

ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОЛСТЫХ КРИСТАЛЛАХ

*А.П.Антипенко, С.В.Блажевич, Г.Л.Бочек, В.И.Кулибаба,
Н.И.Маслов, Н.Н.Насонов, В.Д.Овчинник, С.П.Фомин,
Б.И.Шраменко, Н.Ф.Шульга*

*Физико-технический институт АН УССР
310108, Харьков*

Поступила в редакцию 12 декабря 1990 г.

Предложена методика, позволившая впервые измерить истинные спектрально-угловые распределения γ -излучения электронов высоких энергий в толстых кристаллах. Обнаружены аномалии в угловых распределениях жесткого γ -излучения при прохождении пучка электронов через кристалл кремния вдоль кристаллографической оси.

1. Взаимодействие ультрарелятивистских электронов с толстыми кристаллами, ориентированными кристаллографической осью по пучку, сопровождается множественным рождением гамма-квантов, которые при использовании традиционных методик регистрируются как один квант суммарной энергии ^{1,2,3}. Это приводит к существенному искажению истинных спектров излучения, что, в свою очередь, затрудняет анализ механизмов генерации излучения в ориентированных кристаллах.

В настоящей работе впервые предложена и применена методика, позволяющая измерять истинные спектрально-угловые распределения интенсивных потоков гамма-квантов в широком интервале энергий γ -излучения (0,1 ÷ 600 МэВ), избегая искажения спектров из-за множественного рождения квантов. Методика основана на комптоновском рассеянии излученных γ -квантов и последующем измерении энергии рассеянных на определенный угол квантов спектрометром полного поглощения.

Представлены первые результаты, которые указывают на наличие аномалии (провала в направлении кристаллографической оси) в угловых распределениях

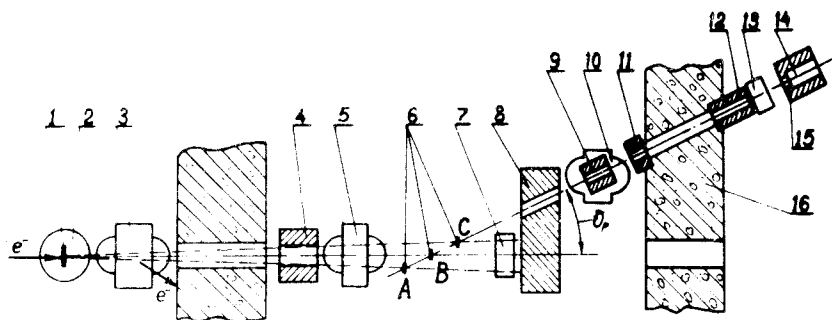


Рис. 1. Схема установки: 1 - мишень, 2 - гониометр, 3 - отклоняющий электромагнит; 4 - коллиматор фотонного пучка; 5 и 10 - очищающие электромагниты; 6 - мишень-рассеиватель; 7 - ионизационная камера; 8 - свинцовый блок; 9, 11 и 12 - коллиматоры измерительного канала; 13 - очищающий магнит; 14 - γ -спектрометр; 15 - защитный домик; 16 - бетонная защитная стена

жеских ($\omega \gtrsim 50 \text{ МэВ}$) γ -квантов. Для более мягких γ -квантов наблюдается ярко выраженный максимум в угловом распределении излучения, причем ширина этого распределения практически не зависит от энергии излученного фотона. Теоретический анализ полученных результатов показал, что отмеченные особенности в угловом распределении излучения обусловлены когерентным эффектом в излучении надбарьерных электронов на цепочках атомов кристалла.

2. Измерения проводились на ускорителе ЛУ-2000 ХФТИ. Схема установки для измерения спектрально-угловых распределений излучения показана на рис.1. γ -кванты, рассеянные на мишени-рассеивателе (6) в сторону измерительного канала регистрируются с помощью сцинтилляционного спектрометра полного поглощения (14), описанного в 4. Для измерения углового распределения выходящего из кристалла фотонного потока мишень-рассеиватель из бериллия дистанционного перемещается вдоль оси измерительного канала с угловой точностью $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ рад. Угловое разрешение измерительного комплекса, определяющееся поперечными размерами мишени-рассеивателя и электронного пучка на кристалле, составляло при измерениях $\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ рад. С помощью указанной методики были измерены спектрально-угловые распределения излучения электронов с энергией 1,2 ГэВ в кристаллах кремния различной толщины ориентированных осью $\langle 111 \rangle$ вдоль падающего пучка электронов.

