

ОБНАРУЖЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С МОНОКРИСТАЛЛОМ АЛМАЗА

С.А.Воробьев, Б.Н.Калинин, С.Пак, А.П.Потылицын

Обнаружен выход монохроматического излучения с энергией около 19 кэВ при рассеянии электронов с энергией 600 и 900 МэВ на (100) плоскостях алмаза. Измеренные ориентационные и спектральные характеристики указывают, что впервые наблюдалось параметрическое (квазичеренковское) рентгеновское излучение.

Во многих теоретических работах (см., например, монографии ^{1,2} и цитированную там литературу) изучалась проблема излучения рентгеновских фотонов под брэгговскими углами при влете ультрарелятивистских электронов в монокристалл.

При прохождении ультрарелятивистского электрона через монокристалл (поле которого с точностью до членов γ^{-2} соответствует пучку электромагнитного излучения с непрерывным спектром) в направлениях, соответствующих рефлексам лауэграммы должно распространяться монохроматическое излучение, частота которого определяется типом и ориентацией кристалла:

$$\omega_n = \frac{\pi n}{a |\cos \psi|} \quad (1)$$

Здесь a – постоянная решетки, ψ – угол между импульсом электрона и вектором обратной решетки (см. рис. 1), $n=1, 2, 3$ – порядок дифракции. На возможность существования подобного эффекта указывал также Тер-Микаелян ³.

Несмотря на подробную теоретическую проработку данной проблемы (например, ⁴⁻⁶) экспериментальные исследования до сих пор отсутствовали. В нашей работе сделана попытка устранить этот пробел.

Эксперимент проводился на внутреннем электронном пучке Томского синхротрона. В качестве мишени использовался монокристалл алмаза $10 \times 6 \times 0,35$ мм³ (ось $\langle 110 \rangle$ почти перпендикулярна большой грани), который помещался в гониометре с двумя осями вращения, перпендикулярными электронному пучку. Угловой шаг гониометра составлял $2 \cdot 10^{-5}$ рад. Монокристалл в гониометре закреплялся таким образом, чтобы кристаллографическая ось $\langle 001 \rangle$ совпадала с максимально возможной точностью с вертикальной осью го-

ниометра. Пучок электронов с энергией $E_0 = 900$ МэВ, расходимостью 10^{-4} рад и монохроматичностью 0,5% сбрасывался на мишень в течение $\tau = 15 \cdot 10^{-3}$ с. Мониторинг числа ускоренных электронов осуществлялся индукционным датчиком ⁷.

Детектором рентгеновского излучения являлся сцинтилляционный спектрометр (кристалл NaJ(Tl) толщиной 1 мм с бериллиевым входным окном, просматриваемый фотоумножителем ФЭУ-85), энергетическое разрешение которого для линии Co^{57} $\omega = 14$ кэВ составляло $\Delta\omega / \omega = 35\%$, а для линии ^{139}Ce $\omega = 34$ кэВ – 25%.

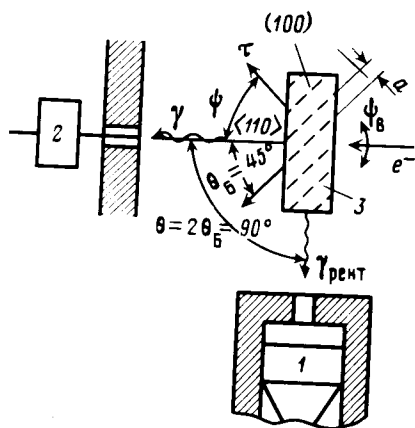


Рис. 1. Схема расположения аппаратуры: 1 – рентгеновский спектрометр, 2 – квантометр, 3 – монокристалл алмаза

Спектрометр был размещен под углом $\theta = \pi/2$ относительно электронного пучка в плоскости, строго перпендикулярной вертикальной оси гониометра, на расстоянии $L = 1$ м от кристалла. Размер входного коллиматора соответствовал угловой коллимации $\Delta\theta = \pm 3 \cdot 10^{-3}$ рад (см. рис. 1). Спектрометрическая информация подавалась на анализатор УНО-1024, который запускался во время сброса электронов на мишень. Энергетический эквивалент порога составлял $\omega_{\text{пор}} = 12$ кэВ.

