

K-138

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-86-187

УДК 539.1.03

КАДЫРОВ
Ренат Батыевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ,
ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 10 ГэВ ЧЕРЕЗ МОНОКРИСТАЛЛ КРЕМНИЯ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1986

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
профессор

ЦИГАНОВ
Эдуард Николаевич

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
профессор

ГРАМЕНИЦКИЙ
Игорь Михайлович

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

ПОХИЛ
Григорий Павлович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Харьковский ордена Ленина и ордена Октябрьской революции
физико-технический институт АН УССР.

Защита состоится "___" _____ 1986 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 "___" _____ 1986 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

М.Ф. Лихачев

М.Ф. Лихачев

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование свойств электромагнитного излучения, возникающего в процессе каналирования ультррелятивистских электронов в тонком монокристалле кремния.

Актуальность проблемы. Как известно, источники интенсивного γ -излучения от ультрафиолетового до жесткого рентгеновского диапазона находят широкое практическое применение. К ним относятся черенковское излучение, излучение в искусственных периодических структурах, тормозное излучение и др.

Особый интерес представляет излучение, возникающее в процессе каналирования легких частиц в монокристаллах. Теоретически существование и характерные свойства этого излучения, такие, как высокая спектральная плотность и узкая угловая направленность, были предсказаны в 1976 году*. К моменту подготовки нашего эксперимента излучение еще не было открыто, но уже в 1979 году этот эффект впервые наблюдался в СЛАК**.

В настоящее время исследования электромагнитного излучения, возникающего в процессе каналирования, превратились в бурно развивающееся направление физики. Актуальность этих исследований имеет несколько аспектов. Во-первых, это прекрасный метод для изучения свойств монокристаллов. Во-вторых, это способ, позволяющий изучать свойства каналированных частиц.

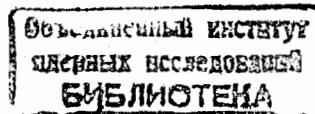
Новизна работы заключается в том, что впервые эксперимент был поставлен с привлечением современной электронной методики физики высоких энергий. Это позволило впервые детально исследовать спектральные характеристики излучения для различных диапазонов углов входа электронов в кристалл внутри критического угла каналирования. Впервые исследовались угловые характеристики излучаемых γ -квантов. Впервые детально исследованы свойства излучения, возникающего при плоскостном каналировании ультррелятивистских электронов.

Практическая и научная ценность. Полученные экспериментальные результаты подтверждают правильность теоретических положений о значительном превышении величины спектральной плотности излучения при каналировании по сравнению с аналогичной величиной в аморфной мишени.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы

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

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



ны для проверки теоретических моделей, для проведения методом моделирования расчетов спектров излучения в толстых кристаллах.

Создана экспериментальная установка, работающая на пучке электронов и позитронов ускорителя ИФВЭ. Параметры установки позволили детально исследовать процессы спонтанного γ -излучения легкими каналированными частицами.

Создан гамма-спектрометрический комплекс для измерения энергетических и угловых характеристик потока γ -квантов. В устройстве гамма-спектрометра впервые применен ряд аппаратурных средств, позволивших в 20 раз сократить время набора статистики и в 100 раз уменьшить фон.

Предложена и реализована методика работы со спектрометрическими фотоумножителями типа ФЭУ-49 для измерения энергии γ -квантов в широком динамическом диапазоне в условиях высоких нагрузок.

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

Основные материалы диссертации опубликованы в советской и зарубежной печати и в препринтах ОИЯИ^{1-5/}.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 101 страниц, включая 42 рисунка, и библиографический список литературы из 87 наименований.

Автор защищает:

1. Создание экспериментальной установки для изучения электромагнитного излучения, возникающего в процессе взаимодействия ультрарелятивистских электронов и позитронов с монокристаллами.

2. Создание гамма-спектрометрического комплекса для измерения энергетических и угловых характеристик излучения.

3. Разработку и реализацию методики работы со спектрометрическим фотоумножителем типа ФЭУ-49 для измерения энергии γ -квантов в широком динамическом диапазоне в условиях высоких нагрузок.

4. Результаты исследования свойств излучения, возникающего при прохождении электронов с энергией 10 ГэВ вдоль направления оси $\langle III \rangle$ монокристалла кремния толщиной 41 мкм.

5. Результаты исследования свойств излучения, возникающего при прохождении электронов с энергией 10 ГэВ вдоль плоскости (110) монокристалла кремния толщиной 41 мкм.

Во введении рассматриваются теоретические представления, лежащие в основе эффектов каналирования и электромагнитного излучения легких заряженных частиц в монокристаллах.

Исследованию эффекта каналирования посвящено большое число экспе-

риментальных и теоретических работ. Первые экспериментальные работы по исследованию процессов каналирования были выполнены при сравнительно небольших энергиях, порядка нескольких МэВ. В настоящее время появилось много экспериментальных и теоретических работ по каналированию при высоких энергиях. Как оказалось, в соответствии с предсказаниями Линдхарда, по мере увеличения энергии применение классической механики для описания процесса каналирования становится все более корректным. При энергиях электронов 1-10 ГэВ классическое описание характера их движения становится весьма точным.

