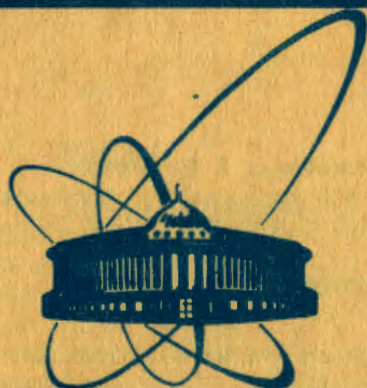


9/1-84



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

248/84

1-83-731

ИЗЛУЧЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 10 ГэВ
ПРИ ОСЕВОМ КАНАЛИРОВАНИИ

1983

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

М.Д.Бавижев
Филиал Ставропольского политехнического института, Черкесск

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

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

И.Н.Ивахненко, Ю.В.Нильсен, Б.А.Юрьев
НИИЯФ МГУ, Москва

1. ВВЕДЕНИЕ

Предсказание интенсивного электромагнитного излучения каналированных частиц/1/ стимулировало экспериментальные исследования в этой области. Особенно интересные данные получены в СЛАК, ЦЕРНе и ИФВЭ/2-4/.

До настоящего времени исследовалось, в основном, излучение частиц, каналированных плоскостью. Это связано с тем, что случай плоскостного каналирования наиболее прост для теоретической интерпретации. В данной работе представлены результаты исследования излучения позитронов с энергией 10 ГэВ в монокристалле кремния при их движении под малыми углами к кристаллографической оси <III>.

Данные получены на установке "Кристалл" /ОИЯИ/5/ на протонном синхротроне Института физики высоких энергий /Серпухов/. Использование в установке дрейфовых камер с высоким координатным разрешением позволяет определять углы входа позитронов в кристалл с точностью около 6 мкрад. Энергия гамма-квантов определяется с помощью детектора на основе кристалла CsJ(Tl), окруженного свинцовой защитой и системой счетчиков антисовпадения. Детектор имеет форму цилиндра диаметром 200, длиной 280 мм. Свинцовая защита гамма-спектрометра имеет коллиматор с апертурой 80x80 мм². Такая апертура позволяет измерять характеристики гамма-квантов с углами выхода до 1,3 мрад относительно оси кристалла. В рабочих условиях для гамма-квантов с энергией 100 МэВ детектор имеет разрешение около 3% /ширина на половине высоты распределения/.

Кристалл кремния толщиной 113 мкм ориентировался осью <III> параллельно направлению пучка позитронов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При обработке данных отбирались события, в которых зарегистрирован гамма-квант с энергией выше 5 МэВ. Требовалось совпадение суммы энергий гамма-кванта и вторичного позитрона с энергией частиц в пучке.

Систематическая ошибка в нормировке представляемых данных оценивается нами на уровне 10% и определяется, в основном, изменением эффективности установки, связанным с нестабильностью загрузки спектрометра. Измерения спектральной плотности излучения на алюминиевой аморфной мишени /0,115±0,01 см⁻¹/ согласуются с расчетом, выполненным согласно/6/ и дающим 0,12 см⁻¹.

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Ориентационная зависимость характеризует вероятность излучения гамма-кванта позитроном, входящим в кристалл под определенным углом. При осевом каналировании, в отличие от одномерного случая плоскостного каналирования, вероятность излучения зависит от двух угловых переменных. Обычно исследуется вероятность излучения как функция углов (θ_x, θ_y) в прямоугольной или (θ_p, ϕ) в полярной системах координат. Угол θ_p отсчитывается от направления оси кристалла.

На рис.1 изображено распределение числа излучаемых гамма-квантов с энергией в диапазоне 5-200 МэВ в зависимости от угла входа позитронов в кристалл. Видно увеличение вероятности излучения для частиц, входящих в кристалл в направлении, близком к оси $\langle 111 \rangle$, плоскостям (110) и (112).

