

Объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
Дубна

1-84-630

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
С ЭНЕРГИЕЙ 10 ГэВ  
В ТОЛСТЫХ КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ  
И ГЕРМАНИЯ

Направлено в "Письма в ЖЭТФ"

1984



Н.К.Булгаков, А.С.Водопьянов, И.Войтковска, В.М.Головатюк,  
Э.Гузик, Н.И.Зимин, Р.Б.Кадыров, Т.С.Нигманов, В.Д.Рябцов,  
И.А.Тяпкин, Н.А.Филатова, А.Форыcki, Э.Цыганов, М.Д.Шафранов  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

М.Д.Бавижев

Филиал Ставропольского политехнического института, Черкесск

И.Н.Ивахненко, Ю.В.Нильсен, Б.А.Юрьев

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

Г.Д.Коваленко, Б.И.Шраменко

Харьковский физико-технический институт

Р.Карриган /мл./, Т.Туиг

Национальная ускорительная лаборатория им. Ферми, Батавия, США

У.Гибсон, Ч.Сан, Р.Вонг

Университет штата Нью-Йорк, Олбани, США

Экспериментальные исследования <sup>/1-4/</sup> ранее предсказанной радиации релятивистских электронов и позитронов <sup>/5/</sup> продемонстрировали существенное возрастание спектральной плотности излучения заряженных частиц, прошедших кристалл вдоль одного из главных кристаллографических направлений.

В данной работе исследуется излучение электронов с энергией 10 ГэВ, прошедших монокристаллы кремния толщиной 0,8; 3,0 и 10 мм и германия толщиной 0,5 мм под малыми углами к направлению кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ .

Экспериментальная установка "Кристалл" <sup>/6/</sup> была размещена на выведенном электрон-позитронном пучке <sup>/7/</sup> ускорителя ИФВЭ /Серпухов/. Схема спектрометра показана на рис.1. Монокристаллы помещались внутри дистанционно управляемого гониометра и ориентировались так, чтобы направление оси  $\langle 111 \rangle$  совпадало с направлением падающего пучка электронов. С помощью 4 блоков дрейфовых камер, входящих в установку, измерялись угловые характеристики электронов, при этом точность определения углов входа частиц в кристалл в сеансах без мишени составила ~6 мкрад, а углов выхода - ~30 мкрад /с учетом многократного рассеяния в веществе дрейфовой камеры ДК2/. Энергия фотонов измерялась сцинтилляционным  $\gamma$ -спектрометром на основе кристалла CsJ(Tl), который имел форму цилиндра с диаметром 150 мм и длину вдоль пучка 230 мм. Детектор был окружен счетчиками антисовпадений и свинцовой защитой, перед которой был расположен коллиматор с апертурой +1 мрад. При энергии  $\gamma$ -квантов около 100 МэВ детектор имел разрешение ~3% /полная ширина распределения на половине высоты/. Непосредственно перед  $\gamma$ -спектрометром размещался специально разработанный блок дрейфовых камер <sup>/8/</sup> со встроенным конвертором, который использовался для восстановления координаты вершины конверсии  $\gamma$ -кванта в вертикальной проекции. Конвертировалось около 6% всех  $\gamma$ -квантов, попавших в рабочую область детектора. Координатное разрешение этой камеры позволило с высокой точностью измерить углы вылета фотонов из кристалла. Идентификация электронов производилась черенковским счетчиком полного поглощения с радиатором из свинцового стекла. Энергия частиц после прохождения мишени определялась по отклонению в анализирующем магните /МЗ/. Количество фонового вещества установки не превышало  $5 \times 10^{-4}$  радиационных длин. Спектрометр запускался системой счетчиков совпадений и антисовпадений и работал на линии с ЭВМ ЕС-1040. В ходе набора статистики регулярно производились тестовые запуски с целью контроля стабильности работы функциональных узлов установки.



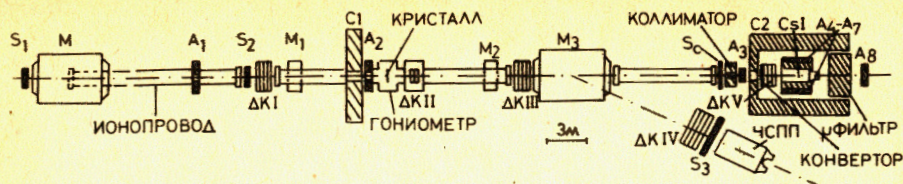


Рис.1. Схема установки "Кристалл". S1, S2, S3, A1-A7 - сцинтилляционные счетчики, M1-M2 - корректирующие магниты, M3 - анализирующий магнит, ДС1-ДС5 - блоки дрейфовых камер, С1-С2 - коллиматоры, CsJ(Tl) - спектрометр  $\gamma$ -квантов, PbG1 - черенковский счетчик полного поглощения, М - магнит системы транспортировки пучка.

