



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.1.03

H 602

1-87-725

НИГМАНОВ
Тургун Сабитович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

ПОДГОРЕЦКИЙ
Михаил Исаакович

доктор физико-математических наук,
профессор

МИРОШНИЧЕНКО
Иван Иванович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

БЕЛУСОВ
Анатолий Семенович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт атомной энергии имени И.В.Курчатова, г.Москва

Защита диссертации состоится "___" _____ 1987 года
в "___" 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 ЛВЭ ОИЯИ

Автореферат разослан "___" _____ 1987 г.

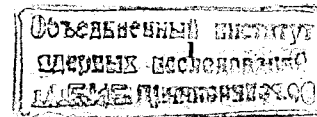
Ученый секретарь
Специализированного совета *М.Ф.Лихачев* М.Ф.ЛИХАЧЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В работе* показано, что при движении ультрарелятивистских электронов и позитронов вдоль кристаллографических направлений в кристалле возможны эффекты интенсивного электромагнитного излучения в рентгеновском и гамма-диапазоне. Возникающее излучение отличается от ранее известных более высокой спектральной интенсивностью. Это обстоятельство открывает возможности для создания монохроматических гамма-пучков, которые могут быть применены в прикладных целях, а также в экспериментальной физике, например, в изучении фотоядерных реакций. При сверхвысоких энергиях явление интенсивного электромагнитного излучения частиц в кристаллах может быть использовано, например, для детектирования определенного сорта частиц.

Ко времени предложения данного экспериментального исследования излучение легких частиц при каналировании было только предсказано. К настоящему времени проведено несколько экспериментов, в которых было наблюдеено предсказанное излучение. Однако уровень экспериментальных погрешностей и отсутствие систематических данных по ряду характеристик излучения не позволяют считать исследования данного вопроса завершенными. Например, экспериментальные данные по электромагнитному излучению позитронов в потенциале атомных плоскостей в интервале критического угла Линдхарда в силу недостаточного аппаратного разрешения не подтвердили ожидаемое из теории поведение вероятности излучения. Имеются расхождения теории с экспериментом

* Kuzakhov M.A. Phys.Lett.Ser.A, 1976, V.57, P.17.



в абсолютной величине интенсивности излучения. Все ранее экспериментально измеренные спектральные распределения энергии излучения позитронов приблизительно в два раза ниже теоретических. Экспериментальные исследования излучения электронов выполнены в условиях, когда эффект искажался многократным рассеянием вследствие применения большой толщины кристалла и отбором исследуемых фотонов в малом угловом интервале, сравнимом с характерными углами излучения. Остались практически неисследованными вопросы об угловом распределении электромагнитного излучения. Имеющиеся экспериментальные данные не освещают вопросы сходства и отличия известного когерентного тормозного излучения и излучения при каналировании.

Цель работы. Исследование электромагнитного излучения, возникающего при прохождении позитронов и электронов с энергиями 10 ГэВ вдоль кристаллографических направлений в тонких монокристаллах кремния. Сравнение излучения при каналировании с когерентным тормозным излучением.

Новизна работ. Создана экспериментальная установка для исследования эффектов электромагнитного излучения легких заряженных частиц в тонких кристаллах, обладающая рекордным угловым разрешением и минимальным уровнем фона. Примененная экспериментальная методика позволила впервые выполнить более точные и систематические исследования характеристик излучения электронов и позитронов в интервале входных углов в кристалл, не превышающих критический угол Линдхарда. Впервые получены экспериментальные данные, освещающие сходства и отличия спектральных распределений двух типов излучений — излучения частиц в режиме плоскостного каналирования и известного когерентного тормозного излучения. Впервые исследовались угловые распределения излучаемых гамма-квантов электронами и позитронами в потенциале атомной плоскости кристалла. Впервые получены экспериментальные данные по многократному рассеянию частиц, движение которых в кристалле сопровождалось электромагнитным излучением. Впервые показано, что в спектре излучения позитронов, движущихся вдоль плоскости (110) кристалла, имеется дополнительный максимум, не предсказанный теорией. Впервые в одном экспериментальном исследовании в идентичных условиях выполнены измерения различных характеристик электромагнитного излучения электронов и позитронов в кристалле.

Практическая и научная ценность. Полученные в настоящей работе результаты:

а) использованы для проверки ряда теоретических расчетов;

б) сыграли определенную стимулирующую роль в улучшении углового разрешения экспериментальной установки в ЦЕРН;

в) стимулировали экспериментальные и теоретические исследования дополнительного максимума в излучении позитронов в потенциале атомной плоскости кристалла.

Результаты исследований могут быть применены для создания обобщающей теории электромагнитного излучения частиц в кристаллах, для сравнения с будущими теоретическими расчетами и для планирования и проведения будущих экспериментов на ускорителях.

Полученные результаты позволят корректным образом оценить возможности применения электромагнитного излучения, возникающего при движении электронов и позитронов в кристалле, в прикладных исследованиях.

Апробация и публикации. Результаты диссертации по части излучения позитронов в плоскостном канале были представлены на IX Международной конференции по атомным взаимодействиям в твердых телах в Лионе (Франция, 1981 г.). Основные результаты опубликованы в работах/1-24/.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Работа содержит 215 страниц, включая 80 рисунков, 3 таблицы и библиографический список литературы из 135 наименований.

Автор защищает:

1. Разработку и создание экспериментальной установки для исследований электромагнитного излучения электронов и позитронов высоких энергий в тонких кристаллах, которая обеспечила:

- наилучшую на сегодняшний день точность определения угла входа частицы в кристалл, около 6 мкрад;
- минимальный уровень фона тормозного излучения на веществе аппаратуры;
- регистрацию гамма-квантов (с вероятностью, практически равной единице) с энергиями в интервале от 5 МэВ до 3 ГэВ и с энергетическим разрешением не хуже 3% при 100 МэВ;
- выполнение абсолютных измерений (на одну первичную частицу) характеристик электромагнитного излучения частиц в тонких кристаллах кремния с погрешностью около 10%;
- измерение вертикальных проекций углов вылета гамма-квантов с точностью около 4 мкрад.

2. Организацию обработки данных и создание ряда программ для анализа экспериментального материала по исследованию излучения электронов и позитронов в тонких кристаллах кремния.

3. Результаты исследований ориентационных зависимостей вероятности, спектральной плотности и полных потерь энергии на электромагнитное излучение электронами и позитронами с энергиями 10 ГэВ в потенциале плоскости (110) в тонких кристаллах кремния. Данные систематическим образом, с наилучшей угловой точностью освещают основные характеристики излучения каналированных и квазиканализированных частиц. Имеется наилучшее по сравнению с результатами других экспериментов согласие по абсолютной величине экспериментальных распределений с теоретическими расчетами.

4. Экспериментальные данные по многократному рассеянию позитронов в зависимости от входного угла в плоскость (110) кристалла кремния и по углам вылета гамма-квантов в зависимости от их энергии, излученных электронами и позитронами в потенциале (110) кристалла кремния.

