

## ОБНАРУЖЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОТОНОВ

*В.П.Афанасенко, В.Г.Барышевский, Р.Ф.Зуевский, А.С.Лобко,  
А.А.Москательников, В.В.Панов, В.П.Поцилуйко, С.В.Скорород,  
Д.С.Шварков*

*НИИ ядерных проблем Белорусского государственного университета  
220080, Минск*

Поступила в редакцию 20 сентября 1991 г.

Обнаружено параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ), порождаемое протонами с энергией 70 ГэВ в кристалле кремния. Определены экспериментальные значения квантового выхода ПРИ для двух углов наблюдения и его угловое распределение, проведено сравнение с соответствующими теоретически рассчитанными величинами.

Создание на базе ИФВЭ Серпуховского ускорительно-накопительного комплекса (УНК) на энергию протонов 3 ТэВ, делает актуальной задачу разработки новых способов измерения параметров пучков высокоэнергетических заряженных частиц. Одним из эффектов, который можно использовать для этой цели, является параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ), возникающее при равномерном движении релятивистской заряженной частицы в кристалле<sup>1</sup>. Угловое распределение и квантовый выход ПРИ зависят от лоренц-фактора заряженной частицы, что можно использовать для определения энергии и идентификации частиц. Кроме того, к достоинствам ПРИ можно отнести тот факт, что для разумных толщин кристаллов оптимальный квантовый выход ПРИ достигается при заметных (порядка нескольких градусов) углах наблюдения относительно направления движения частицы.

В настоящее время ПРИ достаточно подробно исследовано теоретически<sup>2-4</sup> и экспериментально<sup>5-11</sup>. Изучены его угловые, частотные, энергетические и поляризационные характеристики для кристаллов алмаза, кремния, арсенида галлия, кварца в различных экспериментальных ситуациях. Все известные экспериментальные работы выполнены на электронных пучках, что делает актуальной задачу исследования ПРИ других заряженных частиц.

В данной работе приведены первые экспериментальные результаты наблюдения ПРИ на пучке протонов с энергией 70 ГэВ. Эксперименты проводились на 14-ом канале Серпуховского протонного синхротрона У-70. Мишенью служил кристалл кремния размерами 40 × 40 × 18 мм, который располагался относительно пучка протонов таким образом, что излучаемые фотоны дифрагировали на плоскостях (220), при этом угол Брэгга составлял величину  $2 \div 6^\circ$ . Пучок протонов с энергией 70 ГэВ выводился в канал из кольцевой камеры ускорителя с помощью изогнутого кристалла и имел интенсивность  $(1 \div 5) \cdot 10^6$  частиц/сброс и угловую расходимость  $\sim 3$  мрад. Выбор указанных углов Брэгга объясняется тем, что для мишеней толщиной  $\sim 1$  см теоретические оценки дают максимальные значения квантового выхода ПРИ, а энергии излучения лежат в пределах  $30 \div 100$  кэВ. Для юстировки кристалла относительно пучка протонов использовался автоматизированный трехосный гониометр. Детектор излучения перемещался в пространстве с помощью двухкоординатного столика с шаговыми приводами. Управление механическими устройствами, накопление, отображение и первичная обработка данных проводились на ЭВМ ДВК-3М.

Детектором ПРИ служил сцинтилляционный счетчик на базе кристалла  $\text{YAlO}_3 : \text{Ce}^{3+}$  размерами  $\varnothing 25 \times 3$  мм, имеющий короткое время высвечивания ( $\tau = 30$  нс) и высокий световыход<sup>12</sup>, что позволило надежно сформировать быстрый триггер управления спектрометрическим АЦП. Энергетическое разрешение детектора по  $\gamma$ -линии 59,5 кэВ коллимированного источника  $^{241}\text{Am}$  составляло 28%. Схема регистрации была построена так, что записывались только те кванты ПРИ, временные отметки которых совпадали с импульсами сцинтилляционного телескопа канала, связанными с пролетом протона. Это позволило значительно повысить отношение сигнал/фон. Количество протонов, провазимодействовавших с мишенью, определялось по сигналам пластикового сцинтилляционного детектора размерами  $40 \times 40$  мм, который располагался в непосредственной близости от мишени и также включался в совпадения с пучковым телескопом канала.