С точки зрения квантовой механики поперечная энергия каналированной частицы принимает дискретные значения в силу финитности поперечного движения. Еще Томпсон^ж впервые обратил внимание на возможность спонтанных радиационных переходов между уровнями поперечной энергии каналированных протонов. При этом, как предполагал Томпсон, излучение должно происходить в инфракрасной области спектра. Как показал анализ, интенсивность излучения в этом случае будет настолько мала, что обнаружить его практически невозможно.

Основные выводы современной теории сводятся к следующему. Легкие заряженные частицы относительно долгое время движутся вдоль каналов, образованных кристаллическими плоскостями или осями. При этом происходят спонтанные радиационные переходы между уровнями поперечной энергии, а релятивистские эффекты играют двойную роль. Релятивистское возрастание массы частицы приводит к уменьшению разности соседних уровней поперечной энергии, т.е. частоты поперечных колебаний.

С другой стороны, эффект Доплера приводит к тому, что энергия излучаемого фотона значительно превосходит энергию переходов между уровнями поперечной энергии, а также к концентрации интенсивности излучения в направлении продольного движения.

В первой главе описываются экспериментальная установка и методические вопросы, связанные с условиями постановки эксперимента. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Пучок электронов падал на монокристаллическую мишень, размещенную в дистанционно управляемом гониометре. Для определения траектории частицы до и за мишенью использовалась система дрейфовых камер, сгруппированных в трех блоках ДК1, ДК2, ДК3. Четвертый блок дрейфовых камер ДК4 служил для определения траектории частиц 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 измеря-

ж М.Томпсон УФН, 1969, т.99, №2, с.297

лись с помощью блока дрейфовых камер ДК5 со встроенным конвертером, расположенного непосредственно перед радиатором гамма-спектрометра. Для идентификации вторичных электронов использовались ливневые черенковские счетчики из свинцового стекла, перекрывающие диапазон импульсов от 5 до 10 ГэВ/с. Установка запускалась системой счетчиков совпадения и антисовпадений, и работала на линии с ЭМ ЕС-1040.

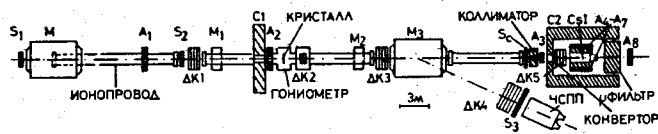


Рис.1. Схема экспериментальной установки. S1, S2, S3, A1-A8 - сцинтилляционные счетчики, ДК1-ДК5 - блоки дрейфовых камер, ЧСПП - черенковский счетчик полного поглощения с радиатором из свинцового стекла, CsJ - гамма-спектрометр на основе монокристалла цезий-йод, С1, С2 - коллиматоры, М, М1, М2, М3 -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

Исследования проводились на электрон-позитронном пучке ускорителя ИФВЗ*. Интенсивность пучков при энергии 10 ГэВ составляла $\sim 10^5$ частиц за цикл ускорителя при интенсивности протонов, сбрасываемых на мишень, $\sim 10^{12}$. Импульсное распределение пучков имело среднеквадратичный разброс около 130 МэВ/с. Примесь адронов в пучках электронов и позитронов не превышала 1%. Среднеквадратичное отклонение углового распределения пучка в районе кристалла составило ~ 1 мрад (в обеих проекциях), а его размер составлял около 20 мм (полная ширина на половине высоты). При прохождении частицы через установку наряду с исследуемым излучением возникает фоновое тормозное излучение в веществе установки. Интенсивность тормозного излучения из монокристалла кремния толщиной 100 мкм, ориентированного случайным образом, составляла бы не более 2% от интенсивности фонового излучения в веществе установки. Ясно, что оптимизация фоновых условий в эксперименте являлась серьезным вопросом, и первым шагом его решения было уменьшение количества вещества. Суммарное количество вещества в установке после минимизации составляло около $5 \cdot 10^{-2}$ радиационных единиц. Для дальнейшего уменьшения фона использовались очищающие магниты. Использование магнита М1 за первым блоком камер с углом отклонения 3 миллирадиана и магнита М2 перед третьим блоком камер с углом отклонения 5 миллирадиан, позволило резко уменьшить фон.

* М.Д. Бавижев и др. Препринт ИФВЗ, 82-74 ОП, Серпухов, 1982.

При этом в рабочую апертуру гамма-спектрометра попадало около 1% фона, обусловленного веществом установки, что оказалось вполне приемлемым.