На рис.2 представлена зависимость числа излучаемых гамма-квантов от полярного угла входа позитронов в кристалл. Для частиц с углом входа, близким к нулю, вероятность излучения подавлена и достигает максимума при углах входа около 150 мкрад, что несколько больше критического угла осевого каналирования /около 130 мкрад/. Таким образом, максимум вероятности излучения достигается на границе области осевого каналирования и составляет около 19 гамма-квантов на 1 см кристалла. Для кристалла толщиной 113 мкм вероятность излучения в максимуме составляет примерно 0,21. Вероятность излучения двух гамма-квантов составляет при этом около 11% от общего числа гамма-квантов. Сле-

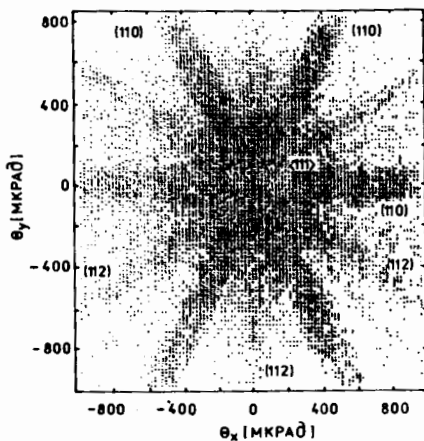


Рис.2. Зависимость числа излучаемых гамма-квантов от полярного угла входа позитронов в кристалл.

Рис.1. Распределение числа излучаемых гамма-квантов в зависимости от угла входа позитронов в кристалл.

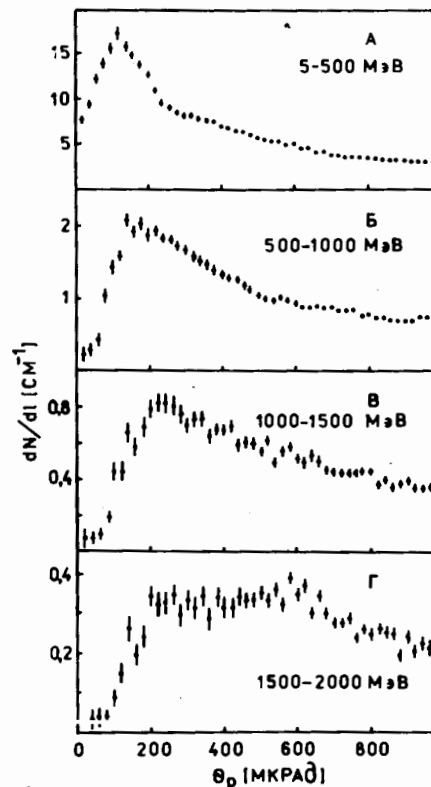
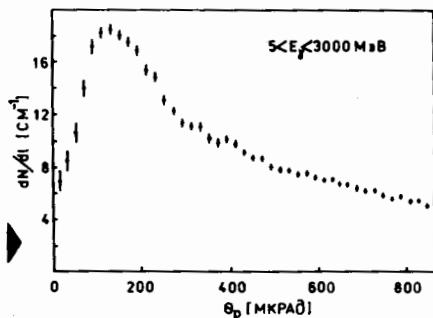


Рис.3. То же, что и на рис.2, для гамма-квантов в различных диапазонах энергии.

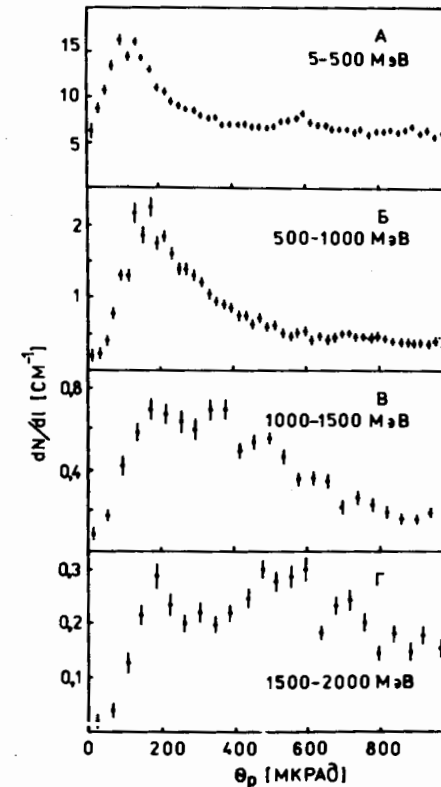


Рис.4. То же, что и на рис.3, для позитронов, входящих в кристалл сблизи плоскости (110).

