искажений, связанных с излучением двух и более гамма-квантов одной частицей, необходимо толщину кристалла выбрать такой, чтобы вероятность одновременного излучения нескольких гамма-квантов была мала. Показано, что для исследуемого излучения

¹Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.2, с.789.

²Atkinson M. et al. Phys. Lett., 1982, 110B, p.162.

дования излучения, возникающего при движении позитронов вдоль основных кристаллографических направлений в кремнии, наиболее подходят кристаллы толщиной около 100 мкм. Для того, чтобы фоновое излучение от вещества установки не искажало исследуемые спектры, количество вещества на пути частиц должно быть ограничено величиной порядка 0,001 радиационных длин.

Произведен расчет вероятности захвата частиц на определенные уровни поперечного движения в кристалле. Рассмотрено влияние углового разрешения установки на возможность выборочного заселения уровней. Показано, что целесообразно получить разрешение установки по углу входа около 5 мкрад. Приводятся данные, характеризующие ожидаемые в эксперименте фоновые условия. В этой части диссертации изображены наиболее важные принципы, соблюдение которых необходимо для проведения эксперимента.

Эксперимент проведен на протонном синхротроне ИФВЭ (г.Серпухов). Пучок позитронов и электронов создан специально для данного эксперимента. Генерация гамма-квантов (от распада π^0 -мезонов) осуществляется внутренним протонным пучком, ускоренным до энергии 70 ГэВ, на одной из мишеней, установленных в 27 блоке ускорителя. Схема формирования пучка представлена на рис.1. Угол вылета гамма-квантов, попадающих на конвертор (К), составляет около 46 мрад по отношению к внутреннему пучку ускорителя. Такой большой угол ограничивает энергию частиц, получаемых в канале величиной около 15 ГэВ.

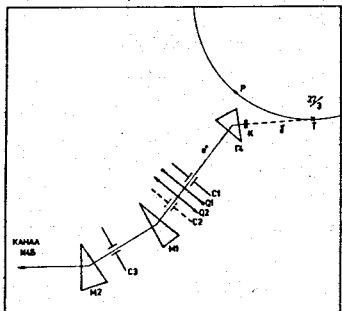


Рис.1. Схема формирования пучка. Т- мишень, К- конвертор, Г4- корректирующий магнит, С1 - С4- коллиматоры, М1 - М3- отклоняющие магниты, Q1 - Q4- магнитные линзы.

Характеристики пучка исследовались с помощью аппаратуры, входящей в состав установки "Кристалл". При сбросе на мишень 7×10^{11} протонов за цикл интенсивность позитронного пучка на экспериментальной установке составляет 6×10^4 частиц с энергией 10 ГэВ. Характеристики

полученного пучка хорошо согласуются с расчетом и удовлетворяют условиям проведения эксперимента^ж.

Схема установки приведена на рис.2^{жж}. Пучок позитронов падает на

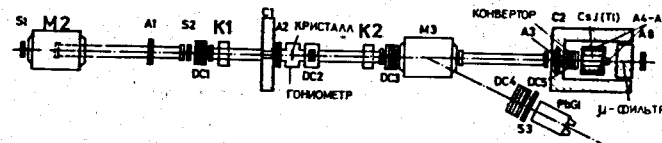


Рис.2. Схема установки "Кристалл". S1, S2, S3 - сцинтилляционные счетчики, PbG1 - черенковский счетчик полного поглощения, C1 - C2 - коллиматоры, M2 - M3 - магниты, K1 - K2 - корректоры.

мишень, расположенную в дистанционно управляемом гониометре. Для определения траектории частиц до и после мишени используются дрейфовые камеры, сгруппированные в трех блоках. Суммарная координатная точность блока обычных камер составляет около 50 мкм, а DC2 - около 90 мкм. Такие точности обеспечивают на базе 17 м разрешение по углу входа около 6 мкрад, а по углу выхода на базе 10 м - около 30 мкрад, с учетом рассеяния в DC2. Четвертый блок дрейфовых камер используется для определения траектории частиц после анализирующего магнита.

Энергия гамма-квантов, испущенных в мишени, определяется с помощью детектора на основе кристалла CsJ(Tl), окруженного свинцовой защитой и системой счетчиков антисовпадения. Свинцовая защита имеет коллиматор с апертурой 80x80 мм². В рабочих условиях для гамма-квантов с энергией 100 МэВ детектор имеет разрешение около 3% (ширина на половине высоты распределения).