Дрейфовая камера низкого давления ДК2, состоявшая из 2X и 2Y плоскостей, была разработана специально для настоящего эксперимента*. Использование стандартного блока дрейфовых камер в месте расположения ДК2 было нежелательно также из-за большого многократного рассеяния - ~ 100 мкрад. Уменьшение вещества в камере ДК2 было произведено за счет минимизации толщины майларовых окон, вынесения всех проволочек из рабочей области и снижения давления газа. Камера располагалась непосредственно за гониометром и была смонтирована в ионопровод установки. Ее газовый объем ограничивался майларовыми окнами толщиной 12 микрон. Газовая смесь состояла из 62% аргона, 28% изобутана и 10% паров метилала. Давление рабочего газа в процессе эксперимента было равно 250 тор, при этом суммарное количество вещества в камере вдоль пучка составляло около $5 \cdot 10^{-4}$ радиационных единиц.

В качестве мишени в эксперименте использовался бездислокационный монокристалл кремния (число дислокаций не превышает $10/\text{см}^2$). Кристалл был разрезан перпендикулярно исследуемой кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$ с точностью около $0,2^\circ$ и выполнен в виде диска толщиной 0,5 мм. Центральная часть диаметром 18 мм была вытравлена до толщины 4 мкм. Монокристалл крепился в обойму, позволявшую одновременно устанавливать до четырех различных образцов. Обойма устанавливалась в гониометре с дистанционным управлением. Гониометрической система позволяла дистанционно поворачивать кристалл вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (цена отсчета составляла $0,001^\circ$).

Для выделения полезного события в эксперименте была применена двухуровневая система запуска: триггер первого уровня (быстрый), генерируемый в случае появления единичной частицы в заданной апертуре установки, и триггер второго уровня, отбирающий события, которые удовлетворяли заданным критериям отбора. Помимо основного типа запуска генерировался ряд вспомогательных запусков, предназначенных для тестовых и калибровочных целей. Всего использовалось шесть типов запусков, которые осуществлялись в определенной последовательности. Электронная система синхронизации, управления набором данных и их регистрации, а также система связи с ЭМ была выполнена в стандарте КАМАК и помещалась в трех крейтах, организованных в ветвь КАМАК универсальным драйвером ветви. Система управления и синхрони-

* И. Войтковска и др. Препринт ОИЯИ, Р13-82-374, Дубна, 1982.

зации создана на основе блоков, разработанных специально для эксперимента. С ее помощью осуществлялись синхронизация работы установки, ЭМ и устройств представления данных с циклом ускорителя, выработка последовательности запусков, калибровка ВЦ, отбор событий по критериям. С помощью специально разработанных блоков было обеспечено сопряжение с ЭМ графического дисплея ТЕКТРОНИКС-61Э, алфавитно-цифрового терминала ДЭМ-180-К и пульта управления установкой^ж.

Во второй главе рассматриваются вопросы создания и исследования сцинтилляционного гамма-спектрометра полного поглощения.

Гамма-спектрометр (рис.2) представляет собой сцинтилляционный счетчик, радиатором которого является кристалл CsJ(Tl) (1), помещенный в специальный защитный контейнер. Радиатор с одного из торцов просматривался фотоумножителем ФЭУ-49 (2) с диаметром фотокатода 150 мм. Оптический контакт между фотоумножителем и радиатором обеспечивался применением силиконовой смазки и механическим поджатием с помощью нажимного кольца (4). Для защиты от воздействия рассеянных магнитных полей начальная часть фотоумножителя окружалась магнитным экраном (3).

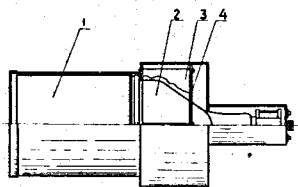


Рис.2. Конструкция спектрометра.

Точность измерения энергии падающего гамма-кванта ливневым сцинтилляционным спектрометром определяется размерами радиатора. В описываемом спектрометре применялся кристалл цилиндрической формы.

На рис.3 представлены энергетические потери в веществе CsJ(Tl) в зависимости от глубины развития каскадного ливня. Плавная кривая представляет собой полное число частиц в ливне, образованном гамма-квантом с энергией 10 ГэВ, как функция толщины радиатора (в рад. ед.). Кривая рассчитана с учетом потерь энергии на ионизацию частицами ливня. Ступенчатая кривая представляет собой зависимость отношения средних энергетических потерь на одной радиа-

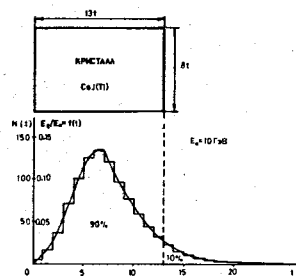
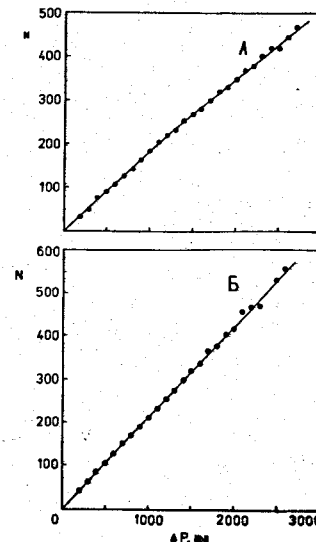


Рис.3. Энергетические потери в веществе CsJ(Tl).

ционной длине к полной энергии ливня от толщины радиатора. Для наглядности на рис.3 показаны размеры кристалла длиной 230 мм и диаметром 150 мм. Как видно из рисунка, кристалл с такими размерами способен поглотить до 90 % энергии ливня, вызванного гамма-квантом с начальной энергией 10 ГэВ. Однако неполное поглощение энергии гамма-кванта должно привести к нарушению линейности спектрометра, что подтвердилось экспериментально (см. рис.4А). В конечном варианте в качестве радиатора гамма-спектрометра был применен кристалл длиной 300 мм и диаметром 200 мм (17 рад. ед. и 11 рад. ед. соответственно),

который поглощал до 97 % энергии ливня. При этом его калибровочная характеристика оказалась практически линейной (см. рис.4Б).

Рис.4. Калибровка гамма-спектрометра с помощью "меченых" фотонов. А - длина радиатора 230 мм, Ø - 150 мм, Б - 300 мм и 200 мм соответственно. По оси абсцисс отложена разность $P = P_0 - P$, где P_0 - средний импульс пучка, P - импульс вторичного электрона, а по оси ординат - отсчеты гамма-спектрометра. Сплошная кривая - полиномиальный фит.



Максимальная анодная чувствительность ФЭУ-49 достигается при напряжении питания порядка 2000 В, рекомендуемом в качестве рабочего напряжения. При этом напряжении на ФЭУ спектрометр имел наилучшее энергетическое разрешение, которое определялось с помощью радиоактивных источников ^{60}Co и $\text{Po} - \text{Be}$. Так, для гамма-излучения $\text{Po} - \text{Be}$ ($E_\gamma = 4,43 \text{ МэВ}$) разрешение составляло 6,7 % (рис.5).

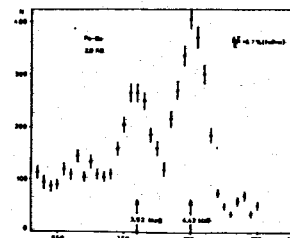


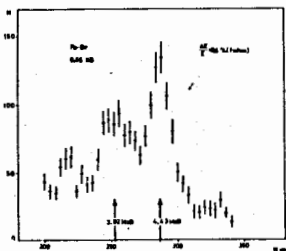
Рис.5. Энергетический спектр гамма-квантов от источника $\text{Po} - \text{Be}$ при напряжении питания на ФЭУ-49, равном 2000 В.

^ж З.Гузик и др. Препринт ОИЯИ, 13-12952, Дубна, 1980.

С целью эффективного использования времени, отведенного для работы на ускорителе, измерения проводились одновременно во всем диапазоне энергий. В таких условиях работа фотоумножителя затруднена даже при сравнительно невысоких нагрузках (50 кГц). С одной стороны, для регистрации низкоэнергетичных гамма-квантов с хорошим разрешением, необходим полный сбор фотоэлектронов, в то же время регистрация высокоэнергетичных гамма-квантов связана с генерацией такого количества света, которое приводит к перегрузке и нестабильности работы ФЭУ. Чтобы решить проблему, был предложен метод улучшения стабильности работы ФЭУ, заключающийся в понижении усиления ФЭУ с одновременным увеличением усиления спектрометрической электроники. В связи с этим были проведены исследования по подбору специального режима работы ФЭУ-49, расширяющего его динамический диапазон до нужных пределов с сохранением стабильности усиления и получении оптимального разрешения. Проведенная проверка показала, что усиление ФЭУ действительно изменяется при изменении частоты загрузки. Было определено, что стабильность усиления улучшается при уменьшении общего напряжения на ФЭУ, однако при этом ухудшается энергетическое разрешение. Так как нестабильность усиления ФЭУ при изменении загрузки, очевидно, связана в первую очередь с тепловыми процессами на последних динодах ФЭУ, а разрешение определяется, в основном, фокусирующими свойствами первых электродов, было решено подобрать режим питания этих частей ФЭУ отдельно. В результате был выбран следующий режим питания: общее напряжение - 660 В, разность потенциалов на промежутках фотокатод-модулятор - 15,2 В, модулятор-кольцо - 209 В, кольцо - 1 динод - 18,4 В, 1 динод-2 динод - 39,7 В. Интересно, что в этом случае режим питания первых электродов незначительно отличается от стандартного, паспортного режима ФЭУ-49. Указанный режим практически обеспечил независимость усиления ФЭУ от загрузки. Относительное изменение усиления не превышало 8 % при изменении частоты загрузки от 1 до 20 кГц. При обработке данных на эту нестабильность вводилась коррекция по результа-

там калибровочных запусков от μ -мезонов и от светодиода. Энергетическое разрешение для гамма-квантов с энергией 4,43 МэВ при этом напряжении ухудшилось всего на 20 % (рис.6).

Рис.6. Энергетический спектр гамма-квантов от источника $Po - Be$ при напряжении питания на ФЭУ-49, равном 660 В.



Сигналы с ФЭУ регистрировались одновременно двумя спектрометрическими трактами (рис.7).

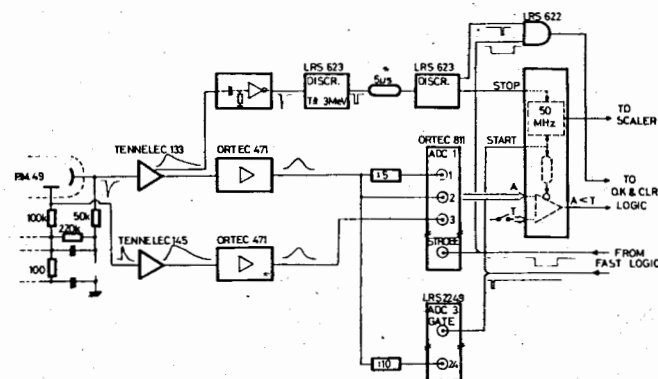


Рис.7. Схема съема информации с гамма-спектрометра.

Тракт, в котором сигнал снимался с анода ФЭУ, обеспечивал измерение энергии до 1 ГэВ. Динодный тракт, в котором сигнал снимался с последнего динода ФЭУ, имел рабочий диапазон до 10 ГэВ.

В устройстве гамма-спектрометра, впервые для приборов такого класса, был применен ряд аппаратных средств, позволивших повысить эффективность отбора полезной информации. Был организован временной тракт, в котором сигнал с быстрого выхода анодного предусилителя преобразовывался в логический импульс. Этот импульс определял момент прохождения частицы через спектрометр. Условия отбора требовали попадания сигналов от гамма-квантов в интервал 0-0,25 мкс и отсутствия их в интервале от -5 мкс до -0,25 мкс.

При работе в широком динамическом диапазоне и достаточно больших нагрузках возможны искажения амплитуды полезного сигнала из-за дрейфа "нулевого" потенциала спектрометрического тракта. Для устранения этих искажений производились измерения (с помощью АЦП типа LRS 2249) "нулевого" потенциала каждого спектрометрического тракта за 2 мкс до рабочего сигнала. При обработке данных эта информация использовалась для коррекции амплитуды полезного сигнала.

Контроль долговременных нестабильностей спектрометрических трактов осуществлялся по информации об ионизационных потерях фоновых μ -мезонов в радиаторе гамма-спектрометра и по сигналам от светодиода.

Третья глава диссертации посвящена исследованию γ -излучения, возникающего в процессе осевого каналирования электронов. Рассматриваются вопросы отбора данных при окончательной обработке, проводится обсуждение результатов и их сравнение с теорией.

Для анализа данных необходимо было отобрать полезные события, отделив их от фоновых. Отбор полезных событий осуществлялся по ряду критериев, учитывающих геометрические особенности и аппаратную эффективность установки.

Спектральная плотность и вероятность излучения приводились к одному падающему электрону и к единице длины кристалла. Такая нормировка необходима для более простого сравнения с теоретическими расчетами. Для этого определялось число излученных γ -квантов в выбранных диапазонах энергии, а также полное число электронов, прошедших через установку в выбранном интервале углов входа электронов в кристалл. При нормировке в число первичных электронов вносилась поправка, связанная с геометрическими критериями отбора событий и с эффективностью восстановления треков, а число зарегистрированных γ -квантов поправлялось на эффективность гамма-спектрометра. Систематическая погрешность в нормировке данных оценивается нами на уровне 10% и определяется, в основном, точностью определения поправок.

Вероятность излучения электронов, движущихся под малыми углами относительно кристаллографической оси, зависит от двух угловых переменных θ_x и θ_y . На рис.8 представлено распределение событий по углам входа, в которых электроном был испущен γ -квант с энергией до 600 МэВ. Это распределение отчетливо иллюстрирует влияние оси <III> и плоскостей (110) на вероятность излучения γ -квантов.

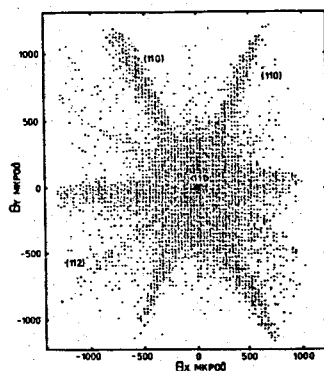


Рис.8. Распределение числа событий, которые сопровождалось излучением γ -квантов с энергией от 10 до 600 МэВ, в зависимости от угла входа электронов в кристалл. θ_x и θ_y - проекции полярного угла на оси абсцисс и ординат в прямоугольной системе координат.