дует иметь в виду, что двойные гамма-кванты несколько искажают измеряемые характеристики излучения. Однако вероятность регистрации двух гамма-квантов зависит от порога срабатывания гамма-спектрометра. Так, если для порога 5 МэВ вероятность наложения двух гамма-квантов составляет 11%, то для порога 20 МэВ - около 8%.

На рис.3 изображены зависимости числа излучаемых гамма-квантов /в различных энергетических диапазонах/ от полярного угла входа позитронов. Из распределений видно, что вероятность излучения гамма-квантов во всех энергетических диапазонах имеет минимум для позитронов с малыми углами входа в кристалл. Такое поведение ориентационных зависимостей характеризует динамику движения позитронов в кристалле при осевом каналировании. Распределение на рис.3 построено без отбора по азимутальному углу. Очевидно, что наличие кристаллографических плоскостей различного

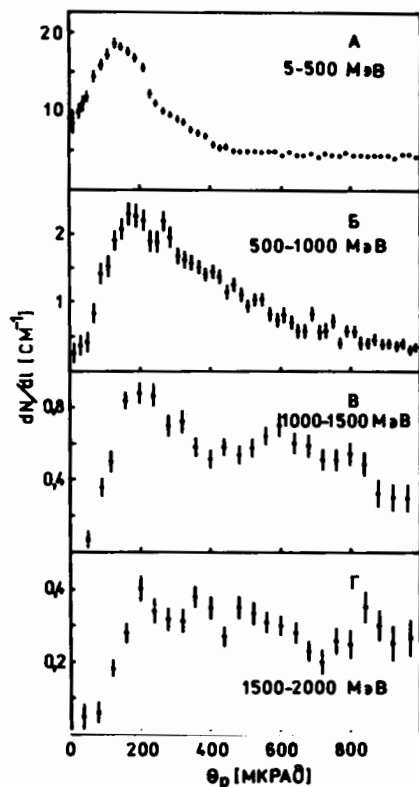
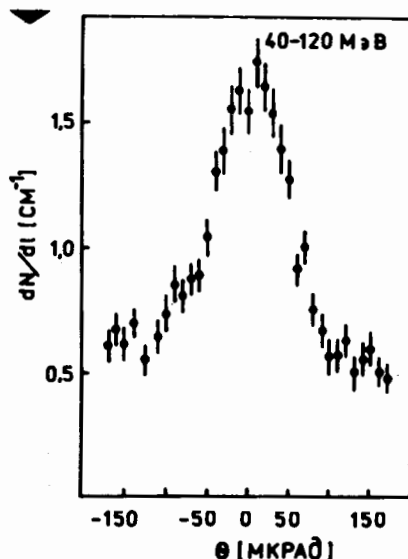


Рис.5. То же, что на рис.3, для позитронов, входящих в кристалл вблизи плоскости (112).

Рис.6. Зависимость числа излучаемых гамма-квантов от угла входа позитронов относительно плоскости (112).



порядка приводит к зависимости вероятности излучения не только от полярного, но и от азимутального угла входа позитронов.