5. Результаты экспериментального исследования характеристик электромагнитного излучения электронов и позитронов с энергиями 10 ГэВ в потенциале оси <111> в тонких кристаллах кремния, которые заключаются в следующем. Получены систематические и более точные данные по ориентационным зависимостям вероятностей, спектральной плотности и полных потерь энергии на излучение.

6. Полученные данные по многократному рассеянию электронов в зависимости от полярного угла входа в ось <111> кремния и по углам выходов гамма-квантов в зависимости от их энергии, излученных электронами в потенциале оси <111> кристалла кремния.

7. Результаты исследований когерентного тормозного излучения электронов и позитронов с энергиями 10 ГэВ в потенциале кристаллической плоскости (110) в кремнии. Измеренные ориентационные зависимости вероятностей излучения позитронов и электронов в широком интервале входных углов освещают вопросы сходства и отличия излучения при каналировании и когерентного тормозного излучения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ по исследованиям электромагнитного излучения электронов и позитронов высоких энергий, направленных под малыми углами к кристаллографическим осям и плоскостям монокристаллов.

Теоретические работы^{*} указывают на существование интенсивного электромагнитного излучения частиц в кристаллах. Величина интенсивности излучения принимает максимальное значение при условии каналирования.

Первые экспериментальные исследования излучения каналированных частиц высоких энергий выполнены в СЛАК^{***}. Полученные данные подтвердили высокую интенсивность излучения позитронов в плоскостном и в осевом каналах кристалла алмаза. Однако последовавшие теоретические работы по численному сравнению теории с экспериментом показали приблизительно двухкратное превышение расчетных кривых над экспериментальными точками.

Эксперименты по исследованию излучения электронов и позитронов в кристаллах кремния выполнены также в ЦЕРН^{***}. В первой работе^{***} угловое разрешение аппаратуры не позволило однозначно выделить события в критическом угле каналирования. Измерения, выполненные с несколько лучшим угловым разрешением, опубликованы позднее во второй работе^{***}.

В величине максимума спектральной плотности излучения от ожидаемой из теории. Недостаточно освещенным в данном эксперименте оказался вопрос об излучении электронов.

Исследования излучения в кристаллах были выполнены также и при средних энергиях частиц^{***}. В работах этих групп получены результаты, свидетельствующие о высокой интенсивности излучения частиц в потенциалах кристаллической оси и плоскости по сравнению с излучением в аморфной мишени. Однако измерения выполнены при таких условиях (достаточно толстые кристаллические образцы, угловой разброс пучка равен величине критического угла каналирования и (или) при

*Кумахов М.А. ДАН СССР, 1976, Т.230, С.1077-1080.

Ахизер А.И. и др. Препринт ХФТИ, 77-38, Харьков, 1977.

Baier V.N. et al. Phys.Lett., 1979, V.73A, P.414.

***Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, Т.29, С.786-790.

Авакян Р.О. и др. ЖЭТФ, 1982, Т.82, В.6, С.1825.

***Atkinson P.O. et al. Phys.Lett., 1982, V.110B, P.162.

Bak J. et al. Nucl. Phys., 1985, V.B254, P.491.

***Аганьянц А.О. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, Т.29, В.9, С.554.

Воробьев С.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, Т.29, В.7, С.414.

Ганенко В.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1980, Т.32, В.6, С.397.

ограниченных апертурах детекторов), которые не позволяют выполнить адекватные численные сравнения полученных результатов с теорией.

Во второй главе диссертации описывается постановка эксперимента по исследованию излучения электронов и позитронов в тонких кристаллах. Эксперимент проведен на протонном синхротроне Института физики высоких энергий (ИФВЭ, г.Серпухов). Пучки электронов и позитронов созданы специально для данного эксперимента /1/.

Схема экспериментальной установки /2,3/ приведена на рис.1. Пучок электронов (позитронов) падал на монокристаллическую мишень, размещенную в дистанционно управляемом гониометре. Для определения траектории частицы до и после мишени использовалась система дрейфовых камер, сгруппированных в трех блоках. Четвертый блок дрейфовых камер служил для определения траектории частицы после анализирующего магнита. Гамма-кванты, испускаемые в мишени, регистрировались детектором на основе сцинтиллирующего кристалла $CsJ(Tl)$, окруженного свинцовой защитой и системой счетчиков антисовпадений. Углы вылета гамма-квантов измерялись с помощью блока дрейфовых камер со встроенным конвертером, расположенного непосредственно перед радиатором гамма-спектрометра. Для идентификации вторичных электронов (позитронов) использовались ливневые черенковские счетчики из свинцового стекла. Установка запускалась системой счетчиков совпадений и антисовпадений и работала на линии с ЗЕМ ЕС-1040.

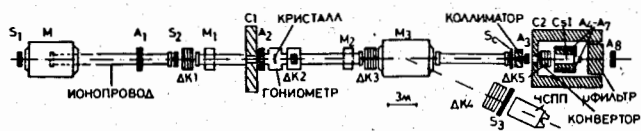


Рис.1. Схема экспериментальной установки. S1, S2, S3, A1-A8 - сцинтилляционные счетчики, ДК1-ДК5 - блоки дрейфовых камер, ЧСПП - черенковский счетчик полного поглощения с радиатором из свинцового стекла, CsJ - гамма-спектрометр на основе кристалла цезий-йод, С1, С2, - коллиматоры, М, М1, М2, М3 - отклоняющие магниты.

Одним из требований к созданию "чистых" условий измерения эффекта является применение в эксперименте тонких кристаллических пластин. При достаточно малых толщинах доля событий с однократным излучением в мишени будет преобладающей. Удовлетворяющие этим требованиям толщины кремниевых кристаллов равны для позитронных исследований примерно 100 мкм и для электронных - около 50 мкм. При указанных толщинах мишеней экспериментальная установка сможет воспроизвести истинное энергетическое распределение фотонов. Случаи с радиацией двух и более гамма-квантов в мишени, а также фоновое тормозное излучение на веществе детекторов приведут к искаженному спектральному распределению. Для уменьшения фонового тормозного излучения было минимизировано вещество сцинтилляционных счетчиков и майларовых окон ионопровода. Весь тракт пучка в установке, общая длина которого составляет ~70 м, вакуумировался. Дрейфовая камера ДК2, созданная специально для настоящего эксперимента /4,5/, работала при пониженном давлении 250 Торр, и все её проволочки располагались вне области пучка. Размещение магнитов М1 и М2 позволило резко уменьшить фоновое тормозное излучение. При этом в рабочую апертуру гамма-спектрометра попадало около 1% фона, обусловленного веществом установки ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ радиационных единиц), что оказалось вполне приемлемым.

Суммарная точность блока обычных камер (ДК1, ДК3 и ДК4) составляла около 50 мкм, точность блока дрейфовых камер низкого давления (ДК2) - 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.

