

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P1-85-27

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ  
ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ ПОД МАЛЫМИ УГЛАМИ  
ОТНОСИТЕЛЬНО КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОСИ  
В МОНОКРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

Направлено в "Журнал экспериментальной  
и теоретической физики"

1985

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

И.Н.Ивахненко, Ю.В.Нильсен, В.А.Юрьев  
Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Р.Карриган /мл./, Т.Туйг  
Национальная ускорительная лаборатория им.Ферми, Батавия, США

У.Гибсон, Ч.Сан, Р.Вонг  
Университет штата Нью-Йорк, Олбани, США

## ВВЕДЕНИЕ

Теоретическое предсказание свойств электромагнитного излучения релятивистских каналированных частиц послужило стимулом для широкого экспериментального исследования этого явления<sup>/2-10/</sup>. Наиболее интересные данные, полученные с применением современных экспериментальных методик, приведены в работах<sup>/6-10/</sup>.

В настоящей статье представлены результаты исследования характеристик  $\gamma$ -излучения электронов, каналированных вдоль направления оси  $\langle 111 \rangle$  в монокристалле кремния толщиной 41 мкм. Предварительные данные, полученные на небольшой части статистического материала, были опубликованы нами ранее<sup>/9/</sup>.

Экспериментальная установка, на которой проводились исследования, подробно описана в<sup>/11/</sup>. Координаты электронов, прошедших через установку, измерялись с помощью системы дрейфовых камер. Это позволяло определять углы входа частиц в кристалл и углы выхода с точностью 7 и 30 мкрад соответственно. Импульс электронов, прошедших через кристалл, измерялся по их отклонению в анализирующем магните. Идентификация электронов осуществлялась с помощью черенковских счетчиков полного поглощения.

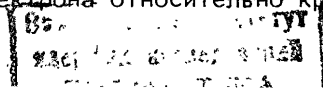
Энергия  $\gamma$ -квантов измерялась сцинтилляционным детектором на основе кристалла CsJ(Tl), окруженным свинцовой защитой, и счетчиками антисовпадения. Среднеквадратичная ошибка в измерении энергии  $\gamma$ -квантов в области 100 МэВ составляла ~1%. Апертура коллиматора, расположенного перед детектором, позволяла измерять углы вылета  $\gamma$ -квантов /относительно направления движения первичного электрона/ в пределах  $\pm 1,3$  мрад. С помощью очищающих магнитов, а также в результате минимизации вещества сцинтилляционных счетчиков и вакуумирования рабочей области установки количество вещества, в котором возникает фоновое тормозное излучение, было уменьшено до  $5 \times 10^{-4}$  радиационных длин.

Пучок электронов<sup>/12/</sup> с импульсом 10 ГэВ/с имел угловую расходимость около 1 мрад. Импульсный разброс в пучке составлял примерно  $\pm 1,3\%$ , а примесь адронов не превышала 0,5%.

При обработке данных отбирались события, удовлетворяющие условиям идентификации электронов черенковскими счетчиками полного поглощения и сохранению энергии в каждом акте взаимодействия.

## ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Вероятность излучения фотонов электронами зависит от полярного угла входа электрона относительно кристаллографической оси



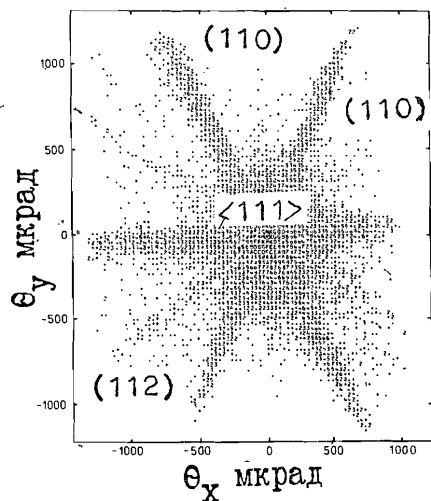
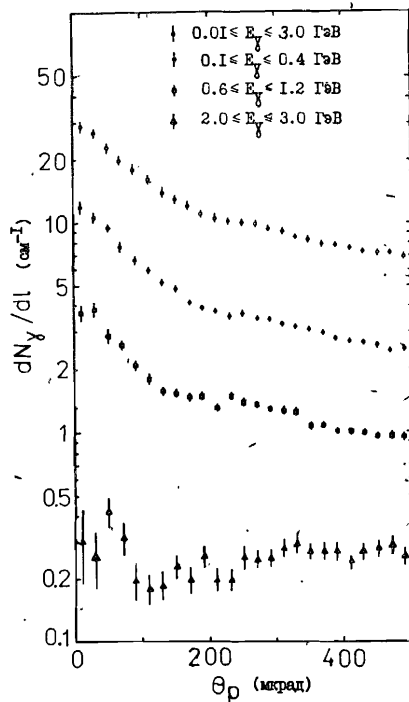


Рис.1. Распределение числа событий, которые сопровождались излучением  $\gamma$ -квантов с энергией от 10 до 600 МэВ, в зависимости от угла входа электронов в кристалл.  $\theta_x$  и  $\theta_y$  - проекции полярного угла на оси абсцисс и ординат в прямоугольной системе координат.

