

СТРУКТУРА В ОРИЕНТАЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ И СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ МОНОКРИСТАЛЛЫ АЛМАЗА И КРЕМНИЯ

*В.Б.Ганенко, Л.Э.Генденштейн, И.И.Мирошниченко,
В.Л.Мороховский, Е.В.Пегушин, В.М.Санин, С.В.Шалацкий*

Обнаружена не наблюдавшаяся ранее структура в ориентационных зависимостях прохождения электронов с энергией 1,2 ГэВ вблизи кристаллографической оси $\langle 110 \rangle$ и плоскости (001) монокристаллов алмаза и кремния. Результаты эксперимента для осевого случая указывают на логарифмическую зависимость потенциала.

В связи с обнаружением электромагнитного излучения ультрарелятивистских каналированных и надбарьерных частиц [1 – 3], предсказанного теоретически в [4 – 6], а также в связи с открывающимися возможностями практического использования этого излучения, исследование динамики и излучения ультрарелятивистских частиц в кристаллах приобретает особый интерес.

Прохождение положительно заряженных частиц через кристаллы связывалось, как правило, с явлением каналирования. В то же время в вопросе о связанном движении отрицательно заряженных частиц большой энергии в кристаллах еще нет ясности из-за очень ограниченного объема экспериментальных данных.

Нами выполнены эксперименты по исследованию прохождения электронов с энергией 1,2 ГэВ через монокристаллы алмаза (0,3 мм) и кремния (0,24 мм) вблизи кристаллографической оси $\langle 110 \rangle$ и плоскости (100), и измерены спектральные характеристики возникающего при этом гамма-излучения. Эксперименты проводились на линейном ускорителе электронов харьковского физико-технического института. Расходимость электронного пучка не превышала $7 \cdot 10^{-5}$ рад его размеры на мишени $1 \times 1,5$ мм², разброс по энергии – $\Delta E/E \approx 0,2\%$.

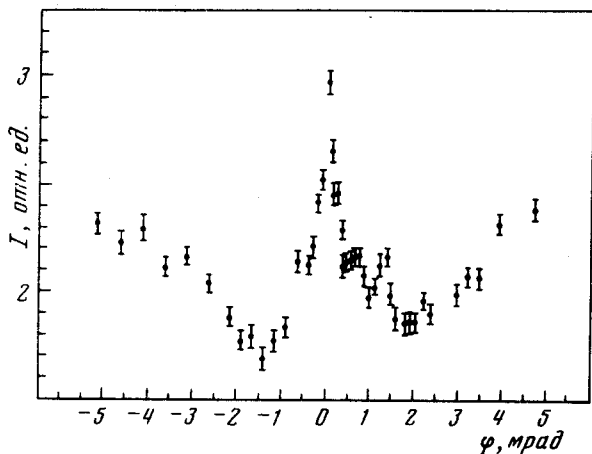


Рис. 1. Ориентационная зависимость прохождения электронов вблизи плоскости (100) монокристалла алмаза

В эксперименте на прохождение измерялась интенсивность прошедших через кристалл электронов, коллимированных в угле $\sim 10^{-4}$ рад в направлении падающего пучка, в зависимости от угла ϕ между направлением пучка и осью или плоскостью кристалла. На рис. 1 приведена ориентационная зависимость для плоскости (100) кристалла алмаза. Наблюдается anomalous прохождение электронов в широкой области углов $|\phi| \leq 7 \phi_c$, где ϕ_c — критический угол каналирования (для плоскости (100) $\phi_c \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$ рад), причем интенсивность в максимуме больше, чем для разориентированного кристалла. Такая ширина пика указывает на регулярный характер движения заметной части электронов даже при их движении относительно плоскостей под углами, намного превышающими угол каналирования, и на уменьшение деканалирующих факторов с ростом энергии.

При исследовании прохождения электронов вблизи оси 110 в алмазе (рис. 2, а) и кремнии (рис. 2, б) обнаружена тонкая структура ориентационной зависимости, проявляющаяся в наличии двух пар симметрично расположенных пиков. Пики при меньших углах связаны, по-видимому, с ограничениями на минимальное и максимальное расстояние до оси при "розетонном" движении. Оценка их положения дает $\phi_1 \approx \phi_c^R \sqrt{a/R}$, где $\phi_c^R = (2Ze^2/Ed)^{1/2}$, a — радиус экранирования, и R равно радиусу осевого канала для электронов ($R_{Si} \approx 0,95 \text{ \AA}$; $R_C \approx 0,65 \text{ \AA}$). Наличие второй пары пиков мы связываем с аномально большим вкладом круговых (и близких к ним) траекторий, что имеет место в случае, когда осевой потенциал $U(r)$ меняется в некоторой области логарифмически. Для круговых траекторий $v_{\perp}^2 = rU'(r)/E$, и, если $rU'(r) \approx \text{const}$, поперечная скорость не зависит от радиуса орбиты. Согласно [7], именно таков характер зависимости $U(r)$: удовлетворительной аппроксимацией является $U(r) = (2Ze^2/d) \ln(Ca/r)$. Отсюда получаем оценку для положения вторых максимумов $\phi_2 \approx \phi_c^R$. Расчетные положения пиков отмечены на рис. 2, б стрелками. Видно, что предсказываемые теорией две пары пиков наблюдаются в эксперименте, хотя вопрос о количественном согласии теории с экспериментом нуждается в дальнейшем исследовании.

