

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

P1-85-28

ИЗЛУЧЕНИЕ
УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ,
ДВИЖУЩИХСЯ ПОД МАЛЫМИ УГЛАМИ
К ПЛОСКОСТЯМ (110) В КРЕМНИИ

Направлено в "Журнал экспериментальной
и теоретической физики"

1985

Н.К.Булгаков, А.С.Водолянов, 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.Фиштова, А.Форышки,
Э.Н.Цыганов, М.Д.Шафранов
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

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

Р.Карриган (мл.), Т.Туиг
Национальная ускорительная лаборатория им.Э.Ферми, Батавия, США

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеется большое количество работ по исследованию γ -излучения релятивистских частиц при их взаимодействии с кристаллами, в том числе выполненных с применением современных экспериментальных методик^{/1-5/}. Однако электромагнитное излучение электронов ультрарелятивистских энергий в процессе плоскостного каналирования экспериментально почти не изучено.

Теоретически этот вопрос рассматривался в^{/6-8/}. Однако результаты этих работ в основном носят качественный характер из-за отсутствия хорошего приближения для описания потенциала взаимодействия и трудностей корректного учета многократного рассеяния.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования излучения электронов с энергией 10 ГэВ в процессе их движения вдоль плоскостей (110) в монокристалле кремния толщиной 41 мкм. Подробное описание экспериментальной установки и условий эксперимента дано в^{/10/}. Характеристики электронного пучка приведены в^{/11/}.

Кристалл ориентировался плоскостью (110) параллельно направлению пучка. Разориентация относительно кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$ составляла $0,5^\circ$. Углы входа (выхода) электронов в кристалл отсчитывались относительно плоскости (110). Эти углы имели нулевое значение при условии компланарности кристаллографической плоскости (110) и вектора скорости электрона.

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

На рис.1 даны распределения числа зарегистрированных γ -квантов в зависимости от угла входа электронов в кристалл относительно плоскости (110), полученные для различных диапазонов энергии γ -квантов. Распределения приведены к единице длины кристалла, а каждая их точка нормировалась на число электронов в соответствующем интервале входных углов. Как видно из рисунка, ориентационная зависимость выхода фотонов заметно проявляется только для энергии γ -квантов меньше 250 МэВ. Для больших энергий эффект ориентации проявляется слабо.

На рис.2 представлены результаты измерения радиационных потерь энергии электронов в зависимости от угла входа в кристалл, в тех же диапазонах энергии γ -квантов и при тех же условиях, что на рис.1.

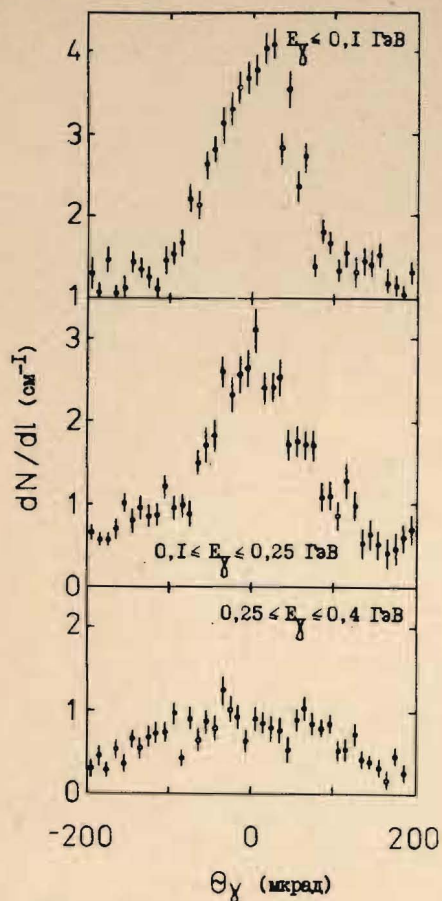
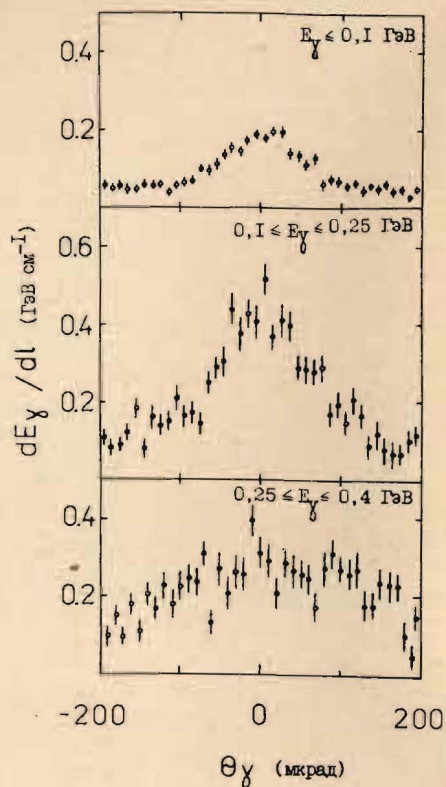