Поскольку угловая расходимость исследуемого излучения имеет порядок γ^{-1} ($\sim 0,6$ мрад в нашем случае), ориентирование монокристалла (т.е. совмещение рефлекса от какой-либо кристаллографической плоскости с осью детектора) является достаточно сложной проблемой. Для решения этой задачи мы использовали следующий факт. При движении электронов вдоль оси $\langle 110 \rangle$ плоскости (100) располагаются под углом $\theta_B = 45^\circ$ к импульсу электрона, т.е. для нашего случая выполняется условие возникновения излучения. Процедура совмещения кристаллографической оси с направлением движения электронов, основанная на использовании эффекта излучения при каналировании, является сравнительно простой ⁷.

На рис. 2, а приведена ориентационная зависимость (ОЗ) тока квантометра (кривая 1), измеряющего полную энергию жесткого γ -излучения, направленного вперед (в угол $\Delta\theta = \pm 0,6$ мрад). Максимум в ориентационной зависимости соответствует движению электронов вдоль кристаллографической оси (условный нуль гониометра). На этом же рисунке приведена одновременно измеренная ОЗ счета рентгеновского спектрометра. Для угла $\psi_{\text{в max}} = 2,3$ мрад наблюдается отчетливо выраженный максимум. После поворота кристалла на данный угол мы провели измерения аналогичных ориентационных зависимостей при вращении кристалла вокруг горизонтальной оси (см. рис. 2, б). Как следует из этих рисунков, ориентация, соответствующая максимуму счета спектрометра, не совпадает с ориентацией, соответствующей осевому каналированию ($\psi_{\text{в max}} = 2,3$ мрад; $\psi_{\text{г max}} = 1,9$ мрад). С нашей точки зрения это обусловлено погрешностями оптической юстировки положения детектора. На рис. 3, а приведен спектр излучения, измеренный для ориентации $\psi_{\text{в max}}$, $\psi_{\text{г max}}$ (кривая 1). Можно отметить, что в спектре наблюдается пик для энергии $\omega_0 = 19,5 \pm 0,3$ кэВ, причем полная ширина на полувысоте составляет $\sim 30\%$. Это значение совпадает с собственным разрешением детектора для этой энергии.

Для этой же ориентации кристалла был измерен спектр для угла излучения $\theta = 85^\circ$ (рис. 3, а, кривая 2). Никаких особенностей в спектре не наблюдается.