Таким образом, проведенные эксперименты на прохождение ультрарелятивистских электронов через кристаллы указывают, по-видимому,

на существование регулярного движения электронов вблизи кристаллографических плоскостей даже при углах влета, значительно превышающих критический угол каналирования. Ориентационные зависимости в осевом случае весьма чувствительны к виду осевого потенциала, и дают возможность определить его характеристики.

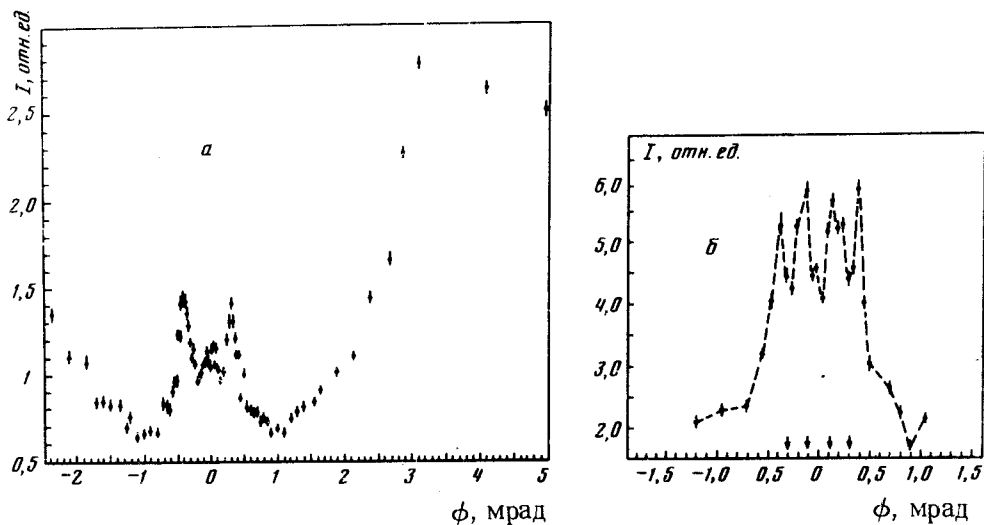


Рис. 2. Ориентационная зависимость прохождения электронов вблизи оси $\langle 110 \rangle$ монокристаллов алмаза (а) и кремния (б)

Обнаруженные в эксперименте особенности прохождения электронов через монокристаллы могут дать ценную информацию о связи определенных характеристик излучения каналированных частиц с динамикой частиц в кристаллах, о соотношении между излучением каналированных и надбарьерных электронов. Наличие спонтанного гамма-излучения каналированных электронов было экспериментально подтверждено в работе [2] для электронов с энергией 56 МэВ. Результаты предыдущих исследований в области высоких энергий [8 – 14] указали на значительное увеличение интенсивности излучения электронов в кристалле в низкоэнергетической области спектра ($E_\gamma < 100$ МэВ) при движении под малыми углами относительно кристаллографических осей и плоскостей. Однако, наличие противоречий в имеющихся данных, расхождения в абсолютных величинах интенсивности излучения, использование коллимации фотонных пучков существенно затрудняет интерпретацию полученных результатов, хотя авторы большинства проведенных работ интерпретируют наблюдавшееся излучение, как излучение каналированных электронов.

Одна из задач настоящей работы состояла в проведении абсолютных измерений сечений излучения электронов в кристаллах.

Результаты измерений указывают на ряд характерных особенностей спектров излучения электронов в кристаллах. Во-первых, спектральные распределения интенсивности излучения имеют максимум вблизи энергий фотонов $E = 20$ и 30 МэВ для кристаллов кремния и алмаза, соответственно. Во-вторых, значения отношения в максимуме интенсив-

ности излучения электронов в кристалле к тормозному излучению в аморфной среде, полученные нами, составляют 16 – 17 для кремния и 20 – 25 для алмаза. В-третьих, результаты измерений указывают на возможное существование определенной структуры в спектрах излучения, проявляющейся в виде узких пиков при энергиях фотонов в области от нескольких МэВ до нескольких десятков МэВ, (рис.3). Наблюдаемые в [2] пики в спектрах излучения электронов с энергией 56 МэВ, движущихся в режиме плоскостного каналирования в кристалле кремния связывались с гамма-излучением при переходах между уровнями, связанного поперечного движения. Можно указать на возможную причину проявления квантовых уровней в случае более высоких (1,2 ГэВ) энергий. Отличие реального потенциала цепочки атомов от кулоновского снимает вырождение, присущее энергетическим уровням в кулоновском поле. Причем для высоколежащих уровней образующаяся после снятия вырождения группа уровней становится приблизительно эквидистантной. В дипольном приближении основными являются переходы между соседними уровнями и в рассматриваемом случае все переходы внутри одной группы сопровождаются излучением гамма-квантов одинаковой частоты. Эти частоты различны для разных групп уровней, что может и привести к появлению наблюдаемой структуры в спектре излучения.

