

НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО γ -ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ $E = 900$ МэВ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В АЛМАЗЕ

*С.А.Воробьев, В.Н.Забавин, Б.Н.Калинин,
В.В.Каплин, А.П.Потылицын*

В работе измерены спектры γ -излучения при прохождении электронов с энергией $E_0 = 900$ МэВ через монокристалл алмаза и графитовую мишень той же радиационной толщины. Показано, что при каналировании электронов выход γ -квантов с энергией $\omega = 16$ МэВ в ~ 50 раз превышает выход для разориентированного алмаза или графита.

В недавних теоретических работах [1 – 5] обсуждаются характеристики специфического электромагнитного излучения при каналировании ультрарелятивистских заряженных частиц в кристаллах. Ранее механизм такого излучения обсуждали для электронов низких энергий [6, 7]. По сравнению с известными синхротронным и ондуляторным излучениями, спектр фотонов при каналировании сдвинут в жесткую область, а спектральную плотность предполагают на два – три порядка большей, чем для тормозного излучения. Электромагнитное излучение с подобны-

ми свойствами представляет значительный интерес, в том числе для прикладных целей, поэтому необходимы эксперименты по его обнаружению и исследованию. Указание на возможность γ -излучения электронов при каналировании, по-видимому, содержится в аномальном увеличении потока энергии тормозных фотонов в кристаллах [8], а также в предварительных результатах об усилении спектральной плотности выхода низкоэнергетических γ -квантов [9, 10].

В настоящей работе представлены первые экспериментальные результаты исследования спектрального состава и ориентационных зависимостей выхода γ -излучения для электронов с энергией $E = 900$ МэВ, проходящих через монокристалл алмаза в режиме осевого каналирования.

Измерения выполнены на внутреннем электронном пучке Томского синхротрона. Схема эксперимента аналогична ранее приведенной [9]. Электроны, проходя через монокристалл алмаза толщиной $0,35$ мм ($0,0028$ рад. ед. длины), помещенный в гониометрическое устройство, излучают фотоны в конусе с угловым раствором $\Delta\theta \sim \gamma^{-1}$ (γ — Лоренц-фактор). Для энергии $E = 900$ МэВ $\gamma^{-1} = 0,55 \cdot 10^{-3}$ рад, поэтому коллиматор для фотонного пучка выбирали $\theta_c = 0,6 \cdot 10^{-3}$ рад. Спектральный состав излучения $N_\gamma(\omega)$ исследовали с помощью парного магнитного γ -спектрометра с энергетическим разрешением $\xi = 6 - 7\%$ в интервале энергий $\omega = 8,5 - 40$ МэВ, а для γ -квантов $\omega = 200$ МэВ $\xi = 3\%$. Полную энергию фотонного пучка измеряли гаусс-квантометром с погрешностью 3% . Ток ускорителя измеряли индукционным датчиком (измерялось число электронов N_e^* на равновесной орбите непосредственно перед сбросом на мишень для каждого цикла ускорения), с погрешностью относительных измерений тока 3% . Угловая расходимость внутреннего электронного пучка, по данным обратного рассеяния лазерного излучения [11], не превышала $(1 - 3) \cdot 10^{-4}$ рад, что меньше критического угла осевого каналирования $\psi_c = 3 \cdot 10^{-4}$ рад.

На рис. 1 показаны полный выход Q/N_e и выход γ -квантов с энергией $\omega = 20$ МэВ в зависимости от угла ψ_B между плоскостью $(1\bar{1}0)$ алмаза и импульсом электрона p_1 . Рис. 1,а соответствует разориентации в плоскости (001) $\psi_\Gamma = 0$ (ψ_Γ — угол между плоскостями (001) и $(p_1, <1\bar{1}0>)$). При прохождении электронов вдоль оси $<110>$ наблюдается максимум как для полной энергии Q/N_e , так и для выхода γ -квантов N_γ/N_e $\omega = 20$ МэВ, что противоречит предсказаниям теории когерентного тормозного излучения [12]. Полная ширина максимума совпадает для обеих зависимостей $\Delta\psi \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$ рад, что согласуется с величиной $2\psi_c$ критического угла при учете угловой расходимости электронного пучка. На ширину максимума выхода Q/N_e заметно не влияет коллимация γ -пучка в пределах $\theta_c = (0,4 - 2,5) \cdot 10^{-3}$ рад. На рис. 1,б приведены результаты, полученные при выходе из плоскости (001) ($\psi_\Gamma = 1,4 \cdot 10^{-3}$ рад $> \psi_c$), и аномалий не наблюдали ни в полном выходе, ни в выходе γ -квантов $\omega = 20$ МэВ.