Рис.2. Распределения радиационных потерь энергии электронов в зависимости от угла входа относительно плоскости (110) для различных диапазонов энергии γ -квантов.

По форме распределения (рис.1 и 2) аналогичны. Однако число γ -квантов с ростом их энергии уменьшается, тогда как энергетические потери электронами несколько увеличиваются. Отсюда следует, что средние потери энергии электронами мало меняются в указанных диапазонах энергии γ -квантов и составляют ~ 200 МэВ на 1 см.

Сравнение распределений (рис.1) с аналогичными данными, полученными для позитронов ^{12/}, указывают на различие в динамике движения электрона и позитрона в процессе плоскостного каналирования. Максимум распределения для электронов приходится на угол

Рис.1. Распределения числа зарегистрированных γ -квантов в зависимости от угла входа электронов в кристалл относительно плоскости (110) для различных диапазонов энергии γ -квантов.



входа Θ_γ , равный нулю, в то время как для позитронов распределения имеют два максимума, которые достигаются при углах входа, близких к критическому углу плоскостного каналирования (около 60 мкрад при энергии электронов 10 ГэВ).

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис.3 представлены распределения спектральной плотности излучения в зависимости от энергии γ -квантов для различных диапазонов углов входа электронов в кристалл. Условия нормировки этих распределений такие же, как и для распределений рис.1. Пунктиром показан уровень спектральной плотности тормозного излучения из аморфной мишени аналогичной толщины. Наиболее интенсивно электроны излучают в диапазоне углов входа $0 \leq \Theta_\gamma \leq 20$ мкрад. В этом случае максимальная величина спектральной плотности излучения достигается при энергии γ -квантов 130 МэВ. Она превосходит уровень тормозного излучения из аморфной мишени в 28 раз. Данные, полученные в ЦЕРНе при исследовании излучения электронами, каналированными в плоскостном канале ^{3/}, дают аналогичное превышение спектральной плотности приблизительно в 14 раз. Как было указано в ^{12/}, это отличие от нашего результата объясняется недостаточным угловым разрешением установки в ЦЕРНе.

Распределения спектральной плотности (рис.3) примерно в 3 раза шире аналогичных зависимостей, полученных для позитронов ^{12/}. Эти различия объясняются разным характером межплоскостного потенциала для электронов и позитронов ^{6-9/}.

УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ

На рис.4 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, полученная с помощью восстановления точки конверсии γ -кванта в электрон-позитронную пару в дрейфовой камере со встроенным конвертором ^{13/}. Кристаллографическая плоскость (110) при этом была совмещена с плоскостью горизонта. Сплошными кривыми показан результат аппроксимации экспериментальных данных распределением Гаусса.

Наименьшую ширину имеет распределение событий, отобранных по условию $\Theta_x \leq 20$ мкрад, для которого величина среднеквадратичного отклонения σ составляет 75+7 мкрад. При условии $20 < \Theta_x < 40$ мкрад $\sigma = 80+8$ мкрад, а при $40 \leq \Theta_x \leq 60$ мкрад $\sigma = 86+8$ мкрад.