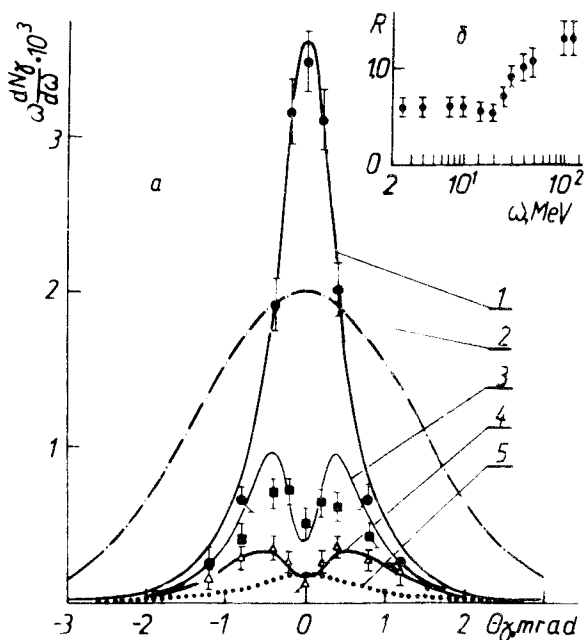


Рис. 2. *a* - Угловые распределения γ -излучения из ориентированного кристалла Si: 1,3,4 - энергия γ -квантов 10, 50 и 100 МэВ, соответственно, 5 - угловое распределение γ -излучения из разориентированного кристалла (интеграл по спектру); 2 - угловое распределение электронов (в относительных единицах); *б* - зависимость отношения ширины распределения γ -излучения из ориентированного и разориентированного кристаллов от энергии γ -квантов

На рис. 2 представлены результаты измерений зависимости плотности излучения от угла излучения при различных значениях энергий γ -квантов, соответствующие прохождению электронов через кристалл кремния толщиной 1,5 мм. На такой толщине уже возможно излучение нескольких γ -квантов (см., например, 1,2).

3. Полученные результаты показывают, что в области малых энергий γ -квантов ($\omega \sim 10 \text{ МэВ}$) плотность излучения электронов в направлении кристаллической оси более чем в двадцать раз превосходит плотность излучения в разориентированном

кристалле. Это превышение оказывается существенно большим, чем превышение, наблюдавшееся ранее в работах ^{5,6}. Данное различие обусловлено тем, что в ^{5,6} измерялся интегральный по некоторой области энергий γ -квантов выход фотонов, тогда как предложенная методика дает истинные спектрально-угловые распределения излучения.

Для γ -квантов с энергией $\omega \geq 50$ МэВ в направлении кристаллографической оси наблюдается минимум в угловом распределении излучения и максимум под некоторым углом θ_m относительно этой оси, причем θ_m растет с ростом энергии γ -кванта.

Обратим внимание на то (см. рис. 2б), что в области малых частот ($\omega < 30$ МэВ) ширина углового распределения γ -квантов практически не зависит от энергии фотона, тогда как в области $\omega > 30$ МэВ с ростом ω ширина этого распределения растет.

4. Измерение абсолютных значений спектрально-угловых распределений излучения электронов в толстых кристаллах открыло возможность проведения количественного сравнения результатов эксперимента с предсказаниями теоретических моделей и проверки гипотез, лежащих в основе этих моделей. Сплошными линиями на рис. 2 представлены результаты вычислений вклада в излучение частиц, совершающих надбарьерное движение вблизи кристаллографической оси. Вычисления проводились с учетом эволюции углового распределения пучка электронов в кристалле, связанной с многократным рассеянием частиц на атомах решетки. Для частиц, движущихся под углом ψ к кристаллографической оси, превышающем критический угол каналирования ψ_c , вычисления проводились по формулам модифицированной теории когерентного излучения; при $\psi < \psi_c$ учитывалось искривление траектории электрона в поле цепочки атомов кристалла ^{7,8}. Вклад в излучение каналированных частиц не учитывался.

Удовлетворительное количественное согласие результатов теории и эксперимента свидетельствует о правомерности сделанных с целью упрощения расчетов предположений и показывают, что наблюдаемые в эксперименте закономерности спектрально-угловых распределений излучения электронов в толстом кристалле обусловлены особенностями когерентного излучения надбарьерных электронов в поле цепочки атомов кристалла. Таким образом, мы видим, что в рассматриваемом диапазоне энергий частиц и толщин кристаллов надбарьерные частицы вносят определяющий вклад в формирование угловых распределений излучения. Причина этого, по-видимому, состоит в том, что в рассматриваемом диапазоне энергий движение электрона в поле цепочки атомов в условиях каналирования является крайне неустойчивым, в результате чего происходит быстрое деканалирование частиц, т.е. их переход из подбарьерных в надбарьерные состояния (см. ⁹).

В заключение отметим, что предложенный метод может быть использован для измерения истинных (без наложений) спектрально-угловых распределений излучения и при энергиях электронов, значительно больших 1 ГэВ. При этом его можно рассматривать как метод, альтернативный методу, основанному на измерении характеристик электронно-позитронных пар, образованных излученными фотонами.

Литература

1. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Гюрджян В.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 48, 577.
2. Адейшвили Д.И. и др. ЯФ, 1984, 40, 318.
3. Belkacem A. et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 2667.
4. Бочек Г.Л. и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, 1980, вып. 2(6), 46 - 48
5. Алейник А.П. и др. ЖТФ, 1986, 56, 1416.
6. Антипенко А.П. и др. Препринт ХФТИ-90-33, Харьков, 1990 г. 29 с.

7. *Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. УФН, 1982, 137, 561.*
 8. *Фомин С.П. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1990, вып. 3(11), с. 29.*
 9. *Базылев В.А. и др. ДАН СССР, 1986, 288, 105.*
-