Для исследования спектральных характеристик излучения нами измерены γ -спектры, нормированные на одно число электронов: 1) $N_\gamma(\omega)_0$ — для ориентированного алмаза ($\psi_B = \psi_\Gamma = 0$ — каналирование вдоль $<110>$ оси); 2) $N_\gamma(\omega)_x$ — для разориентированного алмаза ($\psi_B = 3^\circ$, $\psi_\Gamma = 0,5^\circ$); 3) $N_\gamma(\omega)_{\Gamma p}$ — для графитовой мишени с толщиной равной алмазной (в

радиационных длинах). На рис. 2 приведены отношения выходов γ -квантов от ориентированного алмаза к резориентированному $\eta_1 = N_{\gamma}(\omega)_o / N_{\gamma}(\omega)_x$ и к графиту $\eta_2 = N_{\gamma}(\omega)_o / N_{\gamma}(\omega)_{Гр}$. При нахождении отношения η устраняются погрешности, связанные с определением эффективности γ -спектрометра в области низких энергий. Для γ -квантов с энергией $\omega \approx 16$ МэВ наблюдается максимальное превышение выхода $\eta_{1max} \approx 43$ и $\eta_{2max} \approx 60$, а для γ -квантов $\omega \geq 120$ МэВ выходы практически одинаковы для всех трех случаев. Для энергий $\omega < 16$ МэВ наблюдается статистически достоверный спад отношения выходов γ -квантов.

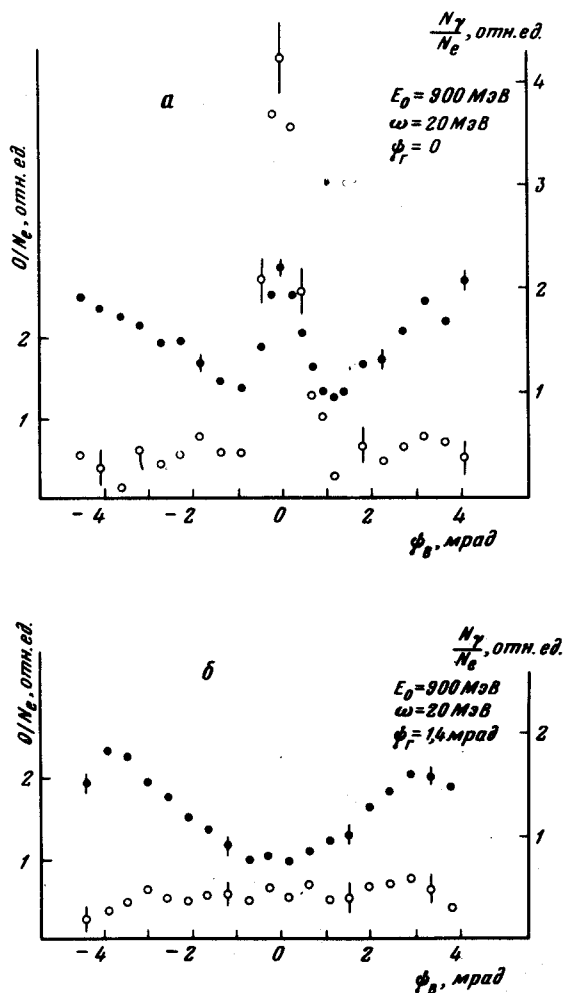


Рис. 1. Ориентационные зависимости полного выхода излучения (темные кружки) и выхода γ -квантов с энергией $\omega = 20$ МэВ (светлые кружки)

Наблюдаемый аномальный выход низкоэнергетичных γ -квантов может быть объяснен излучением электронов при каналировании, когда они движутся связано с отдельными атомными цепочками в кристалле по спиральным траекториям. В поле атомного ряда $U(r) = -\sqrt{2}Ze^2a_{TF}/rd$, [7], где a_{TF} — радиус экранирования, d — межатомное расстояние, частота осцилляций траектории определенной частицы будет $\Omega_0 = (2/\epsilon_{\perp})^{3/2}d \times (\sqrt{2}Ze^2a_{TF}m^{1/2})^{-1}$, где m — релятивистская масса электрона, $\epsilon_{\perp} =$