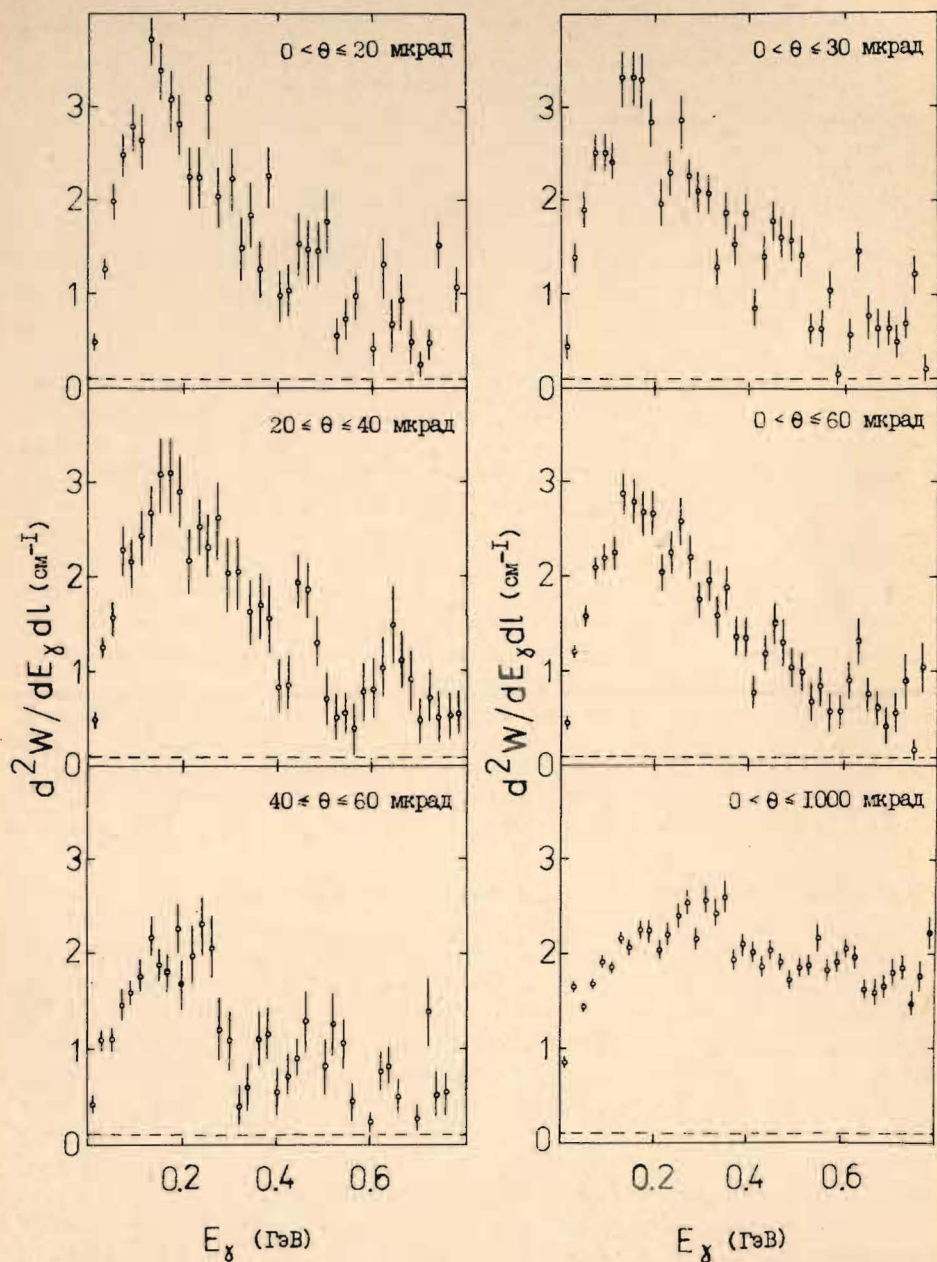


Рис.3. Распределения спектральной плотности излучения в зависимости от энергии γ -квантов для различных диапазонов углов входа электронов в кристалл относительно плоскости (110).

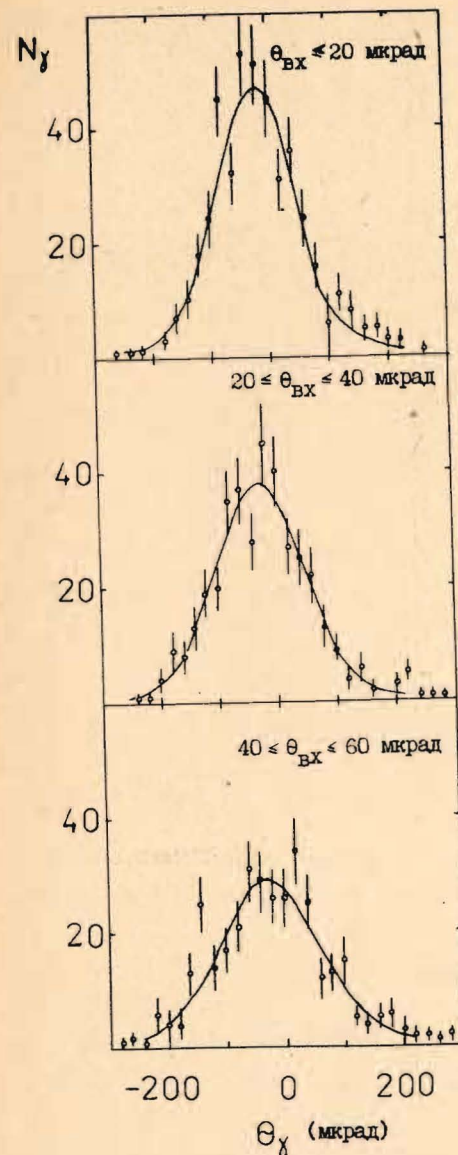
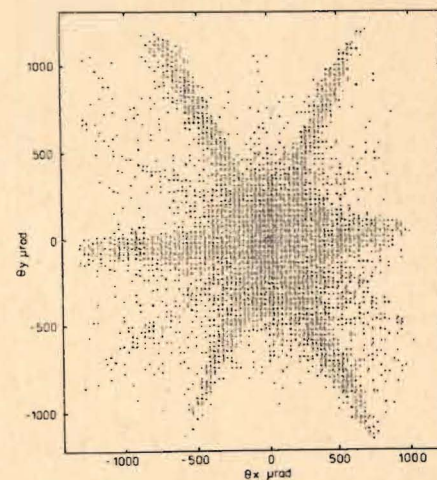


Рис.4. Распределения событий по углам вылета γ -квантов из кристалла для различных диапазонов углов входа электронов.

Рис.5. Распределения числа событий, которые сопровождались 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.



ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОЦЕССЕ ПЛОСКОСТНОГО КАНАЛИРОВАНИЯ ВБЛИЗИ ОСИ

Достаточно большая величина акцептанса установки в данном эксперименте позволила регистрировать электроны с большими углами входа в кристалл, что дало возможность провести исследование излу-

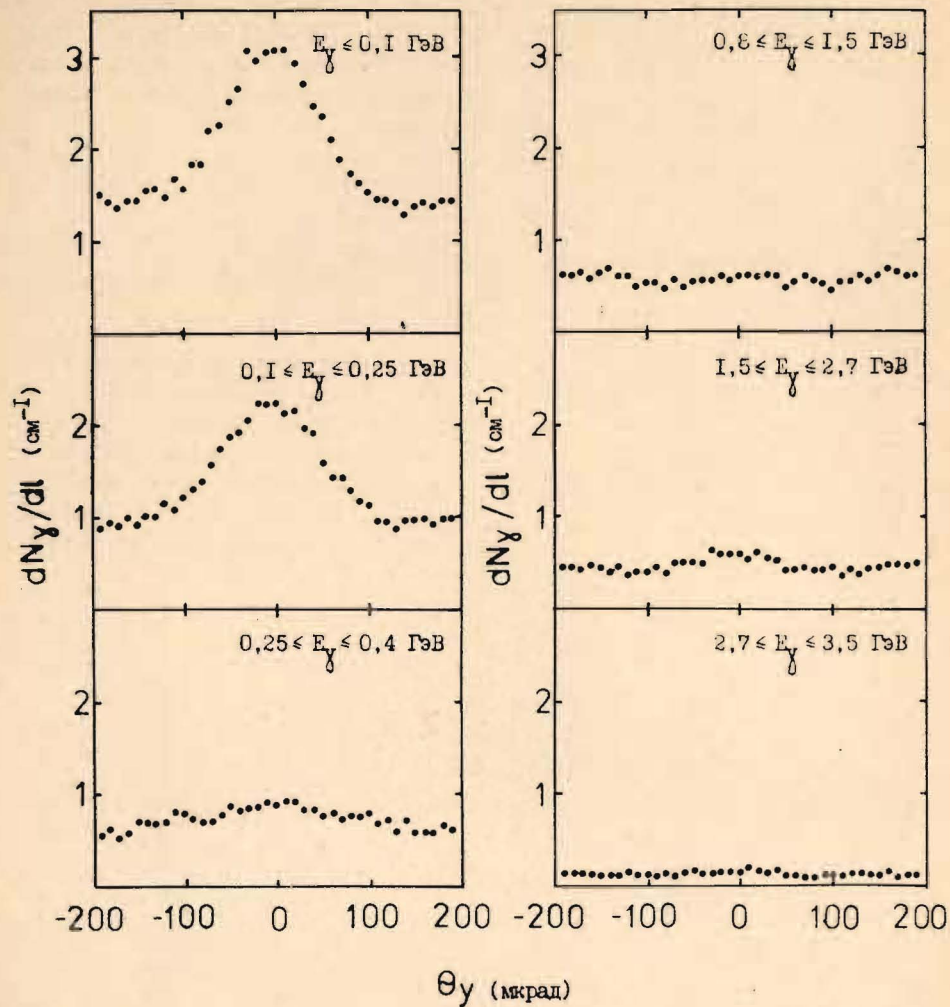


Рис.6. То же, что на рис.1, для случая плоскостного каналирования вблизи оси $\langle 111 \rangle$.

чения электронов в процессе плоскостного каналирования на том же материале, который был набран для исследования осевого каналирования (на гораздо большей статистике). С этой целью отбирались только те события, для которых выполнялось условие $\Theta_p > 600$ мкрад (рис.5), и они суммировались так, чтобы все три плоскости (110) совпали. Точность совмещения плоскостей при этом составила примерно ± 10 мкрад.

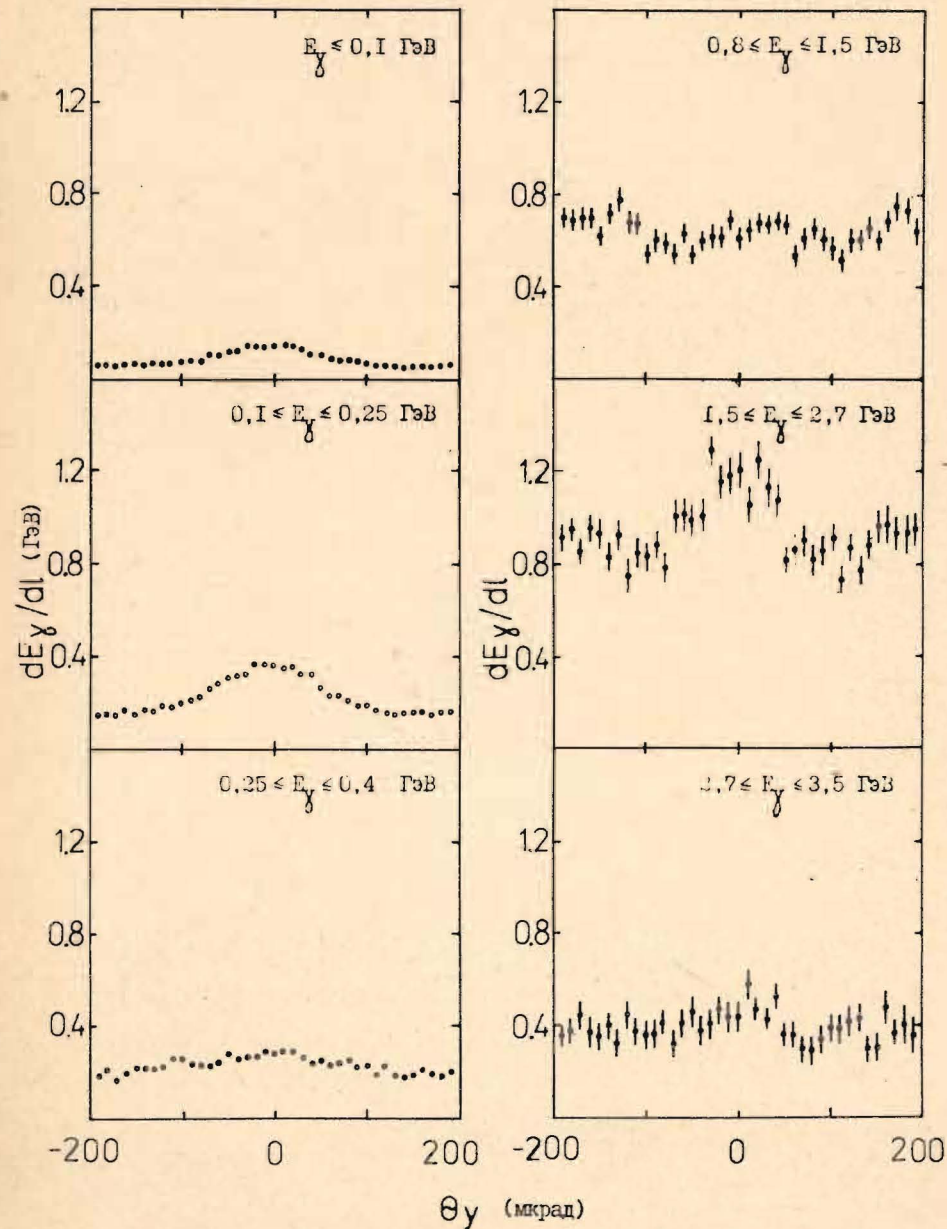


Рис.7. То же, что на рис.2, для случая плоскостного каналирования вблизи оси $\langle 111 \rangle$.

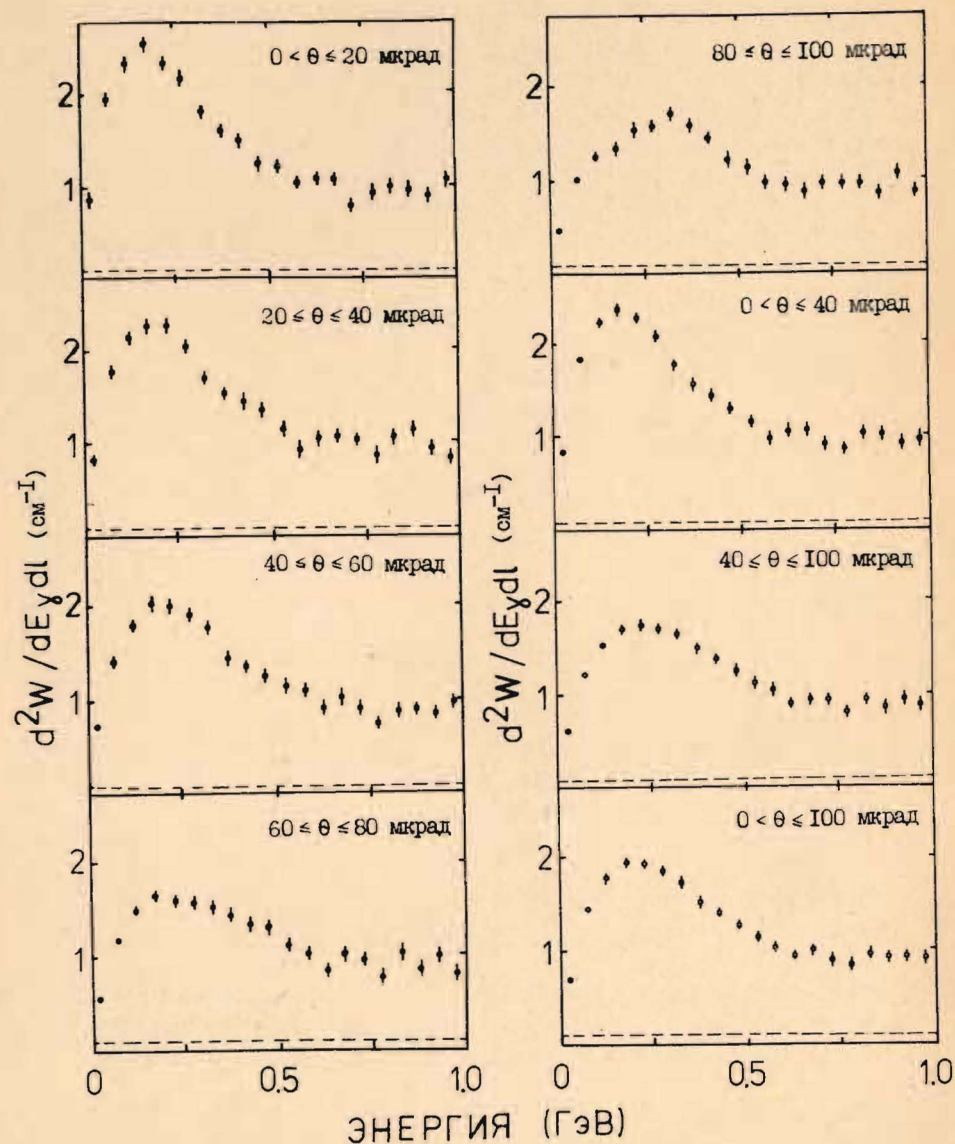


Рис.8. То же, что на рис.3, для случая плоскостного каналирования вблизи оси $\langle 111 \rangle$.

Результаты исследований представлены на рис.6-8. Эти данные получены при тех же условиях, что и данные, приведенные на рис.1-3. По своему характеру распределения, построенные на основе данных, полученных вблизи оси, совпадают с распределениями рис.1-3. Необходимо лишь отметить несколько меньший общий уровень выхода излучения. По-видимому, сказывается погрешность в совмещении отдельных плоскостей при суммировании статистики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены угловые и энергетические характеристики излучения, возникающего в процессе плоскостного каналирования электронов в монокристалле кремния толщиной 41 мкм. Показано, что спектральная плотность излучения в максимуме в 28 раз превосходит соответствующую величину для аморфной мишени. Полученные данные качественно соответствуют теоретическим представлениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с.786; Rad. Eff., 1982, 66, p.173.
2. Filatova N.A. et al. Phys.Rev.Lett., 1982, vol.48, p.488.
3. Atkinson M. et al. Phys.Lett., 1982, 110B, p.162.
4. Булгаков Н.К. и др. ОИЯИ, 1-83-640, Дубна, 1983.
5. Булгаков Н.К. и др. ОИЯИ, 1-83-731, Дубна, 1983.
6. Kumakhov M.A. Phys.Lett., 1976, 51A, p.17.
7. Жеваго Н.К. ЖЭТФ, 1978, т.75, с.1389.
8. Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1980, т.78, с.62.
9. Байер В.Н. и др. ДАН СССР, 1979, т.246, с.1347.
10. Filatova N.A. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1983, vol.211.
11. Бавижев М.Д. и др. Препринт ИФВЭ, 82-74-ОП, 1982.
12. Булгаков Н.К. и др. ОИЯИ, 1-83-621, Дубна, 1983.
13. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, P13-81-644, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 января 1985 года.