Пятый блок дрейфовых камер ДК5 со встроенным конвертером служил для измерения углов вылета гамма-квантов из кристалла /6,7/. Совместно с камерами ДК1, ДК2 и ДК3 прибор обеспечивал в малой части событий (~4%) измерение проекции угла гамма-кванта в вертикальной плоскости с точностью около 4 мкрад.

Гамма-спектрометр выполнен на основе кристалла $CsJ(Tl)$, имеющего форму цилиндра с диаметром 200 мм и длиной 300 мм (в начальном варианте - диаметром 150 мм и длиной 230 мм) /8,9/. Радиатор просматривался одним фотоумножителем типа ФЭУ-49. Регистрация гамма-кванта производилась одновременно в трех диапазонах: 5+200 МэВ, 5+1000 МэВ и 5+3000 МэВ с ценой отсчета около 0,1 МэВ; 0,5 МэВ и 5 МэВ соответственно. Схема съема информации с гамма-спектрометра предусматривала также временной анализ поступающих сигналов. Использование этой информации позволило значительно уменьшить фон случайных событий. Калибровка спектрометра производилась с помощью радиоактив-

ных источников, а также по корреляции импульса вторичных частиц и отсчетов гамма-спектрометра (методом "меченых" фотонов) - см. рис.2. Неполное поглощение (около 90% энергии ливня, кривая 1) обуславливает некоторую нелинейность. Окончательный вариант радиатора позволял поглотить около 97% энергии ливня (кривая 2). Разрешение гамма-спектрометра при энергии 1 МэВ составляло 8% (полная ширина на половине высоты), при энергии 100 МэВ детектор имел разрешение не хуже 3%.

Апертура гамма-спектрометра (80 x 80 мм²) на базе 30 м обеспечивала регистрацию фотонов с углами излучения в пределах $\pm 1,2$ мрад, т.е. примерно 20 интервалов критического угла плоскостного каналирования.

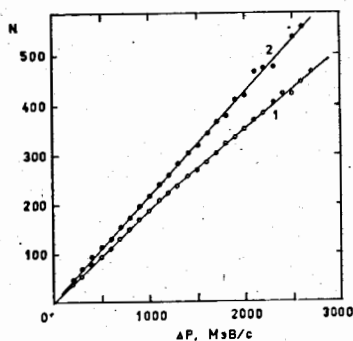


Рис.2. Калибровка гамма-спектрометра методом "меченых" фотонов. Размеры радиаторов: 1 - $\phi 150 \times 230$ мм²; 2 - $\phi 200 \times 300$ мм². По оси абсцисс отложена разность $\Delta P = P_0 - P$, где P_0 - средний импульс пучка, P - импульс вторичного электрона. По оси ординат - отсчеты гамма-спектрометра. Сплошные кривые - полиномиальное приближение.

Третья глава посвящена обработке экспериментальных данных. Обработка данных осуществлялась на ЭВМ с помощью комплекса специально разработанных программ. На первом этапе она включала определение констант дрейфовых камер, геометрическую реконструкцию событий, уплотнение информации и запись на ленту суммарных данных (ЛСД). Следующий этап представлял собой формирование критериев отбора событий, программное определение положения оси (либо плоскости) кристалла и нормировку данных.

Критерии отбора событий (см. табл.1) учитывали погрешности в калибровке детекторов и случаи просчетов, которые определялись с помощью восстановленных треков частиц. В таблице приведены также результаты, иллюстрирующие долю идентифицированных электронов (позитронов) черенковским счетчиком полного поглощения. Критерий сохранения энергии в событии представлял собой требование, чтобы

сумма энергий заряженной частицы и фотона были равны средней энергии пучка. Примененные критерии ограничивали рассматриваемый интервал электромагнитного излучения до величины 3,5 ГэВ. Для анализа данных по излучению в тонких кристаллах кремния это ограничение было вполне приемлемым.

Таблица 1
Критерии отбора событий

№	Наименование критерия	Число бракованных событ. %
1.	Антисовпадательный счетчик А2	15
2.	Дрейфовая камера ДК2	2
3.	Дрейфовая камера ДК4	10
4.	Черенковский счетчик ЧСП	1
5.	Коллиматор гамма-спектрометра	10
6.	Идентификация электрона (или e^+)	2
7.	Сохранение энергии	2

Проверка влияния критериев отбора событий на абсолютную нормировку данных (приведенных к одной первичной частице и на единицу толщины кристалла) показала, что доля случайных событий при энергии фотонов ниже 30 МэВ не превышает 8%, в области 60 МэВ - 2% и 1% при энергиях выше 100 МэВ. Систематическая ошибка в нормировке данных оценивается на уровне 10%.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования электромагнитного излучения электронов и позитронов в потенциале атомной плоскости кристалла кремния /10-17/. Полученные результаты сравниваются с теорией и с данными других экспериментов. На рис.3 приведена зависимость числа излученных гамма-квантов от угла входа позитронов в плоскость (110) кристалла кремния. Интервал энергий фотонов лежит в диапазоне 40 + 80 МэВ. Отсчет угла ведется от направления кристаллографической плоскости. Максимум в распределении приходится на угол входа примерно 50 мрад. Данное поведение вероятности согласуется с положением теории, согласно которой основной вклад в излучение дают позитроны с поперечной энергией, приблизительно равной высоте потенциального барьера. Этот режим осуществляется при углах входа вблизи критического угла Линдхарда. Данная особенность в ранних экспериментах обнаружена не была. Кривая представляет теоретический расчет*. Из рисунка видно, что эксперименталь-

* Байер В.Н. и др. Препринт ИЯФ 81-139, Новосибирск, 1981.

ные данные и расчет хорошо согласуются. В отличие от позитронов вероятность излучения гамма-квантов электронами имеет максимум при параллельном входе в атомную плоскость кристалла /16,17/.

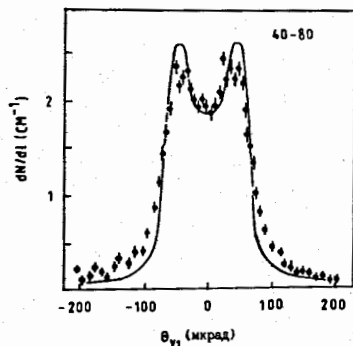


Рис.3. Распределение числа гамма-квантов, излученных позитронами с энергией 10 ГэВ, в зависимости от угла входа частиц в плоскость (110) кремния толщиной 113 мкм. Данные получены для фотонов в энергетическом диапазоне 40-80 МэВ. Сплошная кривая - теоретический расчет.