Углы вылета гамма-квантов определяются с помощью блока дрейфовых камер со встроенным конвертором, расположенного непосредственно перед радиатором гамма-спектрометра. Совместно с камерами DC1 и DC2 прибор обеспечивает измерение углов вылета гамма-квантов с точностью около 4 мкрад.

Для идентификации вторичных частиц используется черенковский счетчик полного поглощения на основе свинцового стекла PbG1.

Для уменьшения уровня фона по возможности снижена толщина сцинтилляционных счетчиков и майларовых окон вакуумпровода. Использование магнита K1 с углом отклонения 3 мрад и K2 - 5 мрад позволило направить пучок таким образом, что в апертуру гамма-спектрометра попа-

^жМайшеев В.А. и др. ИФВЭ, 75-116, Серпухов, 1975.

^{жж}Водопоьянов А.С. и др. ОИЯИ, Р1-82-547, Дубна, 1982.

дают гамма-кванты, образовавшиеся только в мишени или в веществе ДС2. Суммарное количество вещества, дающего фон в гамма-спектрометре, составляет около 5×10^{-4} радиационных длин.

В качестве мишеней в эксперименте использовались бездислокационные монокристаллы кремния (число дислокаций не превышало 10 см^{-2}). Кристаллы вырезаны с точностью около 0,2 градуса и выполнены в виде дисков толщиной 0,5 мм и более. Для получения тонких образцов центральная часть кристалла вытравливалась до нужной толщины.

Триггер для запуска установки вырабатывался при наличии сигналов со счетчиков S1, S2, S3 и отсутствии сигналов со счетчиков антисовпадения A1, A2, A3. Счетчики A1 и A2 имеют отверстия диаметром 10 см и 8 мм соответственно и предназначены для отбора частиц из центральной части пучка. Рабочие запуски установки предназначены для накопления информации об исследуемом эффекте и дополнительной информации, необходимой для нормировки данных. Для контроля за работой установки и калибровки гамма-спектрометра были задействованы вспомогательные запуски.

Во второй главе описана конструкция дрейфовой камеры низкого давления и результаты исследования её характеристик. Обсуждаются вопросы работы камеры в экспериментальной установке.

Надежность данных, получаемых на установке "Кристалл", в большой степени зависела от уровня фона тормозного излучения и величины многократного рассеяния в блоке ДС2, ограничивающего угловое разрешение спектрометра. Уменьшение количества вещества в камере произведено за счет снижения рабочего давления в камере, вынесения с пути частиц всех сигнальных и формирующих поле электродов, уменьшения толщины входных майларовых окон.

Камера смонтирована в вакуумопровод установки (рис.3), и её газовый объем ограничивается майларовыми окнами толщиной по 12 мкм.

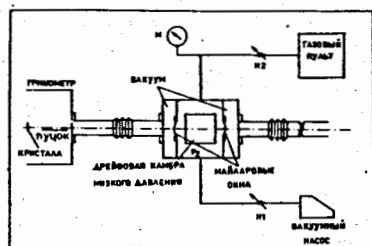


Рис.3. Размещение ДС2 в установке и схема газового продува камеры. П1, П2 - нагреватели, М - манометр, Р2 - газовый объем камеры.

Конфигурация размещения проволочек выбрана с помощью моделирования в электростатической ванне. Конструкция камеры, как видно из рис.4, устраняет лево-правую неоднозначность в определении координат частиц.

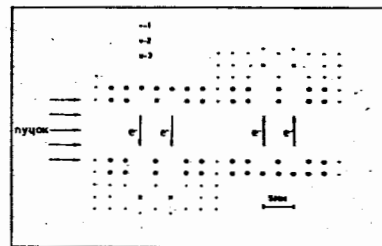


Рис.4. Схема расположения проволочек в камере. 1 - заземленные проволочки, 2 - потенциальные проволочки, формирующие дрейфовое поле, 3 - сигнальные проволочки.

Рабочая область камеры имеет размеры $10 \times 10 \text{ см}^2$, в соответствии с размерами исследуемых кристаллов. Все электроды выполнены на основе стеклотекстолитовых рамок, внутреннее окно которых увеличено до размера $80 \times 80 \text{ см}^2$ для уменьшения фона тормозных гамма-квантов, возникающих в веществе рамок.