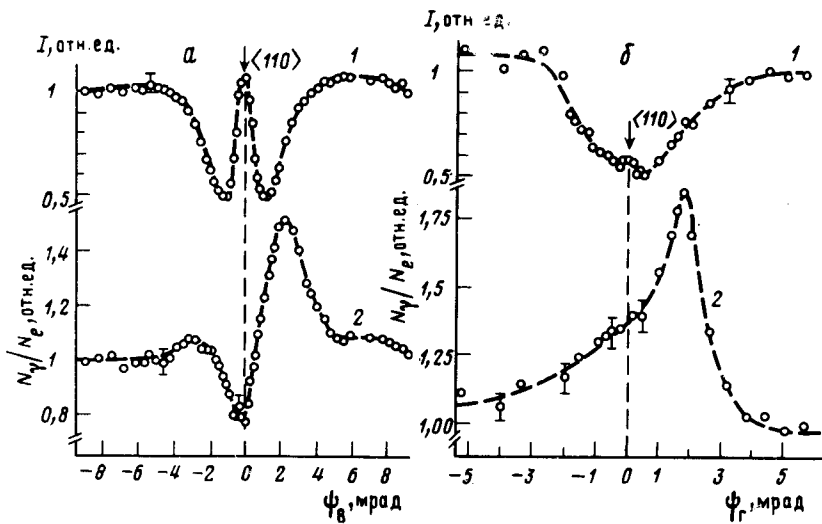


Рис. 2

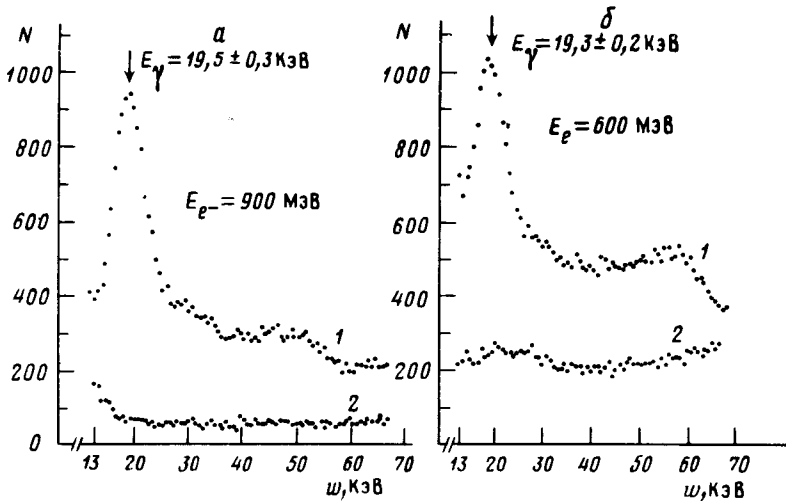


Рис. 3

Рис. 2. Ориентационные зависимости тока квантометра (кривая 1, рис. а, б) и выхода рентгеновских фотонов (кривая 2, рис. а, б)

Рис. 3. а – Измеренные спектры излучения при экспозиции на $6 \cdot 10^{12}$ ускоренных электронов с $E_0 = 900$ МэВ для ориентации $\psi_{\beta \max}$, $\psi_{\gamma \max}$ для угла вылета фотонов $\theta = 90^\circ$ (кривая 1) и $\theta = 85^\circ$ (кривая 2); б – то же самое для угла вылета $\theta = 90^\circ$ и $E_0 = 600$ МэВ для ориентации $\psi_{\beta \max}$, $\psi_{\gamma \max}$ (кривая 1) и разориентированного кристалла (кривая 2)

Для контроля мы провели спектральные измерения в прежней геометрии ($\theta = 90^\circ$), но для энергии электронов $E_0 = 600$ МэВ. Для ориентации $\psi_{\beta \max}$, $\psi_{\gamma \max}$ в спектре наблюдается идентичный максимум с энергией $\omega_0 = 19,3 \pm 0,2$ кэВ (рис. 3, б, кривая 1).

При разориентации кристалла на угол $\psi_{\beta} = 25$ мрад максимум исчезает (рис. 3, б, кривая 2).

Для нашей геометрии ненулевой вклад в дифракционную картину дают порядки $n = 4, 8, \dots$, что соответствует энергии излученных фотонов $\omega_n = 9,8; 19,6; \dots$ кэВ (см. формулу 1). Значение $\omega_4 = 9,8$ кэВ лежит ниже порога нашей аппаратуры, а величина $\omega_8 = 19,6$ кэВ хорошо согласуется с измеренными значениями.

Оценка выхода фотонов с данной энергией (площадь под пиком) была сделана с учетом поглощения фотонов в материале мишени, выходного фланца, а также с учетом эффектив-

ности спектрометра и формы линии:

$$N_{\gamma} = (0,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-8} \text{ фотона/}e^{-} \quad (E_0 = 900 \text{ МэВ})$$

$$N_{\gamma} = (0,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-8} \text{ фотона/}e^{-} \quad (E_0 = 600 \text{ МэВ})$$

По нашему мнению, описанные ориентационные и спектральные характеристики излучения позволяют сделать вывод о том, что в эксперименте впервые наблюдалось параметрическое рентгеновское излучение⁸ (или квазичеренковское излучение, следуя терминологии работы²).

В заключение, авторы выражают благодарность В.Г.Барышевскому и И.Д.Феранчуку за многочисленные стимулирующие обсуждения данной проблемы.

Литература

1. *Барышевский В.Г.* Каналирование, излучение и реакции в кристаллах при высоких энергиях. Минск, изд. БГУ, 1982 г.
2. *Гарибян Г.М., Ян Ши.* Рентгеновское переходное излучение. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1983 г.
3. *Тер-Микаелян М.Л.* Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1969 г.
4. *Барышевский В.Г., Феранчук И.Д.* Изв. АН БССР, сер. физ.-мат. наук, № 2, с. 102, 1973 г.
5. *Авакян А.Л., Агинян М.А., Гарибян Г.М., Ян Ши.* ЖЭТФ, 1975, 68, 2038.
6. *Афанасьев А.М., Агинян М.А.* ЖЭТФ, 1978, 74, 570.
7. *Адищев Ю.Н., Воробьев С.А., Забаев В.Н. и др.* ЯФ, 1982, 35, 108.
8. *Baryshevsky V.G., Feranchuk J.D.* J. Physique, 1983, 44, 913.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
Томского политехнического института
им. С.М.Кирова

Поступила в редакцию
10 августа 1984 г.