На рис.4 представлены распределения спектральной плотности электромагнитного излучения позитронов с энергиями 10 ГэВ в кристаллографической плоскости (110) кремния. Входные углы позитронов находятся в пределах критического угла плоскостного каналирования. Данные иллюстрируют отличительную особенность излучения при каналировании - частота излучения основной гармоники не зависит от угла входа частиц. Результаты эксперимента демонстрируют и другую особенность - с ростом угла входа увеличивается вклад высших гармоник, т.е. гамма-квантов, частоты которых в два и более раз больше частоты первой гармоники. Спектральная плотность излучения в максимуме принимает наибольшее значение при углах входа 30 + 40 мкрад. В этом случае превышение над уровнем излучения на аморфной мишени составляет 42 ± 1 раз (приведена статистическая погрешность). Кривые на рис.4 рассчитаны по формулам, полученным в работе* для описания излучения каналированных позитронов. Из рисунка видно, что теоретические кривые в области максимума на 15 - 20% выше экспериментальных точек. По-видимому, это связано с тем, что в расчетах не принималось во внимание перераспределение позитронов по поперечной энергии, происходящее из-за рассеяния частиц в кристалле.

На рис.5 представлены данные по спектральной плотности излучения позитронов в широком диапазоне входных углов в плоскость (110)

* Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1981, Т.80, С.608.

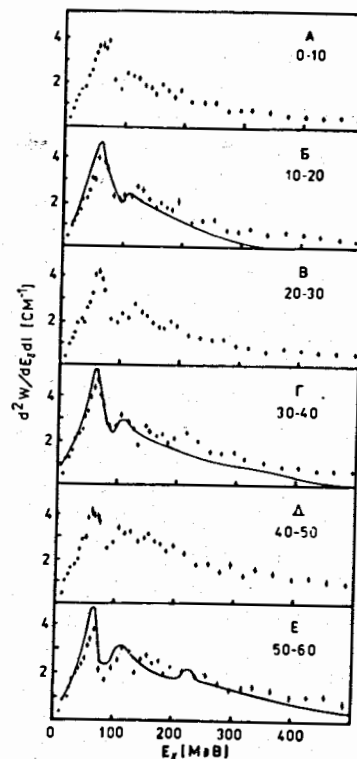


Рис.4. Спектральная плотность излучения позитронов в потенциале плоскости (110) кристалла кремния. Энергия позитронов - 10 ГэВ, толщина мишени по пучку - 113 мкм. Цифрами указаны диапазоны входных углов частиц в кристалл (мкрад). Кривые - теоретический расчет.

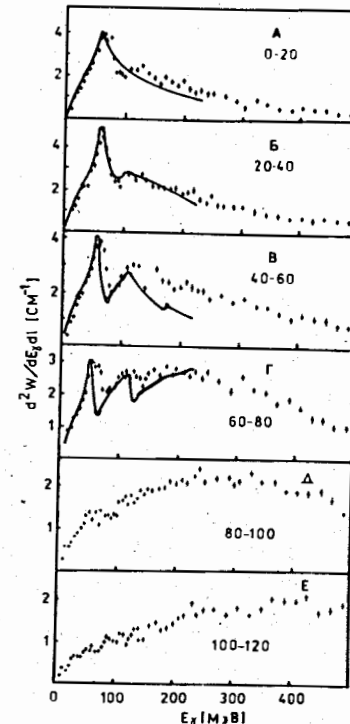


Рис.5. Спектральная плотность излучения позитронов в потенциале плоскости (110) кристалла кремния. На рисунках указаны диапазоны входных углов в кристалл (мкрад). Кривые - теоретический расчет.

кристалла. Из рисунков видно, что ярко выраженный максимум спектральной плотности излучения (при 60 МэВ) наблюдается только при входных углах частиц, не превышающих угол Линдхарда. Данные также хорошо иллюстрируют особенности излучения надбарьерных позитронов. Из рис.5 (В,Г) видно, что частота излучения надбарьерных частиц по мере увеличения входного угла смещается в более жесткую часть спектра; интенсивность с ростом угла падает. Сплошные кривые – теоретический расчет*. Данные по спектральному распределению электромагнитного излучения позитронов при определенных малых интервалах входных углов (20 + 30 мкрад) обнаруживают ранее не предсказанный максимум при энергии фотона 30 МэВ /13/.

На рис.6 представлены данные по зависимости спектральной плотности излучения электронов от энергии гамма-квантов для различных интервалов входных углов в плоскость (110) кремния. Интенсивность излучения электронов при углах входа 0 – 20 мкрад принимает максимальное значение. Превышение над уровнем излучения в аморфном веществе составляет 33 ± 2 раза. Аналогичные величины в эксперименте в ЦЕРН составили 32 раза для позитронных и 16 раз для электронных данных. Сплошные кривые – теоретический расчет из работы^{ЖЖЖ} (для кривых 1 и 2) и работы^{ЖЖЖ} (кривые 3 + 5). Значения ординат теоретических кривых умножены на коэффициенты 0,85; 0,8; 0,85; 0,85 и 1,6 соответственно. Незначительные отличия расчетных кривых от экспериментальных данных могут быть обусловлены тем, что в расчетах опущен процесс рассеяния электронов в кристалле и, вследствие этого, возможное выбывание частиц из канала.

Представлены данные по многократному рассеянию позитронов и углам излучения гамма-квантов электронами и позитронами в потенциале плоскости (110) кремния. Распределения позволяют сравнить величину рассеяния частиц, излучивших гамма-квант, со случаем рассеяния без излучения. Представленные данные по рассеянию позитронов характеризуют особенности движения каналированных и надбарьерных частиц в потенциале атомной плоскости кристалла. Из данных следует, что среднеквадратичный угол рассеяния позитрона в канале может быть в два раза больше аналогичного угла на аморфной мишени. Данные показывают отчетливую зависимость величины угла рассеяния в процессе каналирования от энергии поперечного движения частицы. Электромагнит-

* Байер В.Н. и др. Препринт ИЯФ 81-139, Новосибирск, 1981.

^{ЖЖЖ} Байер В.Н. и др. Препринт ИЯФ 84-116, Новосибирск, 1984.

^{ЖЖЖ} Khokonov M.Kh. Radiation Effects, 1984, V.80, P.93.

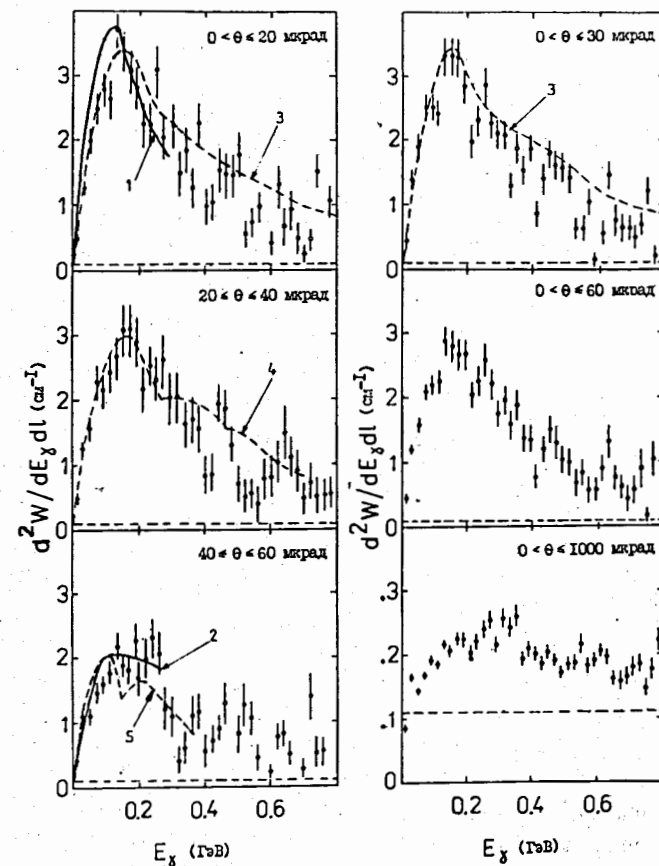


Рис.6. Распределение спектральной плотности излучения электронов с энергией 10 ГэВ в потенциале плоскости (110) кристалла кремния толщиной 41 мкм. На рисунках указаны интервалы входных углов в кристалл. Кривые – результаты теоретических расчетов. Пунктирные прямые показывают уровень спектральной плотности на аморфной мишени.