Рис.2. Зависимость числа зарегистрированных  $\gamma$ -квантов от полярного угла входа электронов в кристалл для различных диапазонов энергии  $\gamma$ -квантов.



и азимутального угла. На рис.1 представлено распределение событий, в которых электроном был испущен  $\gamma$ -квант с энергией от 10 до 600 МэВ. Это распределение отчетливо иллюстрирует влияние оси  $\langle 111 \rangle$  и плоскостей (110) на вероятность излучения  $\gamma$ -квантов.

На рис.2 показаны зависимости числа зарегистрированных  $\gamma$ -квантов от полярного угла входа электронов относительно оси  $\langle 111 \rangle$  кристалла для различных диапазонов энергий  $\gamma$ -квантов. Распределения приведены к единице длины кристалла, а каждая их точка нормировалась на число электронов в телесном угле, соответствующем интервалу полярных углов входа. Как видно из рисунка, для каналированных электронов ( $\theta_p \leq 130$  мкрад) выход  $\gamma$ -квантов максимален. Для "надбарьерных" электронов ( $\theta_p > 130$  мкрад) выход  $\gamma$ -квантов существенно меньше. В энергетическом диапазоне

$0,01 \leq E_\gamma \leq 3$  ГэВ/ максимальная величина составляет  $\sim 30$   $\gamma$ -квантов в пересчете на один сантиметр кристалла. Влияние оси на выход  $\gamma$ -квантов остается существенным до углов входа примерно 400 мкрад. Для больших углов уровень излучения становится постоянным и определяется, в основном, плоскостным каналированием электронов. Исключения составляют  $\gamma$ -кванты больших энергий ( $2 \leq E_\gamma \leq 3$  ГэВ, рис.2/), для которых вероятность излучения практически не зависит от угла входа электрона.

Сравнение с данными, полученными для позитронов такой же энергии  $\gamma$ , свидетельствует о различиях в динамике движения электронов и позитронов в процессе осевого каналирования. Так, максимальная вероятность излучения  $\gamma$ -квантов достигается для углов входа электронов в кристалл, близких к нулю (15-20 мкрад, рис.2/), в то время как для позитронов максимальная вероятность достигается при углах, близких к критическому  $\gamma$ . Это объясняется тем, что при углах входа, близких к нулю, электрон может подходить к оси, в область больших градиентов полей, тогда как для позитронов это имеет место при углах входа, близких к критическому.

#### РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОМ

На рис.3 представлены результаты измерения радиационных потерь энергии электронов в зависимости от полярного угла входа в кристалл. Кривые получены в тех же условиях, что и данные, приведенные на рис.2.

Обращает на себя внимание тот факт, что максимальные полные потери на излучение электроном могут составлять  $\sim 10$  ГэВ на см. Если отобрать события по критерию  $0,1 \leq E_\gamma \leq 0,4$  ГэВ/, то в этом случае максимальные радиационные потери составляют  $\sim 2,8$  ГэВ на 1 см кристалла для каналированных электронов. При этом потери энергии надбарьерными электронами ( $130 \leq \theta_p \leq 400$  мкрад) составляют примерно 600-900 МэВ на 1 см.

#### УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ

На рис.4 приведены распределения событий по углам вылета  $\gamma$ -квантов из кристалла для электронов с полярными углами входа  $\theta_p \leq 120$  мкрад относительно оси  $\langle 111 \rangle$ . Измерялась вертикальная проекция углов вылета  $\gamma$ -квантов относительно горизонтальной плоскости, в которой лежала ось  $\langle 111 \rangle$ . Сплошной кривой показан результат аппроксимации экспериментальных данных распределением Гаусса. Для событий, отобранных по условию  $0,1 \leq E_\gamma \leq 0,5$  ГэВ, ширина среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  составляет  $105 \pm 8$  мкрад, а для событий, в которых энергия  $\gamma$ -квантов заключена в интервале  $0,6 \leq E_\gamma \leq 1,1$  ГэВ,  $\sigma = 115 \pm 12$  мкрад. Как видно из рисунка,

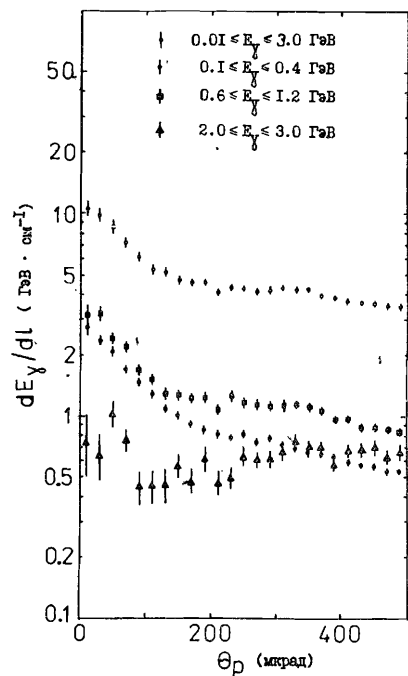


Рис.4. Распределение событий по углам вылета  $\gamma$ -квантов из кристалла для электронов с полярными углами входа меньше 120 мкрад относительно оси  $\langle 111 \rangle$ .

$\gamma$ -кванты, излученные в процессе осевого каналирования электронов, рассеиваются в конус с угловым раствором, приблизительно совпадающим с критическим углом каналирования, что несколько шире конуса тормозного излучения в аморфном теле такой же толщины /18/.

Рис.3. Распределение радиационных потерь энергии электронами в зависимости от полярного угла входа в кристалл для различных диапазонов энергии  $\gamma$ -квантов.

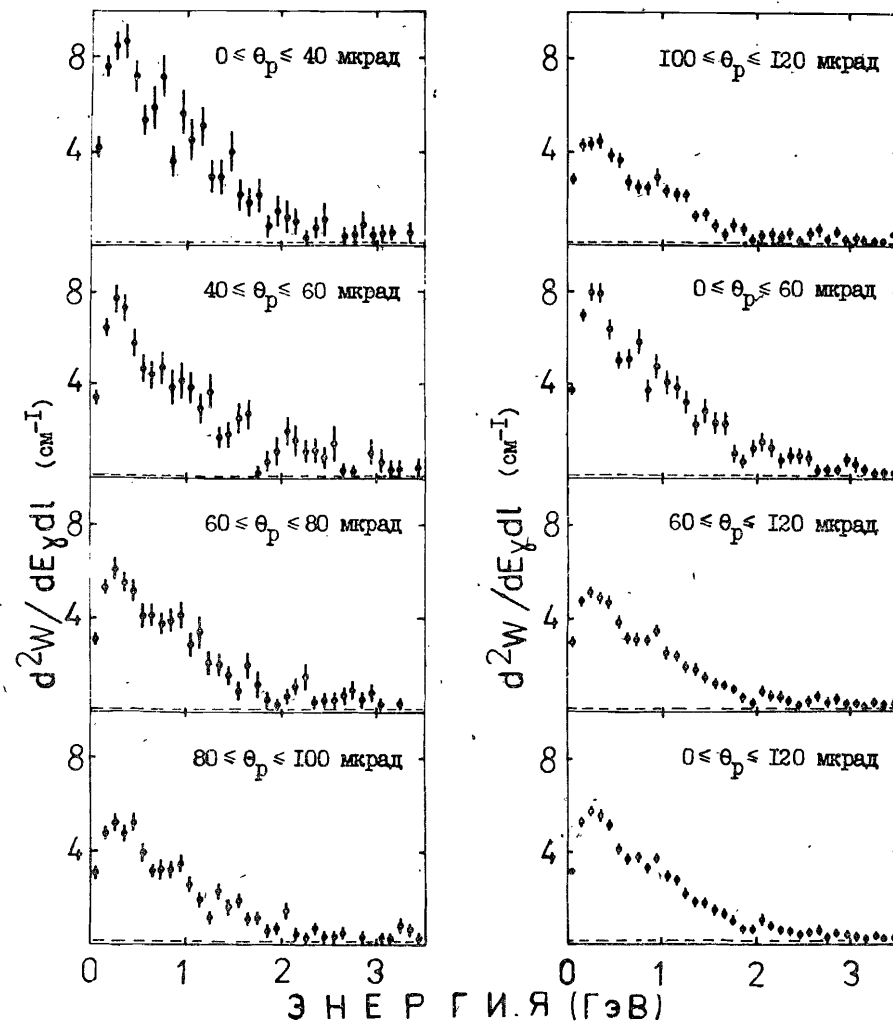
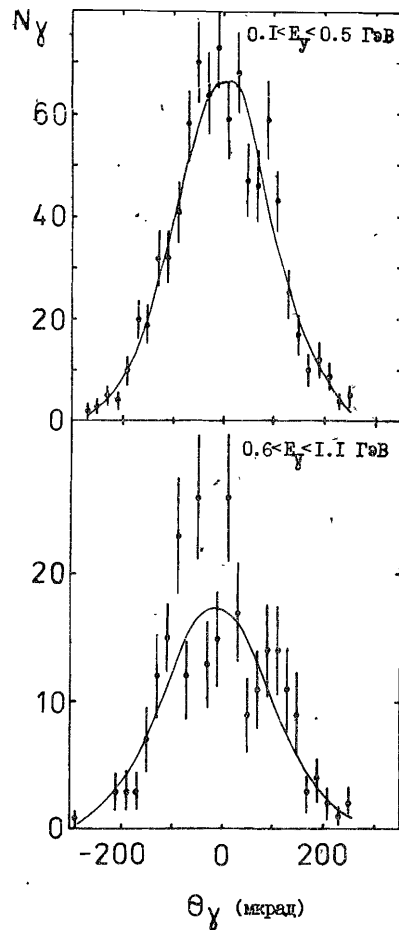