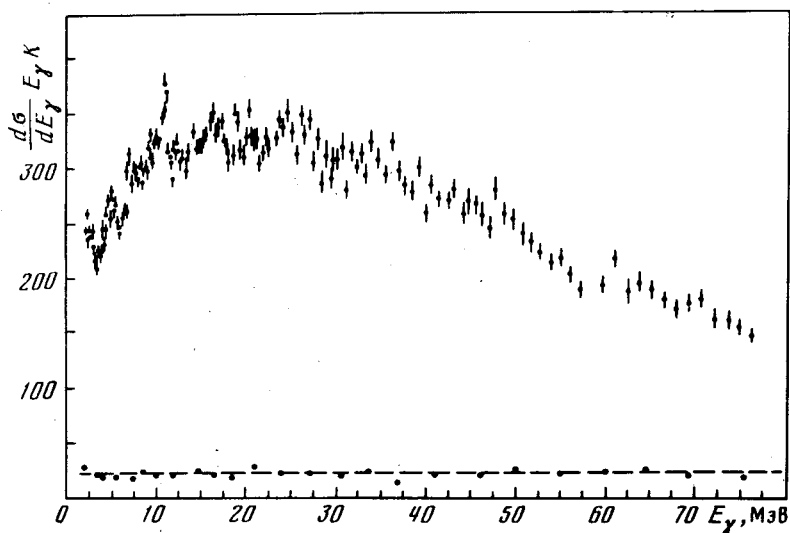


Рис. 3. Низко-энергетическая часть спектра излучения электронов движущихся вблизи оси $\langle 111 \rangle$, в монокристалле кремния, ... – разориентированный кристалл

При увеличении угла влета частиц в кристалл относительно оси доля связанного с цепочкой потока уменьшается и при выходе за пределы критического угла излучение определяется преимущественно надбарьерными частицами. Результаты измерений при $\phi = 5 \cdot 10^{-4}$ (это соответствует $1,7 \phi_c$) показывают уменьшение спектральной интенсивности излучения при $E_\gamma < 80$ МэВ, достигающее 15 – 20%, что может

быть обусловлено уменьшением вклада в излучение каналированных частиц. Для энергий $E_{\gamma} > 80$ МэВ спектральные распределения для углов $\phi = 0$ и $\phi = 1,7\phi_c^R$ совпадают. Таким образом, результаты эксперимента указывают, что наблюдаемое значительное увеличение интенсивности излучения в данных условиях создается надбарьерными частицами. Это можно сказать и относительно других экспериментов [8 – 14], где было замечено увеличение интенсивности излучения.

Большое значение для измерений истинной формы спектра имеет отсутствие коллимации фотонного пучка. При коллимации происходит существенная монохроматизация спектра за счет сильного уменьшения интенсивности излучения в области энергий, превышающих максимум в спектральном распределении. Это обстоятельство указывает на то, что излучение в области максимума интенсивности, где вклад каналированных частиц наибольший, имеет более острую направленность, чем излучение надбарьерных частиц.

Авторы благодарны В.А.Вишнякову, В.М.Кобезскому, В.И.Попенко, С.Ф.Шевченко за содействие в получении требуемых параметров пучка, В.Е.Сторижко, А.Я.Головне, Б.А.Немашкало, Л.Я.Колесникову за предоставленную экспериментальную аппаратуру и Н.Ф.Шульге за обсуждение результатов.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
3 июня 1980г.

После переработки
21 августа 1980г.

Литература

- [1] И.И.Мирошниченко, Д.Д.Мёрри, Р.О.Авакян, Т.Х.Фигут. Письма в ЖЭТФ, 29, 786, 1979.
- [2] R. L. Swent et al. Phys. Rev. Lett., 43, 1723, 1979.
- [3] M. J. Alguard et al. Phys. Rev., Lett., 42, 1148, 1979.
- [4] М.А.Кумахов. ЖЭТФ, 72, 1489, 1977.
- [5] А.И.Ахизер, И.А.Ахизер, Н.Ф.Шульга. ЖЭТФ, 76, 1244, 1979.
- [6] Н.Ф.Шульга. Письма в ЖЭТФ, 32, 179, 1980.
- [7] И.Линхард. УФЖ, 99, 250, 1969.
- [8] С.А.Воробьев и др. Письма в ЖТФ, 4, 1340, 1976.
- [9] V. N. Kalinin et al. Phys. Lett., A70, 447, 1979.
- [10] С.А.Воробьев и др. Письма в ЖЭТФ, 29, 414, 1979.
- [11] Yu. Adishchev et al. Phys. Lett., A75, 316, 1980.
- [12] В.И.Витько и др. Письма в ЖТФ, 5, 1291, 1979.
- [13] Г.Л.Бочек и др. ВАИТ, Серия: Техника физического эксперимента вып. 2(4), 1979.
- [14] А.О.Аганьянц, Ю.А.Вартанов, Г.А.Вартапетян, М.А.Кумахов, Х.Трикалинос, В.Я.Яралов. Письма в ЖЭТФ, 29, 554, 1979.