ное излучение, возникающее при каналировании электронов и позитронов в кристаллографической плоскости, как и ожидалось из теории, направлено в узком угловом конусе вперед вдоль направления плоскости кристалла. Наименее узкий угловой интервал приходится на основную частоту излучения - 38 ± 3 мкрад для позитронов и 75 ± 7 мкрад для электронов.

Пятая глава диссертации представляет результаты экспериментального исследования электромагнитного излучения электронов и позитронов с энергиями 10 ГэВ в потенциале кристаллографической оси кремния /17-20/. На рис.7 приведены зависимости числа гамма-квантов от полярного угла входа электронов относительно оси <111> кристалла кремния. Данные проинтегрированы по азимутальному углу. Поведение экспериментальных точек согласуется с положением теории, согласно которой вероятность захвата электронов в канал с последующей радиацией гамма-квантов максимальна при параллельном входе частиц относительно оси кристалла и падает до нуля при критическом угле осевого каналирования. Аналогичная зависимость для позитронов имеет максимум при полярном угле около 130 мкрад.

На рис.8 представлены результаты измерения спектральной плотности излучения электронов в потенциале оси <111> кристалла кремния. Данные приведены для двух интервалов полярных углов входа частиц в кристалл. Пунктирные кривые представляют результаты расчета*. Величина спектральной плотности излучения электронов в максимуме превышает уровень излучения в аморфной мишени в 80 ± 2 раза. Данные, полученные в широком интервале входных углов, показывают, что максимальная спектральная плотность наблюдается при параллельном входе частиц в кристалл. Увеличение входного угла не сказывается на положении максимума. Поведение спектральных плотностей излучения надбарьерных частиц от входного угла аналогично каналированным. Однако причины возникновения максимумов в спектрах излучения в них различны. При каналировании максимум обусловлен периодичностью движения электрона в канале; при надбарьерном движении - особенностями рассеяния электронов на цепочке атомов в области малых прицельных параметров**.

Спектральная плотность излучения позитронов на оси <111> менее монохроматична и смещена в область больших энергий фотонов, чем аналогичное распределение, полученное на плоскости (110). Данное поведение согласуется с расчетом*. В максимуме превышение над интен-

* Зимин Н.И. Препринт ОИЯИ I-83-729, Дубна, 1983.

** Шульга Н.Ф. и др. ЖЭТФ, 1984, Т.87, С.250.

сивностью излучения позитрона на аморфной мишени составляет 35 ± 2 раза.

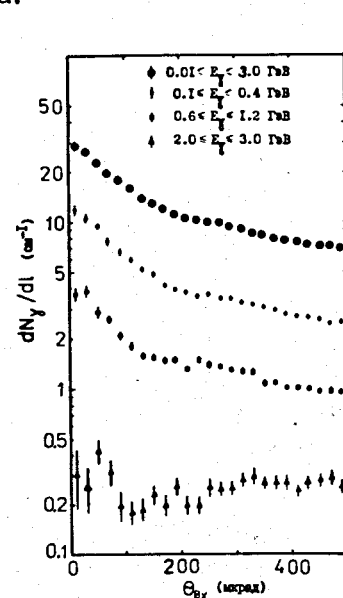


Рис.7. Распределение числа гамма-квантов, излученных электронами с энергией 10 ГэВ в потенциале атомной оси <111> кристалла кремния толщиной 41 мкм. Данные представлены в зависимости от полярного угла входа частиц в кристалл и различных диапазонов энергий фотонов.

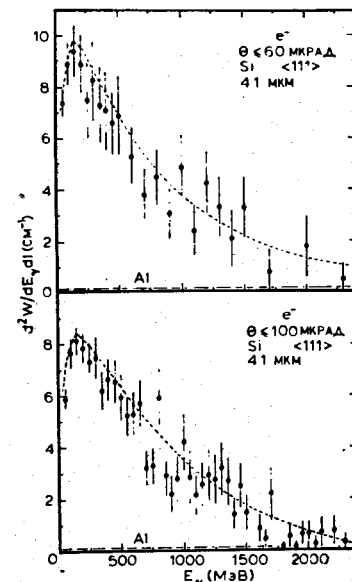


Рис.8. Спектральная плотность излучения электронов с энергией 10 ГэВ в потенциале оси <111> кристалла кремния толщиной 41 мкм. Пунктирные кривые - результаты расчетов, выполненных с помощью моделирования. Al - уровень излучения на алюминиевой мишени.

На рис.9 представлена зависимость среднеквадратичного угла рассеяния электрона от полярного угла входа в ось <111> кристалла кремния. Экспериментальные данные показывают максимум рассеяния при угле входа вблизи критического. При больших углах падения (свыше 600 мкрад) данные иллюстрируют многократное рассеяние на аморфной мишени. Поскольку доля захваченных в связанное движение электронов с ростом угла входа относительно оси кристалла падает, появление этого максимума, по-видимому, обусловлено характером движения над-

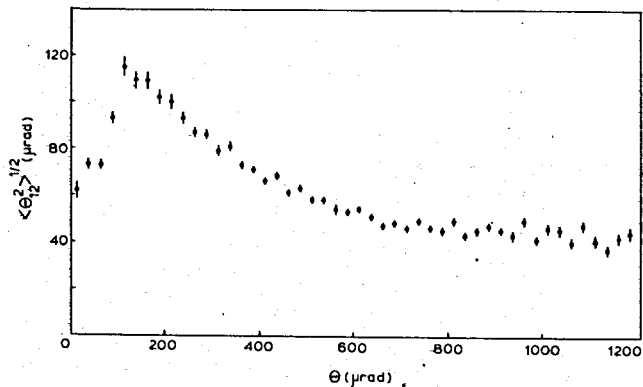


Рис.9. Зависимость среднеквадратичного угла рассеяния электронов в потенциале оси $\langle III \rangle$ кристалла кремния толщиной 4I мкм от полярного угла входа в кристалл.

барьерных частиц. В работе^ж отмечалось, что средний квадрат угла рассеяния надбарьерных частиц может значительно превысить аналогичную величину, полученную в аморфной среде. Элементарным процессом, определяющим рассеяние частицы в кристалле, в этом случае выступает рассеяние на отдельной цепочке атомов. Данная теоретическая модель хорошо описывает поведение экспериментальных точек.

В эксперименте получены данные по угловому распределению фотонов, излученных электронами в потенциале оси $\langle III \rangle$ кристалла кремния. Стандартное отклонение распределения углов вылета фотонов, частоты которых соответствуют области максимума в спектре, равно (105 ± 12) мкрад. Эти результаты не противоречат данным эксперимента, выполненного в Томском политехническом институте^{зж}.

Шестая глава диссертации посвящена исследованию когерентного тормозного излучения электронов и позитронов с энергиями 10 ГэВ при малых углах ориентации относительно плоскости (110) кристалла кремния /21-24/. На рис.10 представлены зависимости числа фотонов от угла входа позитронов в кристалл кремния относительно плоскости (110). Данные приведены для различных интервалов энергий гамма-квантов. Пунктирные линии представляют соответствующие вероятности излучения на аморфной (алюминиевой) мишени. Максимум выхода гамма-квантов с энергиями 10-80 МэВ соответствует углам входа позитронов в пределах критического угла Линдхарда. Излучение более жестких гамма-

^ж Ахизер А.И. и др. УФН, 1982, Т.137, С.561.

^{зж} Воробьев С.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, в.7, с.414.

квантов также имеет максимум вероятности, однако меньшей величины и при больших углах входа, чем угол Линдхарда. Из рис.10 видно, что число излучаемых фотонов при каналировании приблизительно на порядок превышает аналогичное число при когерентном тормозном излучении. Данные по излучению электронов, иллюстрирующие отличия вероятностей радиации при каналировании от когерентного тормозного излучения, приведены на рис.11. Распределения на рис.10 (Г,Д) и на рис.11 (Б) представляют ориентационную зависимость вероятности, характерную для когерентного тормозного излучения (КТИ). Положения максимумов и падение вероятности при нулевом угле хорошо согласуются с положе-

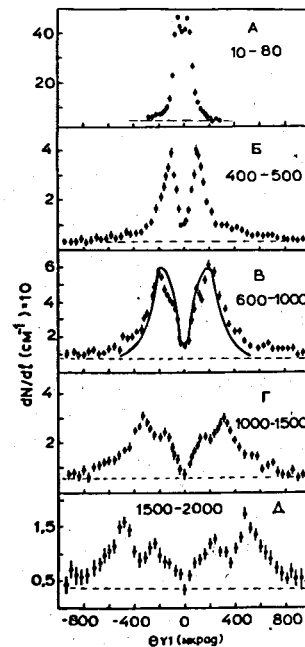


Рис.10. Распределения числа гамма-квантов, излученных позитронами в потенциале плоскости (110) кремния толщиной 113 мкм в зависимости от входного угла частиц в кристалл. Цифрами указаны энергетические диапазоны гамма-квантов (МэВ). Сплошная кривая - результаты теоретического расчета. Пунктирной линией отмечен уровень числа фотонов на алюминиевой мишени.

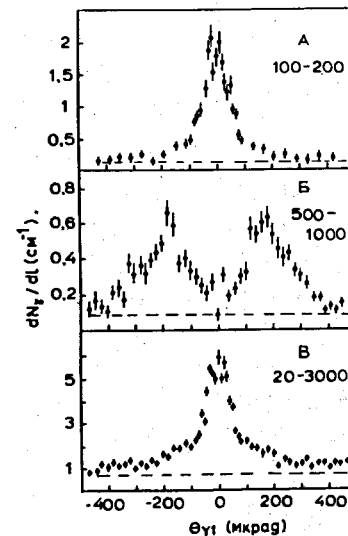


Рис.11. Распределения числа гамма-квантов, излученных электронами в потенциале плоскости (110) кремния толщиной 4I мкм в зависимости от угла входа частиц в кристалл. Цифрами указаны энергетические диапазоны фотонов (МэВ). Пунктирные линии - соответствующие уровни для алюминиевой мишени.

ниями теории КТИ^ж. Сплошная кривая на рис.10 (В) представляет теоретический расчет^{жж} излучения надбарьерных частиц. По мнению авторов, при данных условиях эксперимента зависимости вероятностей излучения от входного угла частиц в кристалл, рассчитанные в режиме излучения надбарьерных частиц и по теории когерентного тормозного излучения, практически совпадают.

На рис.12,13 представлены зависимости спектральной плотности излучения электронов и позитронов от энергии гамма-квантов при

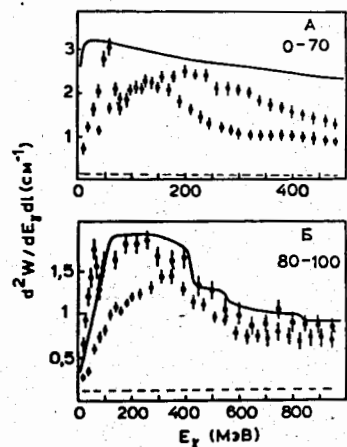


Рис.12. Спектральная плотность излучения электронов (•) и позитронов (○) в плоскости (110) кристалла кремния. Данные получены в интервале входных углов 0,5 + 0,8 мрад от оси <111> кристалла. Цифрами на рисунках указаны углы входа частиц (мрад) относительно плоскости (110). Сплошная кривая - расчет по теории когерентного тормозного излучения, пунктирная - излучение на алюминиевой мишени.

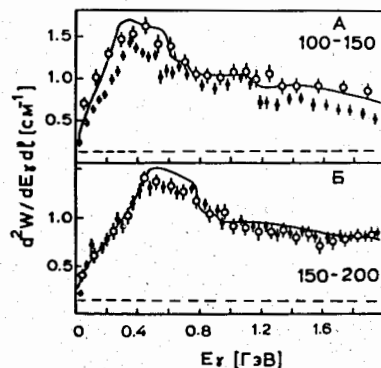


Рис.13. Спектральная плотность излучения электронов (•) и позитронов (○) в потенциале плоскости (110) кристалла кремния для двух интервалов входных углов - 100 + 150 мрад и 150 + 200 мрад. Пунктирная линия - соответствующий уровень для аморфной мишени. Сплошная кривая - теория когерентного тормозного излучения.

различных интервалах входных углов относительно плоскости (110) кремния. Полярные углы частиц относительно оси <111> кристалла превышали 500 мрад. Сплошной кривой показаны спектральные плотности излучения, рассчитанные по теории КТИ методом, изложенным в работе^ж. Пунктирной линией приведена спектральная плотность тормозного излучения на алюминиевой мишени.

Экспериментальные спектры излучения электронов и позитронов с углами входа в интервалах 0 + 70 мрад и 80 + 100 мрад (рис.12) в области низких энергий гамма-квантов качественно различаются как между собой, так и с расчетной кривой. Превышение экспериментальных точек для позитронов в интервале углов 80 + 100 мрад над теоретической кривой объясняется захватом частиц в режим каналирования за счет многократного рассеяния с последующим излучением в канале.

Излучение позитронов при входных углах 80 - 100 мрад, начиная с энергии гамма-квантов 100 МэВ и выше, удовлетворительно описывается теорией КТИ, тогда как излучение электронов подавлено до энергии фотонов 300 - 400 МэВ. Это обусловлено, по-видимому, неодинаковым влиянием оси <111> на движение частиц. При входных углах в интервалах 100 - 150 мрад и 150 - 200 мрад относительно плоскости (110) кристалла (рис.13) экспериментальные данные по излучению электронов и позитронов в пределах точности измерений соответствуют расчетному.

Представленные данные позволяют детально сравнить спектральные характеристики излучения при каналировании с когерентным тормозным излучением. При каналировании положение основного максимума в спектральном распределении не зависит от величины входного угла частицы в кристалл (рис.4,6). В то время как спектральное распределение КТИ с ростом угла входа смещается в жесткую область спектра (рис.13). Отличие между рассматриваемыми видами излучений может быть иллюстрировано также сравнением спектров для положительных и отрицательных частиц. Наблюдаемое в режиме каналирования приблизительно двукратное различие в частотах излучения между электроном и позитроном (рис.12) практически отсутствует при КТИ (рис.13).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

I. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования электромагнитного излучения заряженных частиц высоких энергий в тонких кристаллах. Установка обеспечивает наилучшее на сегодняшний день разрешение по углу входа частиц в кристалл - около

^ж Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1969.

^{жж} Байер В.Н. и др. Препринт ИЯФ 81-139, Новосибирск, 1981.

^ж Зимин Н.И. Препринт ОИЯИ Р1-83-294, Дубна, 1983.

6 мкрад. Достигнут минимальный уровень фонового тормозного излучения, эквивалентного количеству вещества около $5 \cdot 10^{-4}$ радиационных длин.

Электромагнитное излучение регистрировалось одновременно в трех энергетических диапазонах 5 ± 200 МэВ, 5 ± 1000 МэВ и 5 ± 3000 МэВ с ценой отсчета 0,1 МэВ, 0,5 МэВ и 5 МэВ, соответственно, с эффективностью, практически равной единице. Разрешение гамма-спектрометра при энергии 100 МэВ не хуже 3%. Апертура детектора позволяла регистрировать излучение в интервале выходных углов до двадцати критических углов плоскостного каналирования. Примерно для 4% событий измерялись вертикальные проекции углов вылета гамма-квантов, точность измерения составляла около 4 мкрад.

2. В обработке данных путем введения критериев отбора событий достигнут высокий уровень чистоты исследований изучаемого эффекта. Величина случайных событий при энергии фотонов ниже 30 МэВ равна 8%, в области 60 МэВ – около 2% и 1% при энергиях выше 100 МэВ. Уровень абсолютной погрешности в нормировке экспериментальных данных составляет около 10%.

3. Экспериментально исследованы ориентационные зависимости числа излучаемых гамма-квантов, спектральной плотности и полных потерь энергии на электромагнитное излучение электронами и позитронами с энергиями 10 ГэВ в потенциале плоскости (110) в тонких кристаллах кремния. Показано, что зависимость числа гамма-квантов от угла входа позитронов в кристалл подтверждает положение теории, согласно которому основной вклад в излучение дают частицы с поперечными энергиями, приблизительно равными высоте потенциального барьера; в ранних экспериментах вследствие недостаточного углового разрешения ожидаемое поведение не подтверждалось. Высокое угловое и энергетическое разрешение аппаратуры позволило получить экспериментальные данные, которые с достаточной полнотой освещают спектральные характеристики излучения каналированных частиц, особенности в спектре излучения при переходе от каналирования к движению частиц в надбарьерном режиме, а также позволило обнаружить ранее не предсказанный максимум в спектральной плотности излучения позитронов при углах входа 20 – 30 мкрад при энергии фотона, равной половине энергетического положения основного максимума. Поведение данных по спектральной плотности излучения электронов и позитронов в критическом угле плоскостного каналирования с хорошей точностью описывается теоретическими кривыми; имеющиеся незначительные отличия в высоте максимумов (15 – 20)% могут быть уменьшены путем учета перераспределения частиц по поперечным энергиям; данный уровень согласия с теорией в ранних экспериментах не наблюдался.

4. Впервые экспериментально исследованы рассеяние релятивистских позитронов и угловые распределения гамма-квантов, излученных электронами и позитронами в потенциале плоскости кристалла. Представленные данные по рассеянию позитронов в плоскости (110) кремния толщиной 113 мкм характеризуют особенности движения каналированных и надбарьерных частиц. Среднеквадратичный угол рассеяния каналированных позитронов может в два раза превышать аналогичную величину на аморфной мишени и показывает отчетливую зависимость от энергии поперечного движения частицы в канале – чем выше поперечная энергия, тем больше угол рассеяния. Результаты измерения углов вылета гамма-квантов при каналировании частиц подтверждают следующие положения теории: фотоны из области максимума в спектральном распределении излучаются в наименее узком угловом интервале; излучение фотонов из жесткой части спектра направлено под более широким угловым раствором; в частности, при плоскостном каналировании наименьшие диапазоны углов излучения гамма-квантов равны 38 ± 3 мкрад для позитронов и 75 ± 7 мкрад для электронов.

5. Экспериментально исследованы ориентационные зависимости числа излучаемых гамма-квантов, спектральной плотности и полных потерь энергии на электромагнитное излучение электронами и позитронами с энергиями 10 ГэВ в потенциале оси <111> в тонких кристаллах кремния. Показано, что зависимости числа излучаемых фотонов электронами и позитронами качественно согласуются с ожидаемыми из теории; аналогичные данные для позитронов в других экспериментах не представлялись. Экспериментальные результаты по спектральной плотности излучения электронами и позитронами хорошо согласуются с расчетами, выполненными с помощью моделирования; по сравнению с расчетами в работе Авакян А.Л. и др. (ЖЭТФ, 1982, Т.82, С.573–591) имеются расхождения в точке $E_{\gamma} = 0$.

6. Измерены многократное рассеяние электронов в зависимости от полярного угла входа относительно оси <111> кристалла кремния и углы излучения фотонов в зависимости от их энергии электронами в потенциале оси <111> кристалла кремния. Впервые полученные данные по многократному рассеянию электронов в потенциале оси кристалла согласуются с выводами теоретической модели. Ширина углового распределения фотонов, соответствующих максимуму в спектральной плотности излучения, равна (105 ± 8) мкрад; эти результаты не противоречат данным эксперимента в Томском политехническом институте*.

7. Впервые в одном экспериментальном исследовании получены сравнительные данные, показывающие сходства и отличия характеристик

*См. сноску на стр.16.