На рис.1 изображены спектры ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ при генерации на плоскостях (220) в Si, полученных для двух углов Брэгга  $\theta_{B1} = 5,7^\circ$  и  $\theta_{B2} = 4,7^\circ$ , при этом  $\omega_1 \approx 32,4$  кэВ, а  $\omega_2 \approx 39$  кэВ. Расстояние от мишени до детектора составляло 75 см. Значения энергий ПРИ хорошо согласуются с расчетными значениями. Кроме того, были измерены квантовые выходы ПРИ для этих двух углов излучения:  $N_1 = (7,87 \pm 1,57) \cdot 10^{-6}$  квантов/ $p^+$  и  $N_2 = (1,77 \pm 0,35) \cdot 10^{-5}$  квантов/ $p^+$ . Далее были теоретически рассчитаны квантовые выходы ПРИ по формулам, приведенным в<sup>13,14</sup>:  $N_1^T = 8,42 \cdot 10^{-6}$  квантов/ $p^+$ ,  $N_2^T = 1,10 \cdot 10^{-5}$  квантов/ $p^+$ . Видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений.

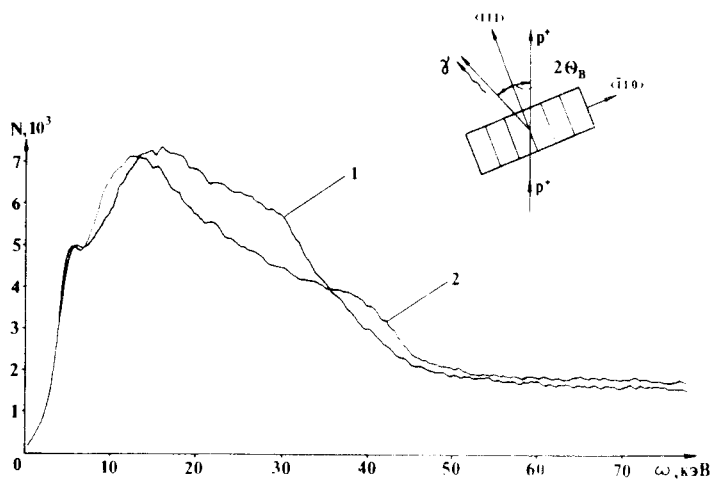


Рис. 1. Спектры ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ при генерации на плоскости (220) в кремнии: 1 - для  $\theta_{B1} = 5,7^\circ$ ; 2 - для  $\theta_{B2} = 4,7^\circ$ . На врезке - геометрия эксперимента

На рис.2 показано угловое распределение ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ при генерации на плоскостях (220) в Si. Расстояние от мишени до детектора составляло 60 см. Сканирование детектором производилось в горизонтальной плоскости со средним шагом 25 мрад. Точки на кривых получены посредством интегрирования спектров ПРИ в интервале энергий  $30 \div 100$  кэВ. Кривая 1 измерена для случая, когда протоны падали на мишень параллельно плоскостям (220). Далее мишень поворачивали так, что плоскости (220) составляли угол  $2,3^\circ$  с направлением движения протонов (значения выхода ПРИ представлены кривой 2). Кривая 3 представляет результаты численного расчета по формулам<sup>13,14</sup>, точки - разность экспериментальных значений кривых 2 и 1. Максимум в угловом распределении наблюдался под углом  $2\theta_B = 4,6^\circ$  относительно направления движения протонов. Экспериментальное значение ширины углового распределения на полувысоте  $\Delta\theta_{\text{экс}} = 50 \pm 7$  мрад,

теоретически рассчитанная величина  $\Delta\theta_{\text{теор}} = 73$  мрад.