На рис.4 представлены аналогичные зависимости для событий, в которых позитроны имеют угол входа, не превышающий 60 мкрад относительно кристаллографической плоскости (110), и на рис.5 для более слабой плоскости (112). Число гамма-квантов, излучаемых в энергетическом диапазоне 5-500 МэВ, становится постоянным при полярных углах выше 400 мкрад, т.е. для углов меньше 400 мкрад влияние кристаллографической оси на вероятность излучения оказывается существенным. Для больших полярных углов вероятность излучения низкоэнергетических гамма-квантов /рис.4А, 5А/ становится постоянной и обусловлена плоскостным каналированием позитронов^{/3/}. Для более высоких энергий гамма-квантов влияние оси и соседних плоскостей простирается до полярных углов, превышающих апертуру спектрометра, рис.4Б-Г/, 5Б-Г/.

Данные эксперимента позволяют сравнить излучение, возникающее при каналировании плоскостями (110) и (112). На рис.6 изображено распределение числа гамма-квантов в зависимости от угла входа относительно плоскости (112), для событий, соответствующих

максимуму в спектральной плотности излучения /рис.10/. Отобраны частицы с полярным углом больше 500 мкрад, для которых влияние оси на вероятность излучения становится менее заметным. Распределение показывает, что вероятность излучения для позитронов, каналированных плоскостью (112), примерно в 2 раза меньше, чем для случая плоскости (110)^{/3/}, что достаточно хорошо совпадает с теоретическими предсказаниями^{/7/}. Теоретическое значение величины критического угла каналирования плоскостью (112) составляет около 40 мкрад, что хорошо согласуется с шириной распределения на рис.6.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис.7 представлена зависимость спектральной плотности излучения от энергии гамма-квантов для событий с полярным углом входа в кристалл менее 80 мкрад. Величины спектральной плотности излучения для осевого и плоскостного каналирования позитронов примерно совпадают^{/3/}. Однако для осевого случая область энергии гамма-квантов, в которой спектральная плотность максимальна, несколько шире. Штриховая прямая характеризует спектральную плотность излучения на алюминиевой мишени.

Сравнительно большая апертура установки позволила получить данные об излучении в широком диапазоне углов - от углов, соответствующих осевому каналированию, до углов, обеспечивающих условия плоскостного каналирования.

На рис.8,9 изображены зависимости спектральной плотности излучения от энергии гамма-квантов для частиц, имеющих различные полярные углы входа. События отобраны таким образом, чтобы угол входа относительно кристаллографической плоскости (110) /рис.8/ и (112) /рис.9/ не превышал 60 мкрад. Распределение на рис.8А, 9А показывает спектральную плотность излучения для позитронов, участвующих в осевом каналировании. Эти распределения практически совпадают, что говорит о независимости характеристик излучения от азимутального угла внутри углового конуса шириной около 100 мкрад. Распределение /Б-В/ соответствует излучению в области углов, переходной от оси к плоскости, и /Г-Е/ излучению каналированных плоскостью позитронов, где становится заметным пик с энергией, соответствующей излучению при плоскостном каналирова-

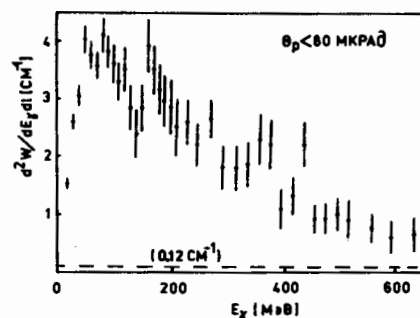


Рис.7. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов для осевого каналирования позитронов.