На рис.9 представлены распределения спектральной плотности излучения для электронов в различных диапазонах входных углов. Пунктиром показан уровень спектральной плотности тормозного излучения из алюминиевой мишени. Приведенные данные иллюстрируют зависимость спектральной плотности излучения от угла входа электрона в кристалл. Видно, что наиболее интенсивно излучают электроны с входными углами $\theta_{вх} \leq 40$ мкрад. Максимум спектральной плотности лежит в области около 250 МэВ. Его величина превышает уровень излучения в аморфном теле приблизительно в 70 раз. Следует обратить внимание и на тот факт, что распределение спектральной плотности в случае осевого каналирования электронов существенно шире и приблизительно в два раза выше

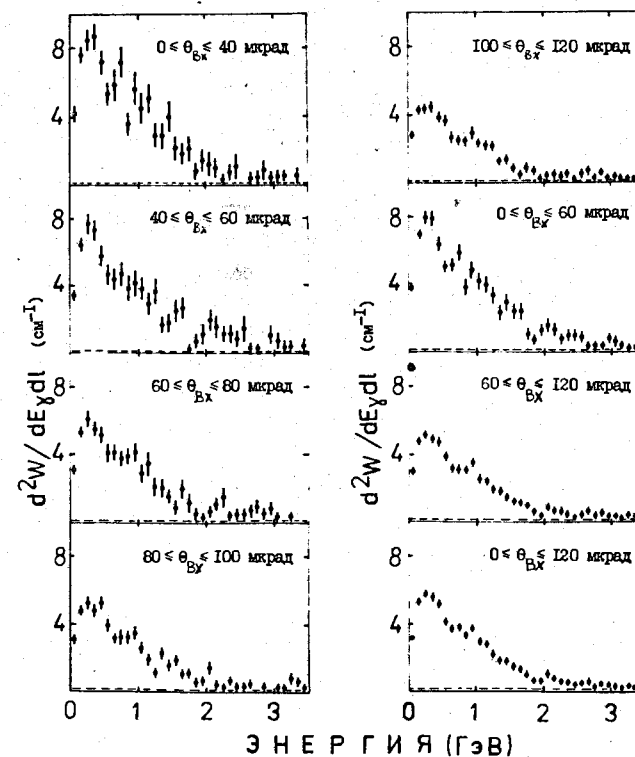


Рис.9. Зависимость спектральной плотности излучения от энергии γ -квантов для различных углов входа электронов в кристалл.

(в максимуме) аналогичного распределения для позитронов*. Это объясняется в основном тем, что каналированные электроны притягиваются к атомным цепочкам и большее время движутся в области с высоким градиентом поля. Вследствие этого спектр излучения электронов сдвигается в более жесткую область по сравнению с позитронами.

Теоретические расчеты показывают, что основная интенсивность излучения при каналировании сосредоточена в сравнительно узком конусе. Угловой разворот этого конуса $\Delta\theta$ зависит от энергии частицы так, что выполняется соотношение $\Delta\theta \approx \gamma^{-1}$, где γ - релятивистский фактор. Это важное свойство излучения при каналировании позволяет надеяться, что это излучение найдет широкое применение в радиографии, микроскопии, литографии и других областях прикладной физики. В данном эксперименте впервые были исследованы угловые характеристики излучения ультра-релятивистских электронов. Как уже отмечалось, это было сделано с помощью дрейфовой камеры со встроенным конвертором**.

На рис. 10 приведены распределения событий по углам вылета γ -квантов из кристалла для электронов с полярными углами входа $\theta_{\text{вх}} \leq 120$ мкрад относительно оси $\langle III \rangle$. Измерялась вертикальная проекция углов вылета γ -квантов относительно горизонтальной плоскости, в которой лежала ось $\langle III \rangle$.

Четвертая глава посвящена исследованию характеристик электромагнитного излучения в условиях плоскостного каналирования электронов.

В отличие от осевого каналирования, в случае плоскостного каналирования вероятность излучения зависит только от одной угловой переменной θ_y . Наиболее интенсивно электроны излучают в диапазоне углов входа $0 \leq \theta_y \leq 20$ мкрад (рис. 11). В этом случае максимальная величина спектральной плотности излучения достигается при энергии γ -квантов около 130 МэВ и превосходит уровень тормозного излучения из аморфной мишени приблизительно в 28 раз.

На рис. 11 для сравнения приведен аналогичный спектр для позитронов с энергией 10 ГэВ, полученный на кристаллической мишени толщиной 113 мкм***. На том же рисунке показан характерный вид межплоскостных усредненных потенциалов для обоих случаев. Для электронов близким к реальному является потенциал вида $U(x) = U_0 \cdot \text{ch}^2 x / b$.

Для плоскостного каналирования позитронов потенциал в первом приближении имеет вид параболы:

$$U(x) = \frac{4U_0 x^2}{d^2},$$

где d - расстояние между соседними плоскостями.

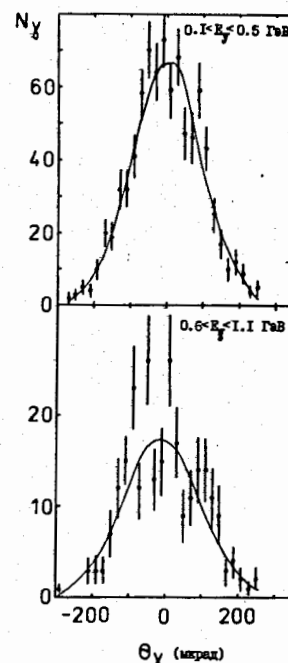


Рис. 10. Распределение событий по углам вылета γ -квантов из кристалла для электронов с полярными углами входа меньше 120 мкрад относительно оси $\langle III \rangle$. Ширина среднеквадратичного отклонения σ для случая $0,1 < E_\gamma < 0,5$ ГэВ составляет 105 ± 8 мкрад, а в случае $0,6 < E_\gamma < 1,1$ ГэВ $\sigma = 115 \pm 12$ мкрад.

Как следует из теории, различие в спектрах излучения электронов и позитронов в основном определяется заселенностью состояния поперечного движения, которое формируется при влете частицы в кристалл. В случае позитронов спектр излучения отличается большей монохроматичностью. Это объясняется тем, что при плоскостном каналировании позитронов в параболическом потенциале спектр поперечных энергий эквидистантен (см. рис. 11). Для электронов спектр поперечных энергий существенно неэквидистантен, поэтому излучение при плоскостном каналировании электронов имеет значительно более широкий спектр. Этому же способствует и то, что вероятность радиационных переходов в потенциале, характерном для электронов, при увеличении разности квантовых чисел $(i-f)$ падает более медленно, чем в параболическом потенциале.

Сравнение показывает, что характерные частоты излучения электронами в несколько раз выше, чем позитронами. Это объясняется тем, что

* Н.К.Булгаков и др. Препринт ОИЯИ I-83-731, Дубна, 1983 г.

** М.Д.Бавижев и др. Препринт ОИЯИ P13-81-644, Дубна, 1981 г.

*** Н.К.Булгаков и др. Препринт ОИЯИ I-83-621, Дубна, 1983 г.

эффективная ширина потенциальной ямы для электронов меньше, чем для позитронов ($\sigma < d/2$). На рис. II вертикальными линиями показаны характерные частоты излучения для различных значений поперечной энергии.

На рис. I2 приведены распределения событий по углам вылета γ -квантов из кристалла для различных диапазонов углов входа электронов. Измерялась вертикальная проекция углов вылета γ -квантов относительно горизонтальной плоскости. Кристаллографическая плоскость (110) при этом располагалась горизонтально. Обтирались γ -кванты с энергией в области максимума спектральной плотности излучения.

Сплошными кривыми показан результат аппроксимации экспериментальных данных распределением Гаусса.

Угловое распределение излучения для электронов значительно шире аналогичных распределений для позитронов (для позитронов $\sigma \sim 40 - 50$

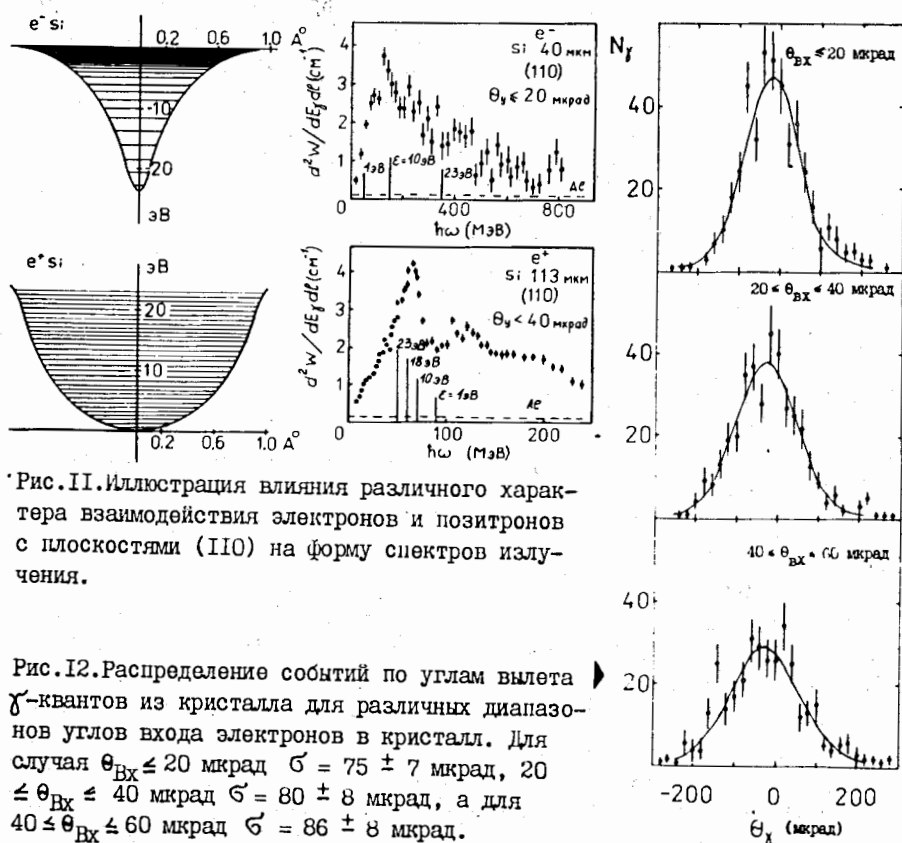


Рис. II. Иллюстрация влияния различного характера взаимодействия электронов и позитронов с плоскостями (110) на форму спектров излучения.

Рис. I2. Распределение событий по углам вылета γ -квантов из кристалла для различных диапазонов углов входа электронов в кристалл. Для случая $\theta_{Bx} \leq 20$ мкрад $\sigma = 75 \pm 7$ мкрад, $20 \leq \theta_{Bx} \leq 40$ мкрад $\sigma = 80 \pm 8$ мкрад, а для $40 \leq \theta_{Bx} \leq 60$ мкрад $\sigma = 86 \pm 8$ мкрад.

мкрад). Это различие определяется, в основном, неэквидистантностью спектра поперечных энергий для электронов.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

1. Экспериментально исследовано излучение γ -квантов электронами с энергией 10 ГэВ, движущимися под малыми углами относительно кристаллографической оси <111> в тонком монокристалле кремния. Изучены ориентационные зависимости вероятности излучения и радиационных потерь энергии электронами. Показано, что максимальная величина на спектральной плотности излучения в процессе осевого каналирования превышает соответствующую величину тормозного излучения из аморфной мишени в 70 раз. Впервые исследованы характеристики излучения в различных диапазонах углов входа внутри критического угла каналирования.

2. Детально исследованы характеристики γ -излучения, возникающего в процессе плоскостного каналирования электронов с энергией 10 ГэВ в тонком монокристалле. Показано, что спектральная плотность излучения в 28 раз превосходит соответствующую величину для аморфной мишени.

3. Впервые исследованы угловые характеристики γ -квантов, излучаемых электронами в процессе каналирования. Показано, что, как в процессе осевого, так и в процессе плоскостного каналирования, излучение носит строго направленный характер. В случае осевого каналирования среднеквадратичное отклонение углового распределения составляет величину, приблизительно совпадающую с критическим углом каналирования для данной энергии. Для плоскостного каналирования значение этой величины приблизительно равно 80 мкрад.

4. Получены данные, характеризующие радиационные потери энергии электронами при их движении вблизи кристаллографической оси и плоскости. Электроны в процессе осевого каналирования могут терять энергию на излучение до 10 ГэВ в пересчете на 1 см кристалла Si.

5. Создана экспериментальная установка, работавшая на пучке электронов и позитронов ускорителя ИФЭ. Параметры установки позволили детально исследовать процессы спонтанного γ -излучения, возникающего при каналировании электронов и позитронов с энергией 10 ГэВ в монокристаллах кремния и германия. Установка давала возможность с высокой точностью восстанавливать траектории частиц до и после кристалла, измерять импульс вторичной частицы, производить ее идентификацию, определять угол вылета γ -кванта и его энергии.

6. Создан гамма-спектрометрический комплекс для измерения энергетических и угловых характеристик потока γ -квантов. Впервые создан

ливневый сцинтилляционный спектрометр, который был настроен на измерение энергии γ -квантов в диапазоне от 10 МэВ до 10 ГэВ. Получено энергетическое разрешение на уровне лучших приборов такого класса. Впервые использовался способ абсолютной калибровки сцинтилляционного детектора полного поглощения методом "меченых" фотонов, основанный на корреляции потерь энергии электроном, измеренных дрейфовым магнитным спектрометром, и отсчетами сцинтилляционного детектора. Детектор впервые работал совместно с дрейфовой камерой со встроенным конвертором. Такое сочетание приборов позволило одновременно измерять энергетические и угловые характеристики потока γ -квантов. Впервые в электронике спектрометра применялся временной тракт, который использовался для селекции регистрируемых частиц в диапазоне ± 5 нс. Корреляция временной и амплитудной информации позволила получить временное разрешение около 10 нс и в 100 раз уменьшить фон. Впервые была применена регистрация "нулевого" потенциала спектрометрических трактов за 2 мкс до рабочего измерения. Эта информация использовалась для коррекции энергетических измерений при анализе данных. Впервые использовалась информация об ионизационных потерях фоновых μ -мезонов, регистрируемых в процессе растяжки пучка ускорителя, дававшая стабильный репер для калибровки и контроля детектора.

7. Предложена и внедрена методика работы со спектрометрическим фотоумножителем типа ФЭУ-49 для измерения энергии γ -квантов в широком динамическом диапазоне (от 10 МэВ до 10 ГэВ) в условиях высоких нагрузок.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. А.С.Водопьянов, ... Р.Б.Кадыров и др. Препринт ОИЯИ Р13-82-547, Дубна, 1982 г; Nucl. Instr. and Meth. 1983, v.211, p.353.
2. Н.К.Булгаков, ... Р.Б.Кадыров и др. Препринт ОИЯИ I-83-640, Дубна, 1983 г.
3. Н.К.Булгаков, ..., Р.Б.Кадыров и др. Препринт ОИЯИ I3-84-676, Дубна, 1984 г.
4. Н.К.Булгаков, ..., Р.Б.Кадыров и др. Препринт ОИЯИ P1-85-27, Дубна, 1985 г.
5. Н.К.Булгаков, ..., Р.Б.Кадыров и др. Препринт ОИЯИ P1-85-28, Дубна, 1985 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 марта 1986 года.