Стендовые испытания камеры проведены с помощью β -источника (Ru^{106}). На рис.5 показаны зависимости эффективности регистрации частиц от анодного напряжения для различных давлений в камере. Напряжение на катоде выбиралось, как и для обычных дрейфовых камер, из условия $E/P \sim 2 \text{ в/см Тор}$. В качестве рабочей была выбрана смесь с концентрацией метилала 10%. В диссертации рассматриваются причины увеличения метилала в смеси.

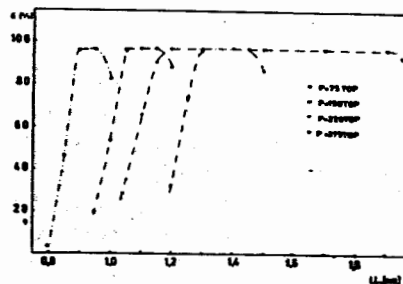
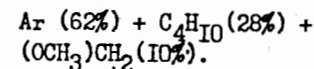


Рис.5. Зависимость эффективности камеры от анодного напряжения для различных рабочих давлений. Газовая смесь:



Исследовалась зависимость времени дрейфа электронов первичной ионизации от места прохождения частицы через ДС2. Применялись лдней-

ная и квадратичная аппроксимации координаты в ДС2 в зависимости от времени дрейфа. В случае квадратичной аппроксимации точность оказывается выше примерно на 10%. Стандартные отклонения для распределений, характеризующих отклонение координат, измеренных ДС2 от трека, составляет 120 и 90 мкм, для рабочих давлений 150 и 250 Тор.

Создание дрейфовой камеры низкого давления позволило уменьшить количество фонового вещества на пути частиц до величины 5×10^{-4} радиационных длин, что дало возможность выполнять исследования излучения в тонких монокристаллах.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы создания программ для обработки информации.

Первым этапом обработки является предварительная геометрическая реконструкция событий для подбора констант дрейфовых камер. В результате подбора констант выдается таблица для работы программы ДСТ, записывающей ленту суммарных данных (ЛСД).

Программа ДСТ производит геометрическую реконструкцию событий, отбирает массив данных, которые необходимо переписать на ЛСД, производит упаковку отобранных данных в рекорды и записывает эти рекорды на ЛСД. В результате работы программы ДСТ информация записывается на ЛСД, уплотняясь примерно в 10 раз.

Для обработки ЛСД была создана программа, которая осуществляет ввод необходимых констант, заказ гистограмм, считывание информации с ЛСД и ее распаковку по событиям, декодировку параметров каждого события, обработку данных и их ввод на различные периферийные устройства ЭВМ. Программа разделена на два уровня. Первый уровень предназначен для работы пользователя и позволяет производить изменение начальных данных и констант установки. Второй уровень предназначен для работы служебных программ, и доступ пользователя на этот уровень закрыт.

В диссертации обсуждаются эффекты, приводящие к ухудшению углового разрешения установки. Разработана программа, которая производит коррекцию, учитывающие эти эффекты, что позволяет приблизить реальное угловое разрешение к предельному разрешению установки (5 мкрад). Разрешение спектрометра оценивается на уровне 10^{-2} мкрад.

Разработана программа, которая производит реконструкцию энергии гамма-кванта по измерениям трех АПЧ с учетом особенностей каждого канала.

Специальная программа производит проверку рабочих событий на соответствие геометрическим параметрам установки.

В четвертой главе рассматривается процедура отбора данных для окончательной обработки, описываются полученные результаты, прово-

дится их обсуждение и сравнение с некоторыми теоретическими предсказаниями.

Для того, чтобы определить спектральную плотность и вероятность излучения, необходимо знать число излученных гамма-квантов для выбранного диапазона энергии и угла входа позитронов в кристалл. Необходимо учитывать угловое распределение падающего пучка и полное число прошедших через установку позитронов. Кроме того, необходимо принять во внимание различные аппаратные и физические эффекты, которые вводятся в виде поправок к числу излучаемых гамма-квантов и к числу пучковых частиц. Систематическая ошибка в нормировке данных зависит, в конечном счете, от точности определения поправок.

При обработке производился отбор событий, который позволял уменьшить число фоновых и случайных запусков спектрометра. Если требования отбора событий удовлетворялись, производилась обработка данного события и накопление информации в гистограммы.