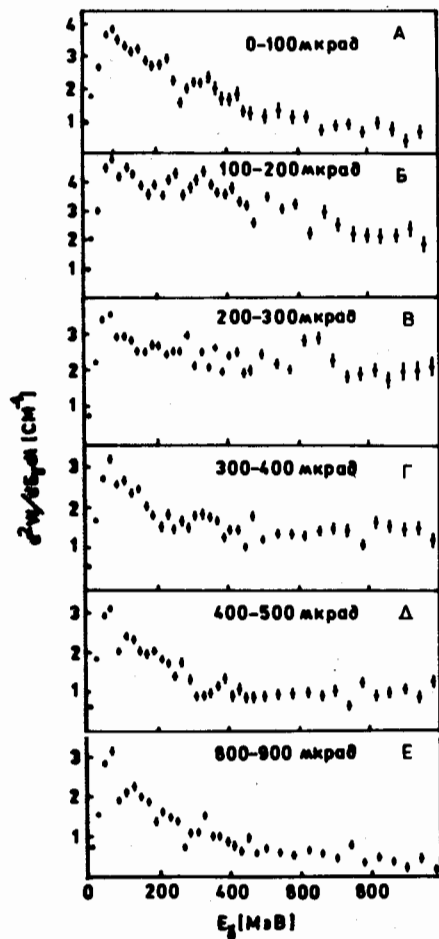


Рис.8. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов для различных диапазонов полярных углов входа позитронов в кристалл. Границы угловых диапазонов /мкрад/ указаны на графиках. Отобраны позитроны, входящие в кристалл вблизи плоскости (110).

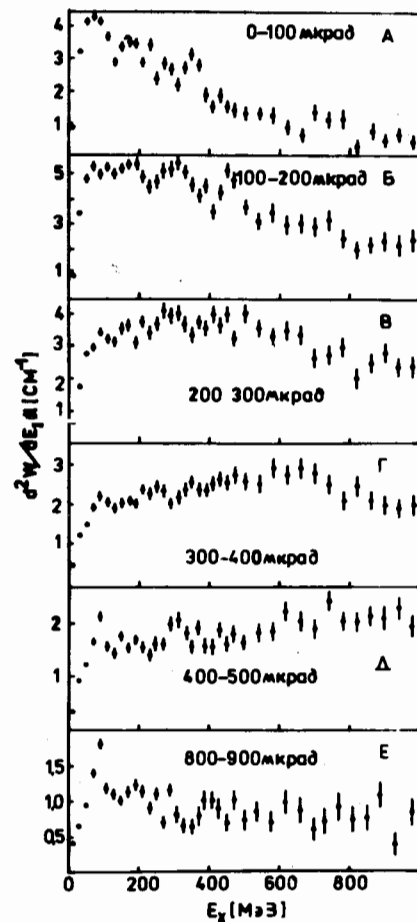


Рис.9. То же, что на рис.8, для позитронов, входящих в кристалл вблизи плоскости (112).

нии. В области полярных углов выше 100 мкрад распределения на рис.8 и 9 значительно отличаются. Влияние оси и соседних плоскостей несколько больше сказывается на спектре излучения частиц,

входящих в кристалл вблизи плоскости (112). Так, для позитронов с полярным углом входа больше 800 мкрад /рис.8/ это влияние становится пренебрежимым, и спектр хорошо согласуется с полученными нами ранее данными^{/3/} для изолированной плоскости (110). Для позитронов, каналированных плоскостью (112), влияние оси и соседних плоскостей на спектр излучения простирается до полярных углов, превышающих апертуру спектрометра /рис.9E/. Это влияние заключается в том, что уровень излучения с энергией выше 400 МэВ значительно превосходит аналогичную величину для позитронов, каналированных плоскостью (110) /рис.8E/. Величина спектральной плотности излучения в аморфной мишени составляет около $0,1 \text{ см}^{-1}$, что также значительно отличается от уровня излучения на рис.9E. Приведенные распределения показывают, что спектральная плотность излучения зависит как от полярного, так и от азимутального углов относительно оси кристалла.

На рис.10 изображена зависимость спектральной плотности излучения от энергии гамма-квантов для частиц с углами входа в кристалл меньше 40 мкрад относительно плоскости (112) и с полярными углами входа больше 500 мкрад. Спектральная плотность излучения для отобранных событий в 15 раз превышает аналогичную величину для алюминиевой мишени эквивалентной толщины, что находится в согласии с расчетом, использующим результат работы^{/7/}.