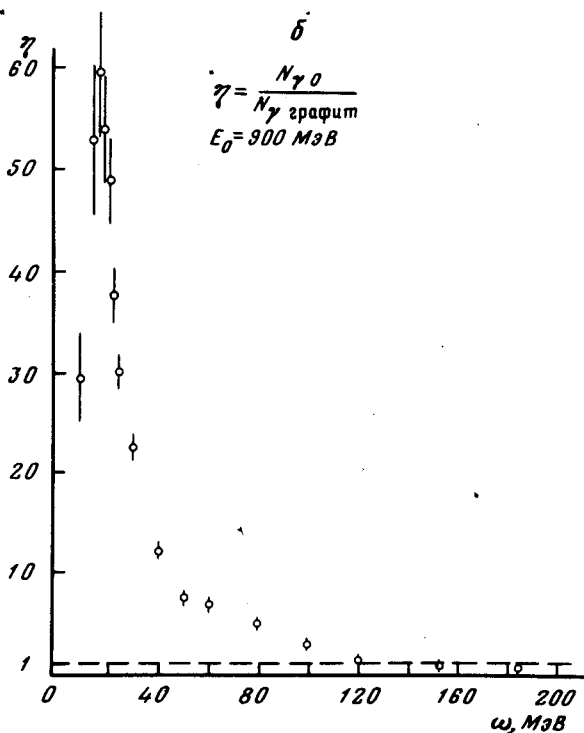
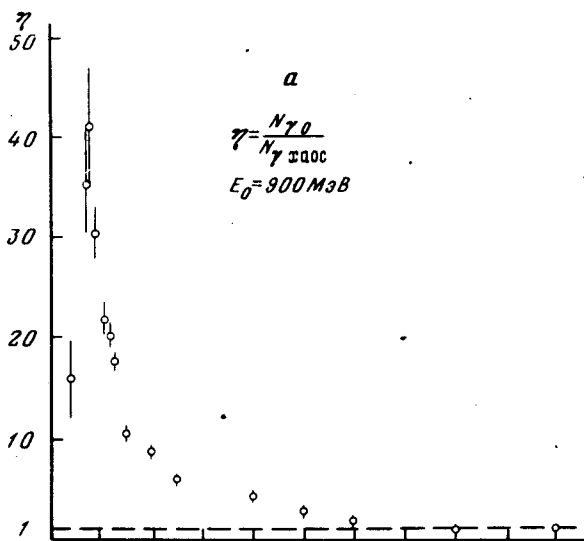


Рис. 2. Спектральные характеристики γ -излучения при каналировании

$= U(r_i) + E\psi^2$ — полная поперечная энергия с r_i -координатой точки входа частицы в поле атомной цепочки. Это обеспечит частоту первой гармоники излучения в направлении θ угла наблюдения

$$\omega_0 = \Omega_0 (1 - v/c \cos \theta)^{-1} \approx 1,85 \cdot 10^{13} |\epsilon_{\perp}|^{3/2} (1 - v/c \cos \theta)^{-1} [\text{сек}^{-1}],$$

где ϵ может принимать значения для устойчивых траекторий (10 – 50) эВ, что соответствует области энергий γ -квантов $\omega = 15 \div 165$ МэВ при $\theta =$

$= 0$, согласующейся с экспериментальными данными. Для расчета спектральных свойств излучения, например, в рамках подхода [13], следует учитывать углы и координаты точек: влета электронов пучка в поле атомной цепочки. В общем случае процесс эмиссии γ -квантов из монокристаллов будут определять не только электроны связанного с атомным рядом потока, но и частицы надбарьерного движения с $\epsilon_{\perp} > U(r_0)$ (r_0 — половина расстояния между атомными рядами) из области "переходного каналирования", ответственной за когерентные эффекты [9].

В заключение выражаем признательность В.Л.Гинзбургу, А.Ф.Тулинову, В.С.Летохову, М.А.Кумахову, Н.П.Калашникову, В.Н.Байеру за внимание к работе и полезные обсуждения.

Институт ядерной физики
Томского
государственного университета
им. С.М.Кирова

Поступила в редакцию
20 февраля 1979 г.

Литература

- [1] В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. ДАН СССР, 231, 1335, 1976; Phys. Stat. Sol. (b), 82, 403, 1977.
- [2] М.А.Кумахов. ДАН СССР, 230, 1077, 1976; Phys. Lett., 57A, 17, 1976; ЖЭТФ, 72, 1489, 1977.
- [3] М.И.Подгоревский. ОИЯИ; P2-10986, Дубна, 1977; ОИЯИ, P2-11140, Дубна, 1977.
- [4] А.И.Ахизер, В.Ф.Болдышев, Н.Ф.Шульга. ДАН СССР, 236, 830, 1977.
- [5] В.А.Базылев, Н.К. Жеваго, ЖЭТФ, 73, 1697, 1977.
- [6] Н.П.Калашников, Е.А.Коптелов, М.И.Рязанов. ФТТ, 14, 1211, 1972.
- [7] A.A.Vorobiev, V.V.Kaplin, S.A.Vorobiev. Nucl. Instrum. Meth., 127, 265, 1975.
- [8] В.Л.Мороховский, Г.Д.Коваленко, И.А.Гришаев, А.Н.Фисун, В.И.Касилов, Б.И.Шраменко, А.Н.Криницын. Письма в ЖЭТФ, 16, 162, 1972.
- [9] С.А.Воробьев, Б.Н.Калинин, В.В.Каплин, А.П.Потылицын. Письма в ЖТФ, 4, 1340, 1978; Известия высш. уч. зав., сер. Физика, №11, 117, 1978.
- [10] А.О.Аганянц, Н.З.Акопов, Ю.А.Вартанов, Г.А.Вартапетян. Препринт ЕФИ-312 (37)-78, Ереван, 1978.
- [11] А.В.Пешков. Диссертация, ТПИ, Томск, 1974 г.
- [12] U.Timm. Fortsch. Phys., 17, 765, 1969.
- [13] В.Н.Байер, В.М.Катков, В.М.Страховенко. ЖЭТФ, 63, 2121, 1972.