Производилась проверка влияния критериев отбора событий на абсолютную величину эффекта. Найдено, что при 40%-ом изменении основных критериев отбора, абсолютная величина эффекта изменялась на 1,5-2% (в области гамма-квантов с энергией 60 МэВ). В области более мягких гамма-квантов (30 МэВ) изменение величины эффекта более значительно - около 8%. Для гамма-квантов с энергией выше 100 МэВ изменение в величине эффекта не превышает 1%.

Систематическая ошибка в нормировке данных оценивается на уровне 10% и определяется, в основном, неконтролируемыми изменениями эффективности гамма-спектрометра. Измеренная величина спектральной плотности излучения для алюминиевой мишени составляет $0,115 \pm 0,01 \text{ см}^{-1}$, что находится в удовлетворительном согласии с расчетом.

На рис.6 представлена зависимость числа излучаемых гамма-квантов от угла входа позитронов в кристалл. В пересчете на кристалл толщиной 1 см в максимуме излучается около 8 гамма-квантов. В диссертации

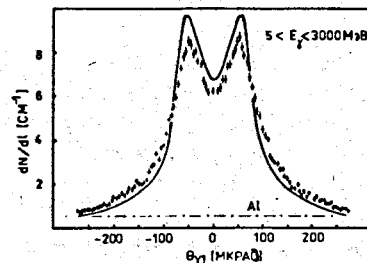


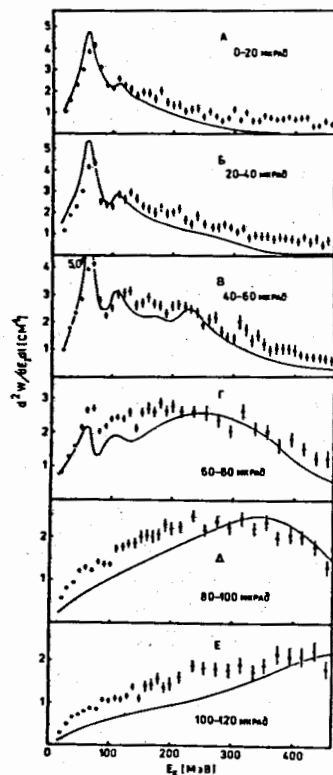
Рис.6. Зависимость числа излучаемых гамма-квантов от угла входа позитронов в кристалл. Отобраны частицы, излучившие гамма-квант с энергией в диапазоне 5-3000 МэВ. Штрих-пунктиром отмечено распределение, полученное для алюминиевой мишени.

показано, что за смещение максимума вероятности излучения относительно направления плоскости ответственны как гамма-кванты, излучаемые при каналировании, так и гамма-кванты с энергией 120-300 МэВ, связанные с излучением надбарьерных частиц. Сплошной линией на рис.6 показан результат расчета. При вычислении учитывалось разрешение экспериментальной аппаратуры, возможность излучения двух гамма-квантов одним позитроном и излучение надбарьерных частиц. Результат расчета дает хорошее совпадение с экспериментальными данными.

На рис.7 представлены зависимости спектральной плотности излучения от энергии гамма-квантов для частиц, имеющих различные углы входа в кристалл. Ряд зависимостей на рис.7 показывает динамику перехода от излучения при движении вдоль плоскости (А), (Б) к излучению в переходной области углов (В), (Г) и к когерентному тормозному излучению (КТИ). Для распределения на рис.7Г спектральная плотность излучения в области максимума (60 МэВ) в 43 раза превосходит спектральную плотность излучения в аморфной мишени эквивалентной толщины. Сплошные кривые на рис.7 показывают результаты расчета. В диссертации приводится качественный анализ возможных причин отличия экспериментальных данных от теоретических кривых как в области излучения частиц, движущихся вдоль направления плоскости кристалла, так и для надбарьерных частиц.

На рис.8 (кривая А) изображена низкоэнергетическая часть зависимости спектральной плотности излучения от энергии. Из этого рисунка следует, что в спектре для данного углового диапазона существует пик для гамма-квантов с энергией около 30 МэВ.

Рис.7. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов. Распределения построены для позитронов, имеющих углы входа в различных интервалах. Границы интервалов указаны на каждом графике.



Исследования показали, что для других углов входа этот пик не наблюдается (рис.8 кривая Б). Сравнение с формой спектра фонового излучения показывает, что данный пик не может быть обусловлен фоном (рис.8 кривая В). В рамках развитой теории излучения в монокристаллах никаких особенностей в спектре при энергии 30 МэВ не предсказывается. В настоящее время предприняты попытки определения природы этого пика. Так, например, в работе² показано, что особенности в спектре могут возникать из-за взаимодействия излучения с фонами кристалла. Однако для проверки этого предложения необходимы дополнительные исследования.

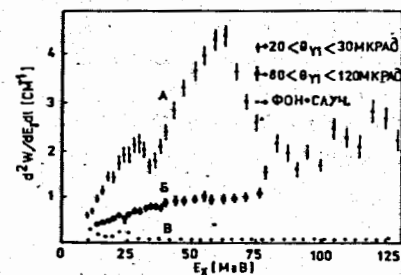


Рис.8. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов. Отобраны частицы, попадающие в интервал углов входа 20-30 мкрад (А) и 80-120 мкрад (Б). Кривая (В) изображает спектр фона. Фон включает в себя излучение от вещества установки и запуски от случайных совпадений с шумовыми сигналами спектрометрического тракта.

В диссертации представлены результаты исследования угловых распределений излучаемых гамма-квантов. На рис.9 изображены распределения углов вылета гамма-квантов относительно плоскости кристалла для частиц, имеющих угол входа в диапазоне 0-40 мкрад. Обсуждается причина того, что распределение на рис.9Б имеет наименьшую ширину.

В пятой главе приводятся результаты исследования излучения позитронов с энергией 10 ГэВ в монокристалле кремния при их движении под малыми углами к кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$.

На рис.10 изображено распределение, характеризующее вероятность излучения гамма-квантов с энергией в диапазоне 5-200 МэВ в зависимости от угла входа позитронов в кристалл. Видно увеличение вероятности излучения для частиц, входящих в кристалл в направлении, близком к оси $\langle 111 \rangle$, плоскостям (110) и (112).

Зависимость числа излучаемых гамма-квантов от полярного угла входа позитронов в кристалл представлена на рис.11. Максимум вероятности излучения достигается на границе области осевого каналирования

²Болдышев В.Ф. Укр. ФЖ, 1983, т.27, с.1482.

и составляет около 19 гамма-квантов на 1 см кристалла (для указанного диапазона энергии).

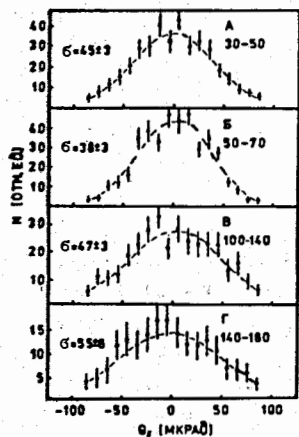


Рис.9. Распределение углов вылета гамма-квантов из кристалла, для позитронов с углом входа в диапазоне 0-40 мкрад. Распределения построены для гамма-квантов в различных энергетических диапазонах, границы которых указаны в углу каждого графика (в МэВ). Пунктиром проведены фиты экспериментальных данных распределением Гаусса. В левом углу каждого графика указаны стандартные отклонения для приведенных фитов.

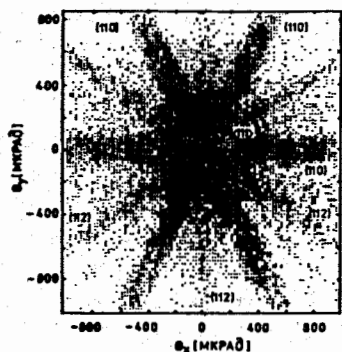


Рис.10. Распределение числа излучаемых гамма-квантов в зависимости от угла входа позитронов в кристалл.

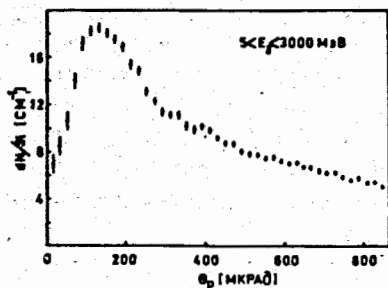


Рис.11. Зависимость числа излучаемых гамма-квантов от полярного угла входа позитронов в кристалл. Полярный угол отсчитывается от направления оси кристалла.

На рис.12 представлена зависимость спектральной плотности излучения от энергии гамма-квантов для событий с полярным углом входа в кристалл менее 80 мкрад. Распределение хорошо согласуется с результатом численного моделирования (штриховая кривая).