На рис.11 представлены зависимости полных потерь энергии на излучение от угла входа позитронов в кристалл. Отобраны события с гамма-квантами в широком диапазоне энергий. Максимальные потери энергии на излучение достигаются при полярных углах около 200 мкрад, что несколько превышает критический угол осевого каналирования. Такая форма кривой объясняется, во-первых, тем, что вероятность излучения максимальна при углах входа около 150 мкрад

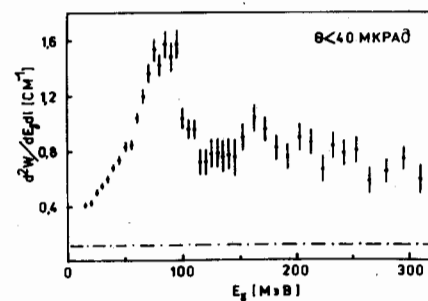


Рис.10. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов для позитронов, входящих в кристалл вблизи плоскости (112).

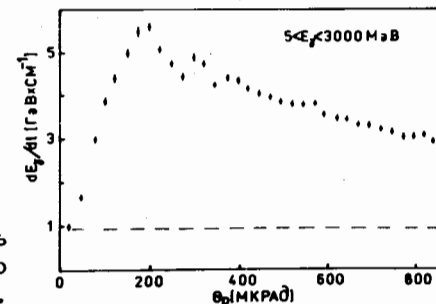


Рис.11. Зависимость полных потерь энергии на излучение от полярного угла входа позитронов в кристалл.

и, во-вторых, при увеличении полярного угла входа позитронов в кристалл спектр смещается в более жесткую область энергии.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты, характеризующие излучение, возникающее при прохождении позитронов с энергией 10 ГэВ через монокристалл кремния под малыми углами к оси <111>. Показано, что спектральная плотность излучения каналированных осью позитронов в 35 раз превосходит соответствующую величину для алюминиевой мишени.

Приводятся характеристики излучения для широкой области углов вокруг оси кристалла, а также данные, характеризующие суммарные потери энергии на излучение.

Излучение позитронов при осевом каналировании практически не поддается аналитическим расчетам. Для его интерпретации требуется трудоемкое численное моделирование более сложного движения позитронов в направлениях, перпендикулярных оси кристалла. Такие расчеты начаты, и их сравнение с экспериментом будет проведено в дальнейших публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кумахов М.А. ДАН СССР, 1977, т.230, с.1076.
2. Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с.786; Rad. EFF., 1982, 66, p.173.
3. Головатюк В.М. и др. ОИЯИ, Д1-81-592, Дубна, 1981.
4. Atkinson M. et al. Phys. Lett., 1982, 110B, p.162.
5. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, P13-82-547, Дубна, 1982.
6. Yung-Su Tsai. Rev. of Mod. Phys., 1974, vol.46, p.815.
7. Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1977, 77, с.1697.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 октября 1983 года

Булгаков Н.К. и др.

1-83-731

Излучение позитронов с энергией 10 ГэВ при осевом каналировании

Исследуется излучение, возникающее при каналировании позитронов с энергией 10 ГэВ осью монокристалла кремния. Изучаются спектральная плотность и вероятность излучения в зависимости от ориентации кристалла. Эксперимент выполнен на установке "Кристалл"/5/, основные характеристики которой приводятся. Показано, что максимальная величина спектральной плотности излучения каналированных осью позитронов в 35 раз превосходит соответствующую величину для алюминиевой мишени эквивалентной толщины. Приводится зависимость полных потерь энергии на излучение от ориентации кристалла.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Bulgakov N.K. et al.

1-83-731

Radiation of 10 GeV Positrons at Axial Channeling

The radiation of 10 GeV positrons channeled by a silicon monocrystal axis has been investigated. The dependence of spectral density and radiation probability on crystal orientation are studied. The experiment has been performed on the "Crystal" setup, the main characteristics of which are presented. It is shown that the maximum value of the spectral density of axial channeled positron radiation is by 35 times more than that in an aluminium target of the same thickness. The dependence of total energy losses because of radiation on crystal orientation is shown.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой