

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 621.039.8

ВАРТАНОВ КРИЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ
АЛМАЗА, КРЕМНИЯ, ГЕРМАНИЯ

(01.04.16 - Физика ядра и элементарных частиц)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ереван-1990

Работа выполнена в Ереванском физическом институте
Научные руководители - академик АН Республики Армения,

доктор физико-математических наук, профессор Г.А.Вартапетян
- кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник А.О.Аганьянц

Официальные оппоненты

- доктор физико-математических наук А.П.Потелицын (НИИЯФ при политехническом институте, г.Томск),
кандидат физико-математических наук А.Т.Маркрян (ЕрФИ)

Ведущая организация - Харьковский физико-технический институт

Защита состоится "27" ноября 1990г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета Д.034.03.01 при Ереванском физическом институте (г.Ереван, ул. братьев Алиханянов, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института.

Автореферат разослан "24" октября 1990г.

Ученый секретарь
специализированного совета

В.А.Шахбазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Поиск новых источников интенсивной генерации фотонов в разных диапазонах частот способствовал в последние десятилетия развитию теоретических и экспериментальных исследований различных типов электромагнитного излучения релятивистскими электронами в сильных кристаллических полях.

Результаты подобных исследований привели к обнаружению нового типа излучения при каналировании заряженных частиц в кристаллах.

Отметим, что влияние каналирования на излучение частицами в кристалле наблюдалось в ряде экспериментальных работ, выполненных в конце пятидесятых, начале семидесятых годов, которые выявили противоречия с существующей теорией когерентно-тормозного излучения при малых углах влета электронов и позитронов в кристалл по отношению к главным кристаллографическим направлениям.

Явление каналирования существенно образом изменяет динамику движения заряженной частицы, когда последняя влетает в кристалл под малым углом $\theta \leq \theta_L$ (θ_L - критический угол каналирования Линдхарда).

Отличительной чертой движения релятивистской частицы в условиях каналирования является подавление рассеяния на большие углы, при этом поперечное движение ограничивается межатомными расстояниями. Захват в режим каналирования определяется соотношением между E_L - энергией поперечного движения и $U(x)$ - максимальной (по модулю) величиной непрерывного потенциала поля атомной плоскости или цепочки. Если частица движется в канале, образованном атомами кристаллографических плоскостей или осей, ее поперечная энергия принимает различные дискретные значения. При переходе между этими уровнями частицы могут излучать фотоны в рентгеновском и γ -диапазонах.

Цикл экспериментальных и теоретических работ, выполненных в последние годы, указывает на сложный механизм взаимодействия легких заряженных частиц с монокристаллами при малых углах влета относительно кристаллографических осей и плоскостей. Теоре-

тически были предсказаны такие особенности излучения при каналировании электронов, как направленность, большая спектральная плотность, квазимонохроматичность, высокая степень поляризации, а также существование оптимальной энергии для спектральной плотности излучения каналированных частиц для кристалла алмаза, приблизительно равной 5 ГэВ. Полученные теоретические предсказания требуют тщательной экспериментальной проверки. С этой точки зрения исследования, проведенные на внутреннем электронном пучке Ереванского синхротрона, являются весьма актуальными.

Цель работы. Основная цель настоящей работы заключается в исследовании спектрально-угловых и интегральных характеристик излучения электронов высоких энергий при малых углах влета относительно кристаллографических осей и плоскостей монокристаллов алмаза, кремния, германия.

Научная новизна работы. На внутреннем пучке Ереванского синхротрона создана одна из первых в мире установок для выполнения цикла работ по исследованию характеристик излучения каналированных электронов, движущихся под малыми углами к плоскости и оси кристалла.

Впервые разработан и внедрен новый способ относительного мониторинга электронов, проходящих через исследуемые монокристаллические мишени, по их синхротронному излучению методом быстрого сброса ускоренного пучка на исследуемую мишень. Для регистрации СИ впервые был применен специально сконструированный монитор вторичной эмиссии.

Впервые осуществлен новый метод поиска "нулевой" ориентации кристаллов.

Впервые разработан и осуществлен контроль:

- а) расположения исследуемой кристаллической мишени в вакуумной камере ускорителя относительно входного отверстия первого коллиматора и мишени парного магнитного γ -спектрометра;
- б) расходимости электронного пучка.

Впервые зарегистрировано остронаправленное излучение каналированных электронов с высокой спектральной плотностью на плоскости монокристалла алмаза и детально исследованы спектрально-угловые зависимости излучения каналированных электро-

нов с энергией 4.4 ГэВ в низкоэнергетической области энергий на плоскости и оси монокристаллов алмаза, кремния и германия.

Впервые измерены ориентационные зависимости интегральных выходов излучения каналированных электронов с энергией 4.4 ГэВ относительно плоскости и оси кристаллов алмаза, кремния и германия.

Научная и практическая ценность работы. Созданная экспериментальная установка, включающая в себя электронный синхротрон с энергией 4.4 ГэВ с уникально малой расходимостью электронного пучка, сбрасываемого на исследуемую кристаллическую мишень при его большой интенсивности; гониометр для ориентации монокристаллической мишени и парный магнитный γ -спектрометр в расширенном диапазоне энергий 0.02-5 ГэВ, может быть использована для исследования процессов, протекающих с малыми сечениями (измерения угловых распределений γ -квантов с фиксированной энергией из жесткой части спектра излучения), а также целого ряда экспериментов по взаимодействию электронов высоких энергий с монокристаллами.

Предложенная методика быстрого сброса ускоренного пучка на исследуемую мишень позволит решить задачу относительного мониторинга электронов, что позволит отказаться от сооружения дорогостоящих специально выведенных электронных пучков.

Использование монитора вторичной эмиссии в качестве монитора электронов и позитронов, движущихся в магнитном поле, позволяет выполнить различного рода эксперименты по исследованию взаимодействия заряженных частиц с ориентированными кристаллами, для которых малая угловая расходимость циркулирующих частиц - крайне важное и необходимое условие; получать информацию о параметрах пучка электронов или позитронов в широком диапазоне энергий и интенсивностей первичного пучка. При калибровке детектора по величине тока циркулирующих частиц в кольце ускорителя возможно получение абсолютного монитора и использование его на коллайдерах и накопительных кольцах.

Предложенная методика поиска "нулевой" ориентации кристаллов позволит просто и быстро ориентировать мишени под

пучком заряженных частиц в различных физических исследованиях и с хорошей точностью идентифицировать кристаллографические направления при составлении "карт" плоскостей монокристалла.

Обнаруженное остронаправленное излучение каналированных электронов с высокой спектральной плотностью на плоскости монокристалла алмаза и детальное исследование спектрально-угловых характеристик излучения каналированных электронов с энергией 4.4 ГэВ в низкоэнергетической области энергий на плоскости и оси монокристаллов алмаза, кремния и германия могут быть использованы для дальнейшего развития представлений о характере взаимодействий заряженных частиц при малых углах влета с сильными кристаллическими полями.

Полученные экспериментальные данные ориентационных зависимостей интегральных выходов спектрально-угловых характеристик излучения каналированных электронов и их сравнение с теоретическими предсказаниями способствуют развитию теории излучения и динамики прохождения электронов высоких энергий в монокристаллах.

На защиту выносятся:

1. Создание экспериментальной установки на тракте внутреннего пучка Ереванского синхротрона для исследования процессов взаимодействия электронов высоких энергий с монокристаллическими мишенями.

2. Методика экспериментального исследования характеристик процессов излучения электронов с энергией 4.4 ГэВ в монокристаллах.

3. Экспериментальные результаты исследования спектрально-угловых и интегральных характеристик излучения электронов с энергией 4.4 ГэВ в монокристаллах алмаза, кремния, германия.

Апробация работы: Основные результаты, включенные в диссертацию, доложены на Сессии Совета "Электромагнитные взаимодействия адронов в резонансной области энергий (Харьков, 1977 г.); Собрании по радиационным явлениям в твердых телах (Киев, 1978 г.); I-ой Всесоюзной школе по взаимодействию ускоренных частиц с веществом (Томск, 1979 г.); Международной конференции (Гамильтон, 1979 г.); IX-XIII Всесоюз-

ных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами (Москва, 1979-1988 гг.); II-ой Всесоюзной конференции по электромагнитному излучению релятивистских частиц в кристаллах (Терскол, 1983 г.) и на семинарах ЕрФИ.

Публикации. Основной материал диссертации опубликован в девяти статьях в журналах "Ядерная физика", "Письма в ЖЭТФ", "ЖЭТФ", "Известия АН Армении", а также в виде препринтов ЕФИ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она изложена на 82 страницах машинописного текста, содержит 5 таблиц и 22 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 84 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность исследования излучения электронов высоких энергий при малых углах влета в кристалл, приводится краткий обзор литературы, посвященной проблеме излучения и рассеяния электронов и позитронов высоких энергий в монокристаллах, рассматривается сложившаяся к началу работы экспериментальная ситуация, сформулирована основная цель и краткое содержание каждой из глав диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются необходимые сведения о когерентном тормозном излучении, обсуждаются вопросы применимости формул КТИ в области малых углов влета электронов в кристалл, используемые в диссертации, приведены некоторые элементы из теории излучения каналированных электронов, а также излучение квазиканализированных или надбарьерных частиц.

Во второй главе диссертации описывается экспериментальная установка и методические исследования. На внутреннем пучке Ереванского синхротрона создана одна из первых в мире экспериментальных установок, предназначенная для исследования излучения каналированных электронов. Отличительной особенностью нашей установки является уникально малая расходимость электронного пучка, сбрасываемого на кристаллическую мишень при его большой интенсивности. Подробно описан усовершенствованный нами парный магнитный γ -спектрометр (был расширен

диапазон измеряемых энергий γ -квантов в низкоэнергетическую область, улучшены фоновые условия регистрируемых e^+e^- пар, проведены контрольные измерения напряженности магнитного поля для разных значений тока магнита, выполнена калибровка парного магнитного спектрометра (ПМС) методом "токонесущей нити под напряжением" при разных токах магнита СИ-57. В диапазоне низких энергий метод нити с удовлетворительной точностью удалось применить при токе $J = 250$ А.

Подробно излагается предложенная нами методика относительного мониторинга электронов. Нами был разработан метод косвенного мониторинга, заключающийся в том, что перед измерениями в режиме медленного сброса синхротрон временно переводится в режим быстрого сброса, при котором количество пересечений мишени n , если ее толщина l_d во много раз меньше радиационной длины вещества мишени L_{rad} , не будет зависеть от угла влета электронов.

В новом способе сброса так же, как и при медленном сбросе, производится локальное возмущение равновесной орбиты, но пучок подводится к мишени приблизительно на 1 мсек позже, в момент достижения максимума магнитного поля, и в этот момент выключается ускоряющее ВЧ поле (рис. 1). Мониторинг в режиме указанного быстрого сброса путем регистрации синхротронного излучения ускоренных первичных электронов производится детектором СИ. В качестве детектора СИ впервые был применен монитор вторичной эмиссии.

Предложен новый способ поиска "нулевой" ориентации кристалла по максимуму неупругих потерь ускоренных электронов в их ориентационной зависимости. Потери энергии определялись по недостающей энергии неупруго рассеянных в кристалле электронов. При потере энергии в мишени до нескольких десятков МэВ, электрон с равновесной орбиты может быть выброшен на стенку вакуумной камеры в области, где производят локальное возмущение орбиты при сбросе пучка на мишень. Продукты взаимодействия со стенкой регистрируются сцинтилляционным счетчиком, число отсчетов которого на выходе дискриминатора-формирователя катастрофически растет с увеличением интенсивности при приближении к "нулевой" ориентации, а осциллограммы кар-

тины сброса по сигналам счетчика становятся сильно асимметричными, возникают изломы (рис. 2).

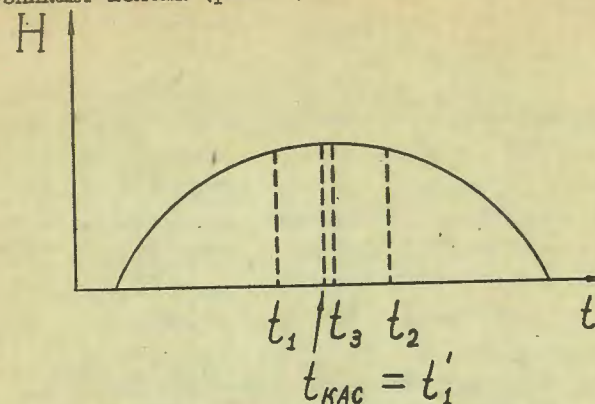


Рис. 1. Временная зависимость процесса сброса пучка электронов на исследуемую мишень: H - магнитное поле; t_3 - момент времени достижения максимума магнитного поля; t_1 - время начала сброса пучка на мишень синхротрона; t_2 - время выключения ускоряющего ВЧ поля в режиме медленного сброса; t'_1 - время касания и одновременно время выключения ВЧ поля в режиме быстрого сброса.

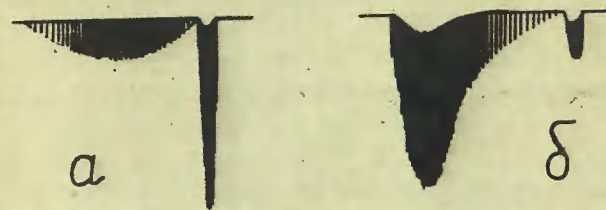


Рис. 2. Осциллографическая картина сброса электронного пучка на исследуемую мишень: а) разориентированный кристалл; б) кристалл ориентирован плоскостью (011) параллельно направлению движения электронов.

Предложен способ контроля за расходимостью электронного пучка синхротрона по измерению укороченного спектра на эталонном кристалле алмаза.

Описан критерий правильного расположения исследуемой кристаллической мишени в вакуумной камере ускорителя относительно входного отверстия первого коллиматора и мишени парного магнитного γ -спектрометра. Контроль производился по максимуму выхода полной энергии излучения в режиме быстрого сброса ускоренного пучка на мишень. По нашим оценкам, расходимость электронного пучка составляет $\lesssim 5 \cdot 10^{-5}$ рад. Такой результат получен на основе измерений вертикального размера пятна от синхротронного излучения.

В третьей главе приведены результаты исследования впервые зарегистрированного интенсивного остронаправленного излучения каналированных электронов на плоскости монокристалла алмаза. Кроме того, были выполнены измерения на оси кристалла алмаза (рис. 3), исследовалась также ориентационная зависимость выхода γ -квантов с фиксированной энергией как для осевого, так и для плоскостного каналирования (рис. 4).

Рис. 4 демонстрирует, что центральная угловая область $\theta \approx 0 \pm 0.1$ мрад вносит заметный вклад в излучение фотонов в диапазоне энергий $E_\gamma = 10 \pm 150$ МэВ, что свидетельствует о том, что излучение электронов направлено вперед и сосредоточено в узком конусе.

Были получены также зависимости интегрального выхода γ -квантов на алмазе для осевого и плоскостного каналирования (рис. 5), для осевого случая измерены коллимационные зависимости.

Для дальнейшего понимания механизма взаимодействия заряженных частиц с кристаллическими структурами были необходимы всесторонние исследования рассеяния электронов и различных характеристик излучения, таких, как угловые характеристики интегрального выхода излучения, поведение жесткой части спектра; коллимационные зависимости выходов фотонов в широком диапазоне величин $x = \hbar\omega/E$ и E ($\hbar\omega$ - энергия γ -кванта; E - начальная энергия электронов). Кроме того, представляет интерес информация, полученная в экспериментах с различными ве-

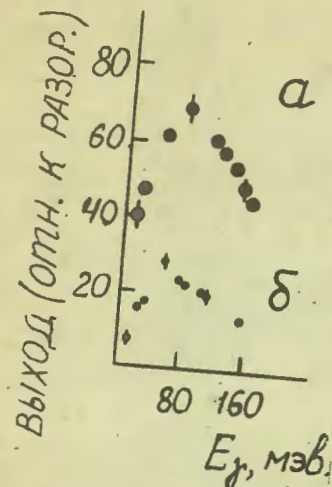


Рис. 3. Отношение выхода γ -квантов при каналировании к выходу фотонов из разориентированной мишени: а) $\bullet\bullet\bullet$ - ось $[100]$; б) $\blacklozenge\blacklozenge\blacklozenge$ - плоскость (011) . $E_e = 4.7$ ГэВ; $\theta_{кол.} = 0.6 \cdot 10^{-4}$ рад. Толщина алмаза - 100 мкм.

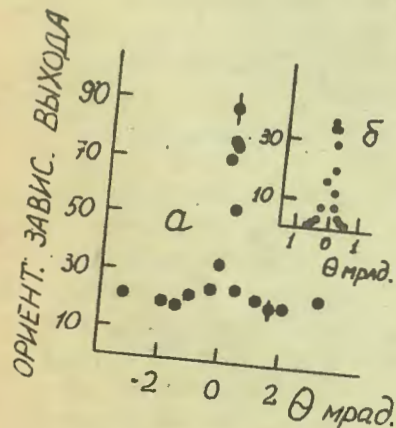


Рис. 4. Ориентационная зависимость выхода γ -квантов с фиксированной энергией к выходу из разориентированной мишени: а) - ось $[100]$; $E_\gamma = 90$ МэВ; б) - плоскость (100) ; $E_\gamma = 45$ МэВ. Толщина алмаза - 100 мкм.

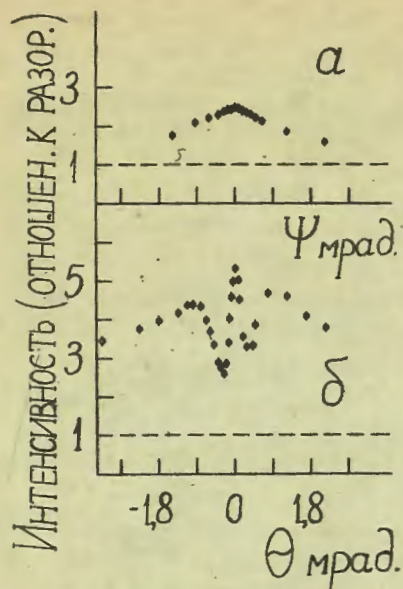


Рис. 5. Зависимость полной энергии γ -излучения от угла влета относительно плоскости (011) (а) и оси [100] (б) монокристалла алмаза толщиной 72 мкм. Выход излучения дан по отношению к разориентированному кристаллу.
 $\theta_{кол.} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $E_{e^-} = 4.4$ ГэВ.

ществами, которые имеют одинаковую кристаллическую структуру, например, алмаз, кремний и германий.

На рис. 6 и 7 приведены полученные на кристалле кремния и германия ориентационные зависимости выходов полной энергии фотонов при угле коллимации, равном $\pm 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад., нормированные на соответствующий выход от разориентированного кристалла для плоскостного и осевого каналирования. Сравнения полученных кривых для разных веществ показывают, что относительные выходы полной энергии в случае плоскости на кремнии и германии занижены по сравнению с алмазом; все кривые имеют пиковую структуру, которая ярче проявляется на кремнии и германии. Угловые ширины в ориентационной зависимости излучения у всех кристаллов приблизительно равны, хотя угол каналирования в германии больше, чем в алмазе (табл. I). В осевом случае относительные выходы полной энергии излучения на кремнии и германии также занижены по сравнению с алмазом. Все кривые обнаруживают яркую структуру, имеющую пик в центральной об-

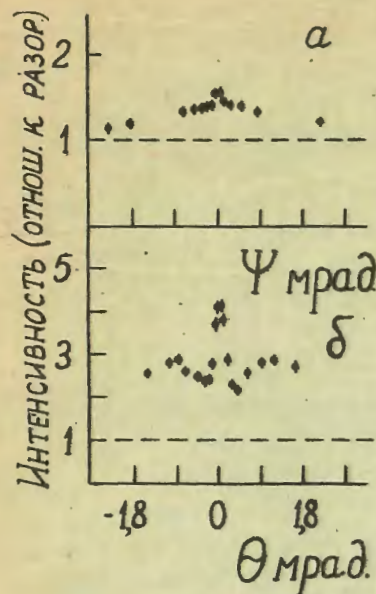


Рис. 6. То же самое, что и на рис. 5, но в случае монокристалла кремния толщиной 90 мкм.

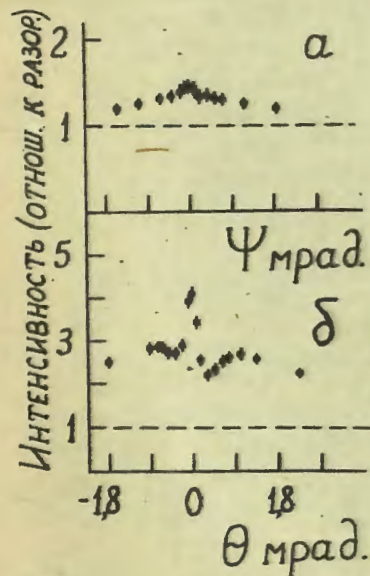


Рис. 7. То же самое, что и на рис. 5, но в случае монокристалла германия толщиной 110 мкм.

ласти и ослабление выхода излучения в области $\Delta\psi \sim 0.2 + 0.8$ мрад. Угловые ширины центральных пиков приблизительно одинаковы для всех кристаллов, что также удивительно.

Углы каналирования (10^{-4} рад) Таблица I

Кристаллы	Плоскость (011)	Ось [100]
Алмаз	1.01	2.1
Кремний	1.03	2.02
Германий	1.6	2.7

Проведено детальное экспериментальное изучение низкоэнергетических спектров излучения электронов с энергией $E_e = 4.4$ ГэВ в монокристаллах кремния и германия при различных углах влета θ относительно кристаллографической оси [100] и плоскости (011). Угол коллимации излучения во всех измерениях составлял $\pm 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад, измерения выполнялись при помощи парного магнитного γ -спектрометра с точностью 10% в диапазоне энергий $20+200$ МэВ и $6+3\%$ - в области $300+4500$ МэВ.

На рис. 8-11 представлены низкоэнергетические спектральные зависимости излучения при пролете электронов параллельно, либо под малыми углами к плоскостям и осям кремния и германия. Как видно из рис. 8-11, все плоскостные и осевые спектры обнаруживают ярко выраженную пиковую структуру. Кроме того, как в осевых, так соответственно и в плоскостных спектрах пиковые энергии равны для всех исследуемых кристаллов, вопреки предполагаемой зависимости основной частоты излучения от порядкового номера элемента Z , составляющего кристалл, $\omega \sim Z^{3/2}$. Основная частота излучения (для плоскости $\omega_{лик} \approx 50$ МэВ, оси - $\omega_{лик} \approx 75$ МэВ) не изменяется также от угла влета электронов в пределах угла Линдхарда. Спектральная полуширина на полувысоте в случае плоскости уменьшается с ростом Z , а на оси спектральные полуширины в пиковой области примерно одинаковы (табл. 2).

Приведены сравнения спектральных характеристик излуче-

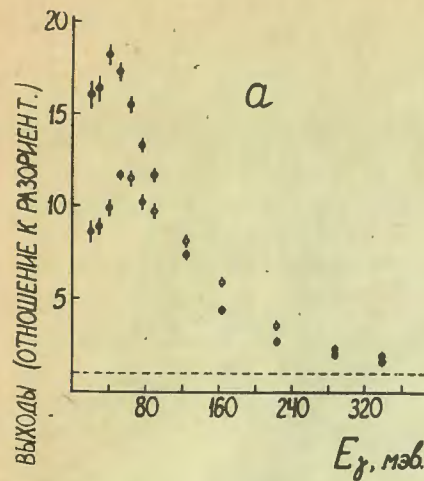


Рис. 8. Спектры излучения электронов из монокристалла кремния при углах влета относительно плоскости (011):

● - $\theta = 0$;
○ - $\theta = 1.3 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $\theta_{кол.} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $E_e = 4.4$ ГэВ.

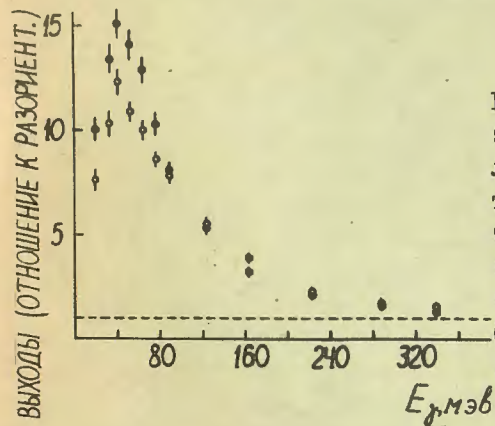


Рис. 9. Спектры излучения электронов из монокристалла германия при углах влета относительно плоскости (011):

● - $\theta = 0$;
○ - $\theta = 1.3 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $\theta_{кол.} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $E_e = 4.4$ ГэВ.

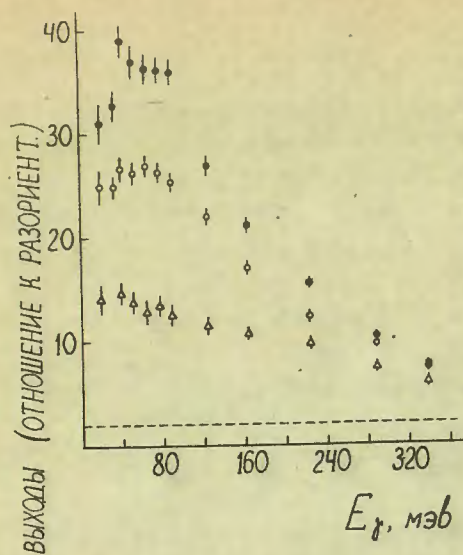


Рис. 10. Спектры излучения электронов из монокристалла кремния при углах влета относительно оси [100]:
 ● - $\theta = 0$;
 ○ - $\theta = 1.3 \cdot 10^{-4}$ рад;
 △ - $\theta = 3 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $E_e = 4.4$ ГэВ;
 $\theta_{\text{кол}} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад.

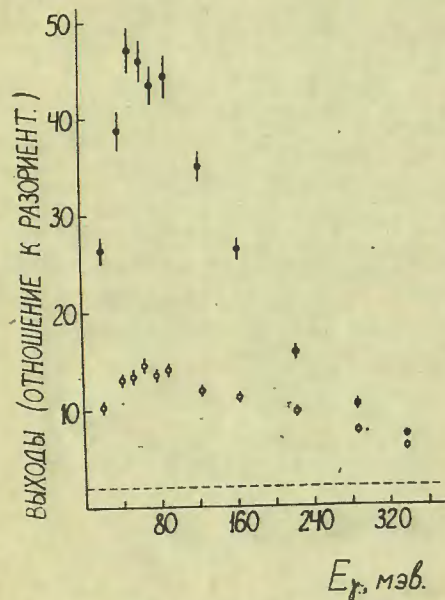


Рис. 11. Спектры излучения электронов из монокристалла германия при углах влета относительно оси [100]:
 ● - $\theta = 0$;
 ○ - $\theta = 3 \cdot 10^{-4}$ рад;
 $E_e = 4.4$ ГэВ;
 $\theta_{\text{кол}} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ рад.

ния с теоретическими расчетами различных теоретических групп.

Таблица 2

Спектральные полуширины кристаллов

Кристаллы	Плоскость (011) полуширина на полу- высоте (МэВ)	Ось [100] полуширина на полу- высоте (МэВ)
Алмаз	45 ± 3	60 ± 5
Кремний	35 ± 3	65 ± 5
Германий	30 ± 3	65 ± 5

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

1. На базе имевшейся установки, предназначенной для исследований процессов фоторождения мезонов и резонансов, основу которой составляли электронный синхротрон с энергией 4.7 ГэВ с рекордно малой расходимостью циркулирующего электронного пучка; гониометр для ориентации монокристаллической мишени и парный магнитный γ -спектрометр для регистрации γ -квантов в интервале энергий 0.6+5 ГэВ, была создана одна из первых в мире установок для выполнения цикла работ по исследованию характеристик излучения каналированных электронов, движущихся под малыми углами к плоскости и оси кристалла. Были проведены следующие модификации:

а). Расширен диапазон регистрируемых γ -квантов в низкоэнергетической области энергий от 600 до 10 МэВ.

б). Сведено до минимума количество вещества на пути γ -квантов и конвертируемой пары e^+e^- в вакуумном тракте γ -пучка, что существенно улучшило фоновые условия и уменьшило углы многократного рассеяния пары e^+e^- .

2. Разработан и внедрен новый способ относительного мониторинга электронов, проходящих через исследуемые монокристаллические мишени, по их синхротронному излучению методом быстрого сброса ускоренного пучка на исследуемую мишень. Для регистрации СИ впервые был применен специально сконструированный монитор вторичной эмиссии, кото-

рый также может найти применение в накопителях и коллайдерах.

3. Осуществлен новый метод поиска "нулевой" ориентации кристаллов по максимуму неупругих потерь энергии ускоренных электронов в их ориентационной зависимости.

4. Разработан и осуществлен контроль:

а) расположения исследуемой кристаллической мишени в вакуумной камере ускорителя относительно входного отверстия первого коллиматора и мишени парного магнитного γ -спектрометра;

б) расходимости электронного пучка по укороченному спектру на эталонном кристалле.

5. Впервые зарегистрировано остронаправленное излучение каналированных электронов с высокой спектральной плотностью на плоскости монокристалла алмаза и детально исследованы спектрально-угловые зависимости излучения каналированных электронов с энергией 4.4 ГэВ в низкоэнергетической области энергий на плоскости и оси монокристаллов алмаза, кремния и германия.

6. Измерены ориентационные зависимости интегральных выходов излучения каналированных электронов с энергией 4.4 ГэВ относительно плоскости и оси кристаллов алмаза, кремния и германия. На монокристалле алмаза для осевого случая исследована полная энергия излучения в зависимости от угла коллимации фотонного пучка. Сложное поведение ориентационных кривых полной энергии излучения указывает на сильное влияние потенциалов кристаллических полей на динамику движения.

Основные результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. Аганьянц А.О., Акопов Н.З., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А. Потери энергии ультрарелятивистских электронов в кристалле алмаза. - Ереван, 1978. - 10 с. Препринт ЕФИ-312(37)-78.

2. Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А., Кумахов М.А., Грикалинос Х., Яралов В.Я. Излучение каналированных электронов с энергией 4.7 ГэВ в алмазе. - Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, вып. 9, с. 554-556.

3. Авакян Р.О., Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А., Тароян С.П. Низкоэнергетические спектры излучения

электронов с энергией 4.7 ГэВ при малых углах влета в кристалл алмаза. - Ереван, 1981. - 8 с. Препринт ЕФИ-466(8)-81.

4. Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А., Марукян Г.О. Ориентационные зависимости тормозного излучения в кристаллах алмаза. - Ереван, 1981. - 14 с. Препринт ЕФИ-468(10)-81.

5. Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А., Яралов В.Я. Излучение электронов при малых углах влета в кристалл алмаза. - Изв. АН Армении, Физика, 1981, т. 16, вып. 3, с. 216-218.

6. Авакян Р.О., Аганьянц А.О., Акопов Н.З., Вартапетян Г.А., Вартанов Ю.А., Лебедев А.Н., Мирзоян Р.М., Тароян С.П., Данагулян С.С. Спектры излучения электронов высоких энергий в монокристаллах различной толщины и ориентации. - ЯФ, 1982, т. 35, вып. 2, с. 387-389.

7. Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А., Лебедев А.Н., Яралов В.Я. Спектрально-угловые зависимости излучения электронов с энергией 4.3 ГэВ при малых углах влета в монокристалл алмаза. - Ереван, 1983. - 12 с. Препринт ЕФИ-666(56)-83.

8. Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Вартапетян Г.А., Карибян В.Б. Исследование излучения электронов с энергией 4.4 ГэВ в ориентированных монокристаллах алмаза, кремния и германия. - ЖЭТФ, 1988, т. 94, вып. 8, с. 73-78.

9. Аганьянц А.О., Вартанов Ю.А., Карибян В.Б., Лебедев А.Н. Установка и методика исследования свойств излучения каналированных в монокристаллах ультрарелятивистских электронов. - Ереван, 1990. - 20 с. Препринт ЕФИ-1127(13)-90.

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 13.10.90г.

Формат 60x84/16

Офсетная печать.

Тираж 170 экз.

Зак. тип. № 287

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул.Братьев Алиханян 2