При обработке данных отбирались события, удовлетворяющие требованиям идентификации электронов черенковским счетчиком полного поглощения и сопровождающиеся излучением  $\gamma$ -кванта с энергией выше 3 МэВ. Спектральная плотность излучения нормировалась на один падающий электрон и на длину кристалла. При этом в число первичных электронов вносилась поправка, связанная с геометрией эксперимента, а в число зарегистрированных  $\gamma$ -квантов - поправка на эффективность  $\gamma$ -детектора и эффективность восстановления треков.

Основной целью эксперимента являлось исследование спектральных характеристик излучения каналированных частиц. Проведенные нами ранее исследования<sup>19)</sup> показали, что спектральная плотность излучения электронов, прошедших тонкий монокристалл кремния в режиме осевого каналирования, имеет максимум при энергии  $\gamma$ -квантов около 200 МэВ и в этой области превышает соответствующую величину для аморфной мишени примерно в 70 раз. В кристаллах большей толщины из-за многократного рассеяния, связанного с тепловыми колебаниями атомов решетки, рассеяния на электронах и на дефектах кристалла происходит нарушение режима устойчивого движения частиц в каналах, что приводит к деканализованию. С другой стороны, при движении частицы вдоль цепочки атомов вероятность излучения заметно больше, чем в аморфном веществе. Это приводит к тому, что в толстых кристаллах возможно излучение нескольких фотонов одним электроном, которые воспринимаются  $\gamma$ -спектрометром как один  $\gamma$ -квант суммарной энергии. В связи с этим в нашем случае экспериментально измеренная спектральная плотность излучения в исследуемых образцах является проинтегрированной по нескольким  $\gamma$ -квантам. Такие распределения для монокристаллов кремния толщиной 0,8 и 3,0 мм приведены на рис.2. Аналогичное распределение для монокристалла кремния толщиной 10 мм представлено на рис.3. На рис.4 и 5 показана экспериментально измеренная спектральная плотность излучения для монокристаллов кремния толщиной 0,8 мм и германия толщиной 0,5 мм для событий

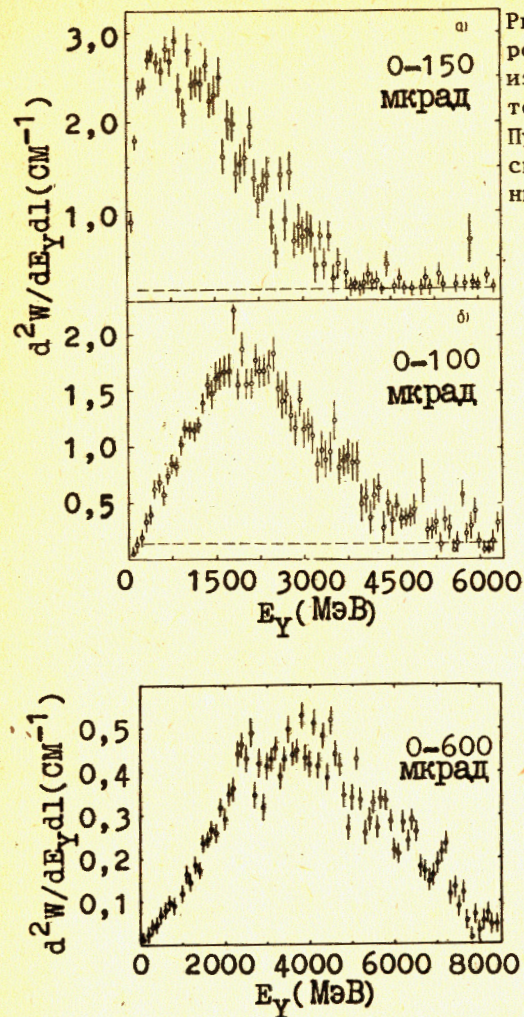


Рис.2. Экспериментально измеренная спектральная плотность излучения в кристаллах кремния толщиной а/ 0,8 мм, б/ 3,0 мм. Пунктирной линией показана спектральная плотность излучения из алюминия той же толщины.

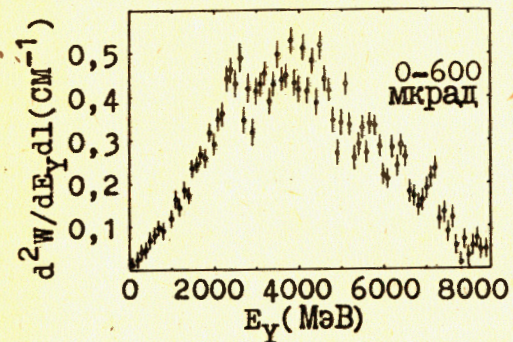
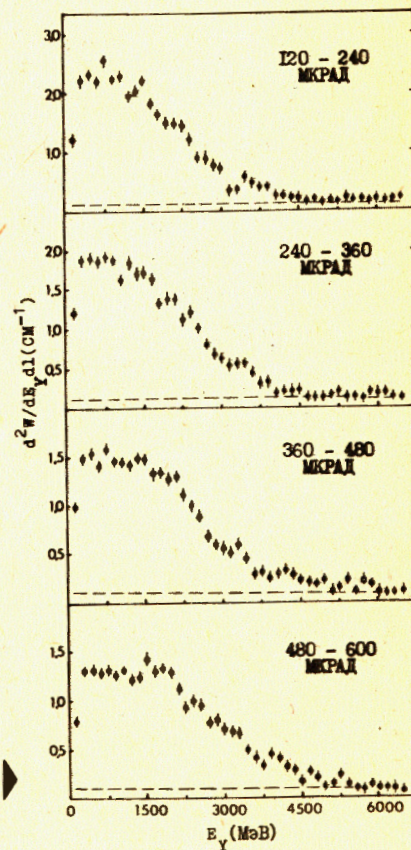


Рис.3. Экспериментально измеренная спектральная плотность излучения в монокристалле кремния толщиной 10 мм для событий с углами входа относительно оси от 0 до 600 мкрад.

Рис.4. Экспериментально измеренная спектральная плотность излучения электронов в кристалле кремния толщиной 0,8 мм для событий с различными углами входа относительно оси.





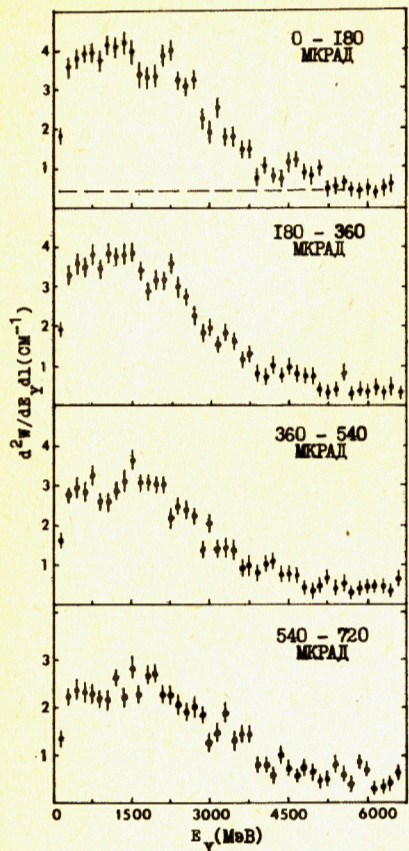


Рис.5. Экспериментально измеренная спектральная плотность излучения электронов в кристалле германия толщиной 0,5 мм для событий с различными углами входа относительно оси.

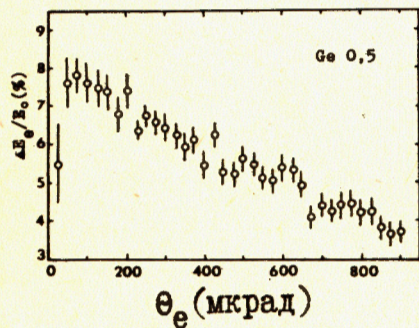


Рис.7. Зависимость средних относительных потерь энергии электронов в монокристалле германия толщиной 0,5 мм от полярного угла входа в мишень относительно оси  $\langle 111 \rangle$ .

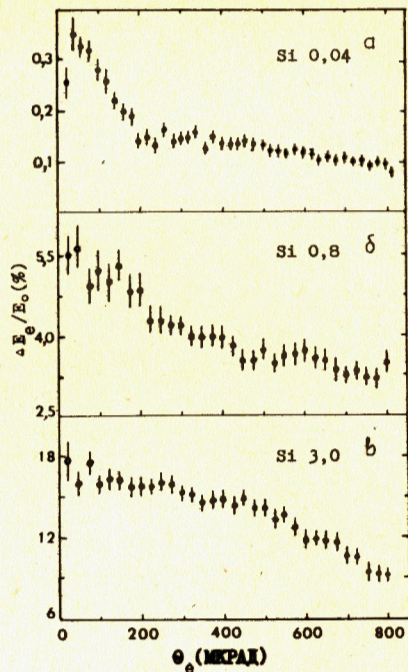


Рис.6. Зависимость средних относительных потерь энергии электронов, прошедших монокристаллы кремния толщиной: а/ 0,041 мм, б/ 0,8 мм и в/ 3,0 мм, от полярного угла входа частиц относительно оси кристалла.