электромагнитного излучения при каналировании и известного когерентного тормозного излучения. Показано, что при плоскостном каналировании электронов и позитронов с энергиями 10 ГэВ в кристалле кремния в плоскости (110) число излучаемых гамма-квантов приблизительно на порядок выше числа фотонов, генерируемых при КТИ. При входных углах частиц в пределах одного критического угла основная частота излучения не зависит от величины входного угла. Результаты измерения спектрального распределения когерентного тормозного излучения показывают ожидаемое из теории смещение максимума в жесткую часть спектра с ростом угла входа частиц в кристалл. Экспериментальные данные показывают, что наблюдаемое при условии плоскостного каналирования приблизительно двукратное различие в частотах излучения между электронами и позитронами практически отсутствует при углах, превышающих два критических угла плоскостного каналирования.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бавижев М.Д., Булгаков Н.К.,...Нигманов Т.С. и др. Электрон - позитронный пучок на ускорителе ИФВЭ. Препринт ИФВЭ, 82 - 74, Серпухов, 1982.
2. Водошнянов А.С., Войтковская И.,...Нигманов Т.С. и др. Спектрометр для исследования спонтанного излучения, возникающего при прохождении позитронов и электронов высоких энергий через монокристаллы. Препринт ОИЯИ, П13-82-547, Дубна, 1982.
3. Filatova N.A., Foryucky A.,...Nigmanov T.S. et al. A Spectrometer to Study Spontaneous Radiation due to the Channeling of High Energy Electrons and Positrons in Single Crystals. Nucl. Instr. and Meth., 1983, V.211, P.353-362.
4. Войтковская И., Головатюк В.М.,...Нигманов Т.С. и др. Дрейфовая камера низкого давления в эксперименте по исследованию излучения релятивистских частиц в монокристаллах. Препринт ОИЯИ, П13-82-374, Дубна, 1982.
5. Golovatyuk V.M., Guzik Z.,...Nigmanov T.S. et al. Low Pressure Drift Chamber in an Experiment on Studies of the Radiation of Relativistic Particles in Single Crystals. Nucl. Instr. and Meth., 1984, V.251, P.135-140.
6. Бавижев М.Д., Булгаков Н.К.,...Нигманов Т.С. и др. Дрейфовая камера со встроенным конвертором для измерения углов вылета γ - квантов при каналировании электронов и позитронов. Препринт ОИЯИ, П13-81-644, Дубна, 1981.

7. Filatova N.A., Foryucky A.,...Nigmanov T.S. et al. A Drift Chamber with an Intrinsic Converter for Measurement of γ -Ray Exit Angles in Electron and Positron Channeling. Nucl. Instr. and Meth., 1983, V.206, P.379-383.
8. Булгаков Н.К., Войтковская И.,...Нигманов Т.С. и др. Детектор полного поглощения для измерения энергии гамма-квантов на основе кристалла CsJ(Tl). Препринт ОИЯИ, П3-84-676, Дубна, 1984.
9. Булгаков Н.К., Войтковская И.,...Нигманов Т.С. и др. Детектор полного поглощения с кристаллом CsJ(Tl) для измерения энергий гамма-квантов в диапазоне 10-10⁴ МэВ. ПТЭ, 1986, №4, С.53-56.
10. Головатюк В.М., Иванченко И.М.,...Нигманов Т.С. и др. Излучение позитронов с энергией 10 ГэВ в монокристалле кремния в процессе каналирования. Препринт ОИЯИ, Д1-81-592, Дубна, 1981.
11. Filatova N.A., Golovatyuk V.M.,...Nigmanov T.S. et al. Radiation from 10 GeV Positrons Channeled in Silicon Crystals. Nucl. Instr. and Meth., 1982, V.194, P.239-242.
12. Filatova N.A., Golovatyuk V.M.,...Nigmanov T.S. et al. Radiation from the Channeled of 10 GeV Positrons by Silicon Single Crystals. Phys.Rev.Lett., 1982, V.48, P.488-492.
13. Булгаков Н.К., Водошнянов А.С.,...Нигманов Т.С. и др. Исследование излучения релятивистских позитронов в монокристалле кремния. Препринт ОИЯИ, П-83-621, Дубна, 1983.
14. Булгаков Н.К., Водошнянов А.С.,...Нигманов Т.С. и др. Угловые и энергетические распределения гамма-квантов, излучаемых при каналировании релятивистских позитронов. Препринт ОИЯИ, П-83-603, Дубна, 1983.
15. Бавижев М.Д., Булгаков Н.К.,...Нигманов Т.С. и др. Угловые и энергетические распределения гамма-квантов, излучаемых при каналировании релятивистских позитронов. Письма в ЖЭТФ, 1983, Т.38, С.462-465.
16. Булгаков Н.К., Водошнянов А.С.,...Нигманов Т.С. и др. Излучение ультрарелятивистских электронов, движущихся под малыми углами к плоскостям (110) в кремнии. Препринт ОИЯИ, П1-85-28, Дубна, 1985.
17. Булгаков Н.К., Водошнянов А.С.,...Нигманов Т.С. и др. Экспериментальное исследование γ - излучения, возникающего в процессе осевого и плоскостного каналирования электронов в кремнии. ЖЭТФ, 1986, Т.90, С.1527-1535.
18. Булгаков Н.К., Водошнянов А.С.,...Нигманов Т.С. и др. Излучение позитронов с энергией 10 ГэВ при осевом каналировании. Препринт ОИЯИ, П-83-731, Дубна, 1983.

19. Булгаков Н.К., Водопьянов А.С., ... Нигманов Т.С. и др. Исследование излучения ультрарелятивистских электронов при их движении под малыми углами относительно кристаллографической оси в монокристалле кремния. Препринт ОИЯИ, РИ-85-27, Дубна, 1985.
20. Булгаков Н.К., Водопьянов А.С., ... Нигманов Т.С. и др. Излучение электронов с энергией 10 ГэВ в монокристалле кремния в процессе осевого каналирования. Препринт ОИЯИ, I-83-640, Дубна, 1983.
21. Булгаков Н.К., Водопьянов А.С., ... Нигманов Т.С. и др. Исследование когерентного тормозного излучения релятивистских позитронов при малых углах ориентации относительно плоскости (110) в кристалле кремния. Препринт ОИЯИ, РИ-85-670, Дубна, 1985.
22. Булгаков Н.К., Водопьянов А.С., ... Нигманов Т.С. и др. Исследование когерентного тормозного излучения релятивистских электронов и позитронов в тонких монокристаллах кремния. Препринт ОИЯИ, РИ-85-671, Дубна, 1985.
23. Булгаков Н.К., Водопьянов А.С., ... Нигманов Т.С. и др. Угловые распределения γ - квантов, излучаемых релятивистскими позитронами в монокристалле кремния. Препринт ОИЯИ, РИ-85-672, Дубна, 1985.
24. Булгаков Н.К., Водопьянов А.С., ... Нигманов Т.С. и др. Когерентное тормозное излучение позитронов с энергией 10 ГэВ в тонком кристалле кремния. Препринт ОИЯИ, I-84-372, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 октября 1987 года.