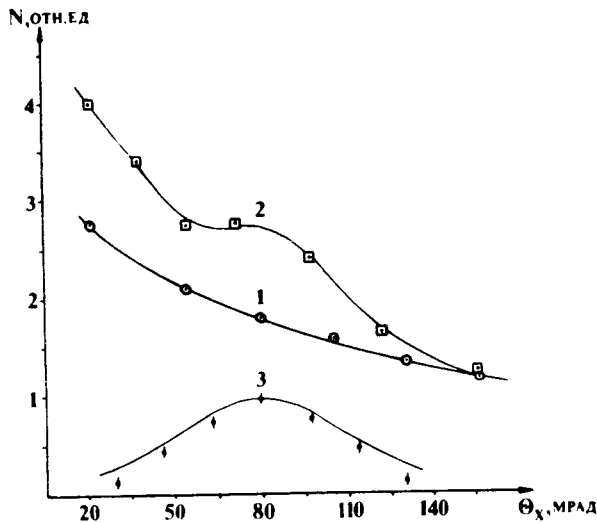


Рис. 2. Угловое распределение ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ при генерации на плоскости (220) в кремнии 1 - угол между направлением движения протонов и плоскостью (220) равен 0°; 2 - угол между направлением движения протонов и плоскостью (220) равен 2,3°; 3 - теоретическое распределение (точки - разность между 2 и 1)

Приведенные данные показывают, что в наших экспериментах действительно наблюдалось ПРИ от протонов, при этом значения энергий излучения, квантового выхода и ширины углового распределения хорошо согласуются с предсказаниями теории. Заметим, что вклад дифрагированного тормозного излучения (ДТИ) в этом случае подавлен примерно на 4 порядка, так как многократное рассеяние протонов в этом случае крайне мало.

Работа выполнена в рамках проекта ПОЛЭКС. Авторы выражают глубокую благодарность руководителю проекта ПОЛЭКС С.Б.Нурушеву за активную поддержку исследований. Авторы также благодарят сотрудника ИФВЭ В.В.Рыкалина за помощь в проведении экспериментов, сотрудников НИИ ядерных проблем М.В.Коржика за предоставление кристалла  $YAlO_3 : Ce^{3+}$  и А.А.Федорова за помощь в подготовке детектора, И.Я.Дубовскую и Г.К.Савчук за полезные обсуждения и теоретический анализ выхода ПРИ для частиц с разными массами.

1. Барышевский В.Г., Каналирование, излучение и реакции в кристаллах при высоких энергиях. Минск: БГУ, 1982.
2. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д., Изв. АН БССР, сер. физ.-мат., 1973, 2, 102.
3. Барышевский В.Г., Грубич А.О., Ле Тьен Хай., ЖЭТФ, 1988, 94, 51.
4. Гарибян Г.М., Ян Ши., Рентгеновское переходное излучение. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1983, 319.
5. Адищев Ю.Н., Барышевский В.Г., Воробьев С.А. и др., Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 295.
6. Воробьев С.А., Калинин Б.Н., Пак С.Д., Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 3.
7. Афанасенко В.П., Барышевский В.Г., Градовский О.Т. и др., Письма в ЖЭТФ, 1988, 14, 57.
8. Baryshevsky V.G., Cherepitzka S.V., Danilov V.A. et al., J. Phys. D, 1986, 19, 171.
9. Afanasenko V.P., Baryshevsky V.G., Gradovsky O.T. et al., Phys. Lett., A, 1989, 141, 311.
10. Адищев Ю.Н., Апанасевич А.П., Афанасенко В.П. и др., Материалы XVIII Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 1989, с.99.
11. Афанасенко В.П., Барышевский В.Г., Гациха С.В. и др., Письма в ЖЭТФ, 1990, 51, 213.
12. Baryshevsky V.G., Korzhik M.V., Moroz V.I. et al., NIM, 1991, B58, 291.
13. Baryshevsky V.G., Feranchuk I.D., Phys. Lett. A, 1976, 57, 183.
14. Feranchuk I.D., Ivashin A.V., J. de Phys. 1985, 46, 1981.