с различными углами входа относительно оси. Эти распределения иллюстрируют тот факт, что с увеличением угла между падающим пучком электронов и направлением оси потери энергии меняются слабо. Тем не менее наблюдается некоторое уширение распределений с одновременным уменьшением интенсивности излучения. По-видимому, это связано с увеличением вклада в экспериментально измеренную спектральную плотность излучения высокоэнергетического когерентного тормозного излучения надбарьерных электронов с одновременным уменьшением вклада от каналированных частиц, имеющих наибольшую вероятность излучения, а следовательно, и наиболее сильно искаженных из-за регистрации нескольких фотонов. На рис.6а приведена зависимость средних потерь энергии электронов, прошедших тонкий монокристалл кремния /9/, от полярного угла входа относительно оси. Данная зависимость показывает, что средние относительные потери энергии электронов в пределах критического угла каналирования /около 130 мкрад/ составляют около 0,28%, а надбарьерных - около 0,12%. Аналогичные распределения для монокристаллов толщиной 0,8 и 3,0 мм представлены на рис.6б,в. Для этих распределений характерна более слабая ориентационная зависимость средних относительных потерь энергии электронов. Видно, что для кристаллов толщиной 0,8 и 3,0 мм средние относительные потери энергии электронов вблизи направления оси составляют около 5,1 и 16,3% соответственно. Для образца кремния толщиной 10 мм средние относительные потери энергии частиц достигают примерно 30%. Распределение, характеризующее средние относительные потери энергии электронов в монокристалле германия толщиной 0,5 мм, представлено на рис.7. Из рисунка следует, что 7-8% энергии первичного пучка, прошедшего кристалл германия под малыми углами к направлению кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ , трансформируется в энергию  $\gamma$ -излучения. Для сравнения отметим, что соответствующая величина, измеренная в тех же экспериментальных условиях, для аморфной мишени из алюминия толщиной 0,95 мм равна 0,35%.

В заключение авторы выражают благодарность академикам Н.Н.Боголюбову и А.М.Балдину, профессору Н.Е.Тюрину за поддержку данной работы, Э.И.Денисову, В.И.Глебову, М.А.Кумахову, В.А.Базылеву, В.И.Туманову - за помощь в работе и обсуждения, а также коллективам Лаборатории высоких энергий ОИЯИ и персоналу ускорителя ИФВЭ в Серпухове за помощь при проведении исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с. 786.
2. Filatova N.A. et al. Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p. 488.
3. Авакян Р.О. и др. ЯФ, 1982, 35, с. 387.
4. Atkinson M. et al. Phys.Lett., 1982, 110B, p. 162.



5. Kumakhov M.A. Phys.Lett., 1976, 57A, p. 167.
6. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, P13-82-547, Дубна, 1982.
7. Бавижев М.Д. и др. Препринт ИФВЭ, 82-74-ОП, 1982.
8. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, P13-81-644, Дубна, 1981.
9. Булгаков Н.К. и др. ОИЯИ, 1-33-640, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 сентября 1984 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,  
если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований



В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

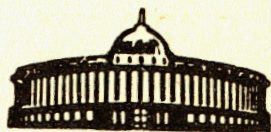
Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

- Physics of elementary particles and atomic nuclei.
- Theoretical physics.
- Experimental techniques and methods.
- Accelerators.
- Cryogenics.
- Computing mathematics and methods.
- Solid state physics. Liquids.
- Theory of condensed matter.
- Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

*JINR Rapid Communications* will be issued regularly.



Булгаков Н.К. и др. 1-84-630  
Исследование излучения электронов с энергией 10 ГэВ  
в толстых кристаллах кремния и германия

Приведены результаты исследования излучения электронов с энергией 10 ГэВ, прошедших толстые монокристаллы кремния и германия под малыми углами к направлению кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ . Получена информация о спектральных характеристиках излучения электронов для событий с различными углами входа в кристалл относительно оси.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Bulgakov N.K. et al. 1-84-630  
Investigation of Radiation for 10 GeV Electrons in Thick  
Crystals of Silicon and Germanium

The results of investigation of 10 GeV electrons having passed through thick monocrystals of silicon and germanium at small angles to the direction of crystallographic axis  $\langle 111 \rangle$  are presented. Information as to spectral characteristics of radiation by electrons for events with various angles of entrance into the crystal relatively axis is obtained.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984