Рис.5. Зависимость спектральной плотности излучения от энергии  $\gamma$ -квантов для различных углов входа электронов в кристалл.

#### СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис.5 представлены распределения спектральной плотности излучения в зависимости от энергии  $\gamma$ -квантов для электронов в различных диапазонах входных углов. Эти распределения также нормировались на толщину кристалла и на число электронов в соответствующем диапазоне углов входа. Пунктиром показан уровень спектральной плотности тормозного излучения из алюминиевой мишени.

Приведенные данные иллюстрируют зависимость спектральной плотности излучения от угла входа электрона в кристалл. Наиболее интенсивно излучают электроны с входными углами  $\theta_p \leq 40$  мкрад.

Максимум спектральной плотности лежит в области энергии фотонов 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 /примерно в 3 раза/ и приблизительно в 2 раза выше /в максимуме/ аналогичного распределения для позитронов<sup>/11/</sup>.

Данные, полученные в настоящей работе, качественно согласуются с теоретическими представлениями, развитыми в работах<sup>/13-16/</sup>. Аналитические методы расчета спектральной плотности излучения, полученные в этих работах, основаны на модельных представлениях и не учитывают некоторых реальных особенностей усредненного потенциала кристаллографических осей, например, его асимметрию. Учет экспериментальных условий в этих расчетах приводит к еще большим трудностям. Данные по спектральной плотности излучения для электронов в 10 ГэВ, полученные с помощью моделирования траекторий движения в реальном усредненном потенциале осей кристалла<sup>/17/</sup>, удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами настоящей работы.

Немногочисленные опубликованные экспериментальные данные для электронов высоких энергий<sup>/2-5/</sup> явно недостаточны для проведения детального сравнения полученных результатов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные, характеризующие излучение, возникающее в процессе взаимодействия электронов с энергией 10 ГэВ с монокристаллом кремния толщиной 41 мкм, ориентированным осью  $\langle 111 \rangle$  вдоль направления движения электронов. Приведены характеристики электромагнитного излучения для различных углов входа электронов в кристалл, а также данные, характеризующие потери энергии на излучение.

Показано, что спектральная плотность излучения электронов в процессе осевого каналирования превышает спектральную плотность тормозного излучения из аморфной мишени в 70 раз. Полученные данные согласуются с теоретическими представлениями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kumakhov M.A. Phys.Lett., 1976, 57A, p.17.
2. Аганьянц А.О. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с.554.
3. Воробьев С.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с.414.
4. Ганенко В.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1980, т.32, с.397.

5. Авакян Р.О. и др. ЯФ, 1982, т.35, с.387.
6. Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с.786; Rad.Eff., 1982, 66, p.173.
7. Filatova N.A. et al. Phys.Rev.Lett., 1982, vol.48, p.488.
8. Atkinson M. et al. Phys.Lett., 1982, 110B, p.162.
9. Булгаков Н.К. и др. ОИЯИ, 1-83-640, Дубна, 1983.
10. Булгаков Н.К. и др. ОИЯИ, 1-83-731, Дубна, 1983.
11. Filatova N.A. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1983, vol.211, p.353.
12. Бавижев М.Д. и др. Препринт ИФВЗ, 82-74-ОП, Серпухов, 1982.
13. Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1980, т.78, с.62.
14. Трутень В.И. и др. Препринт ХФТИ, 82-11, Харьков, 1982.
15. Ахизер А.И., Шульга Н.Ф. УФН, 1982, т.137, с.561.
16. Белошицкий В.В. и др. ЖЭТФ, 1982, т.82, с.462.
17. Зимин Н.И. ОИЯИ, 1-83-729, Дубна, 1983.
18. Бавижев М.Д. и др. ОИЯИ, P13-81-644, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 января 1985 года.