Сравнительно большая апертура установки позволила получить данные об излучении для позитронов в широком диапазоне углов входа в кристалл. Делаются выводы о влиянии оси и плоскостей кристалла на характеристики излучения.

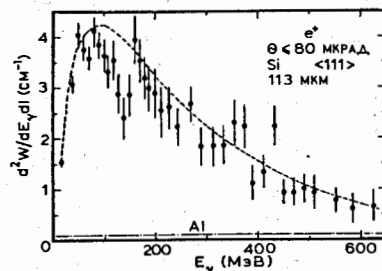


Рис.12. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов для позитронов, движущихся вдоль оси кристалла.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Получены данные, характеризующие прохождение позитронов высокой энергии через монокристалл кремния и возникающее при этом излучение.

Показано, что при движении позитронов вдоль плоскости кристалла спектральная плотность излучения в 37 ± 1 раз превосходит соответствующую величину для аморфной мишени, при движении частиц вдоль оси превышение составляет 35 ± 1 раз.

2. Исследовалось излучение позитронов в широком диапазоне углов входа относительно плоскости кристалла, что позволило впервые получить данные, показывающие динамику перехода от излучения частиц, движущихся вдоль плоскости кристалла к КТИ.

3. Впервые исследовались угловые характеристики гамма-квантов, излучаемых в кристалле. Показано, что гамма-кванты, излучаемые позитронами, движущимися вдоль плоскости (110) кристалла, имеет наиболее узкое угловое распределение.

4. При углах входа позитронов в кристалл в диапазоне 20-30 мкрад, относительно плоскости (110), в спектре гамма-квантов наблюдается пик (с энергией 30 МэВ), не предсказанный теорией.

5. Приводятся характеристики излучения для широкой области углов вокруг оси кристалла.

6. Получены данные, характеризующие суммарные потери энергии на

излучение при движении позитронов вблизи оси и плоскости кристалла. Движущиеся вдоль кристаллографической плоскости позитроны теряют на излучение до 3 ГэВ (в пересчете на 1 см кристалла). Максимум потерь энергии достигается при углах входа около $1,5\theta_K$. При движении позитронов вблизи оси кристалла потери достигают 5 ГэВ/см для полярных углов входа также около $1,5\theta_K$.

7. Произведен расчет характеристик излучения позитронов, движущихся вдоль плоскости (110) кристалла. Расчет учитывает параметры установки "Кристалл" и сопутствующие процессы. Сравнение расчетных кривых с экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласие. Однако наблюдаются также некоторые систематические отличия. Эти отличия указывают на необходимость учета более тонких эффектов.

8. Рассчитаны основные характеристики исследуемого излучения. На основе полученных данных определены требования к установке "Кристалл".

9. Спроектирована и изготовлена дрейфовая камера низкого давления, позволившая значительно снизить фон тормозных гамма-квантов и улучшить угловое разрешение установки. Применение дрейфовой камеры низкого давления явилось важным фактором, определившим надежность полученных данных.

10. Создан универсальный электрон-позитронный канал с характеристиками, удовлетворяющими условиям проведения эксперимента. Пучок также используется всеми потребителями канала №4 ИФВЭ для калибровки аппаратуры.

11. Создан комплекс программ для обработки экспериментальных данных. С помощью этих программ производилось накопление данных в гistogramмы, сортировка отобранных данных, коррекция нестабильностей установки, нормировка данных, вычитание фона и представление результатов в наиболее наглядной форме.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Войтковска И.,..., Тяпкин И.А. и др. ОИЯИ, Р13-81-374, Дубна, 1981; Nucl. Instr. and Meth., v.251, Nov.1,2, p.135-140.
2. Бавижев М.А.,..., Тяпкин И.А. и др. ИФВЭ, 82-74, ОП, Серпухов, 1980.
3. Головаткич В.М.,..., Тяпкин И.А. и др. ОИЯИ, Д1-81-592, Дубна, 1981; Phys. Rev. Lett., 1982, v.48, N.7, p.488-492. Nucl. Instr. and Meth., 1982, v.192, No.1/3, p.239-241.
4. Булгаков Н.К.,..., Тяпкин И.А. и др. ОИЯИ, I-83-621, Дубна, 1983.
5. Булгаков Н.К.,..., Тяпкин И.А. и др. ОИЯИ, I-83-603, Дубна, 1983.
6. Булгаков Н.К.,..., Тяпкин И.А. и др. ОИЯИ, I-83-731, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 января 1984 года.