

## МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЛИВНЯХ ОТ ЭЛЕКТРОНОВ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ И ВОЛЬФРАМА

В. А. Басков<sup>1</sup>, В. В. Ким<sup>1</sup>, Б. И. Лучков<sup>2</sup>,  
В. Ю. Тугаенко<sup>2</sup>, В. А. Хабло<sup>1</sup>

*Показано увеличение более чем в 2 раза средней множественности заряженных частиц в электромагнитных ливнях, инициированных электронами с энергией 26 ГэВ в ориентированных вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллах вольфрама толщинами 2.7, 5.8 и 8.4 мм по сравнению с разориентированным. Для кристалла кремния толщиной 20 мм и ориентированного вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  при энергии электронов 28 ГэВ увеличение средней множественности заряженных частиц составило  $\sim 1.6$  раза. Ширины ориентационных зависимостей средней множественности заряженных частиц в ливнях от электронов в кристаллах кремния и вольфрама пропорциональны толщинам кристаллов и зависят от энергии электронов как  $E^{-1/2}$ .*

**Ключевые слова:** электромагнитные ливни, ориентация кристалла, множественность заряженных частиц.

Электромагнитные ливни, развивающихся в ориентированных кристаллах от электронов и  $\gamma$ -квантов (*аномальные ливни*), отличаются от ливней в разориентированных кристаллах и в аморфном веществе (*стандартные ливни*). Отличие состоит в разном числе фотонов  $N_\gamma$  и заряженных частиц  $N_e$  с соответствующими величинами энергий на заданной глубине развития ливня. Теория каскадных ливней в кристаллах развита давно [1, 2], однако экспериментальное определение  $N_\gamma$  и  $N_e$  до сих пор является

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

<sup>2</sup> 115549, Москва, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ".

актуальной задачей. Определение множественности в ливнях, выходящих из ориентированных кристаллов, также важно, поскольку существует возможность практического использования аномальных ливней при создании новых типов детекторов для применений в астрономии, экспериментальной физике высоких энергий и на ускорителях при создании кристаллических мишеней для получения высокоинтенсивных пучков электронов и позитронов [1, 3, 4].

Ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц в электромагнитных ливнях, вызванных электронами с энергиями 40, 149 и 287 ГэВ, а также позитронами с энергией 205 ГэВ, были впервые получены для кристаллов кремния (Si), вольфрама (W) и германия (Ge) [5–7].

Данная работа представляет экспериментальные результаты измерения средней множественности заряженных частиц  $N_e$ , выходящих из кристаллов вольфрама (радиационная длина вольфрама  $X_0 = 3.5$  мм) и кремния (радиационная длина кремния  $X_0 = 9.4$  см), вызванных электронами с энергией 26 и 28 ГэВ. Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале ускорителя ИФВЭ [8, 9]. Использовались кристаллы вольфрама толщинами 2.7, 5.8 и 8.4 мм и кристалл кремния 20 мм при комнатной температуре  $T_W = T_{Si} = 293$  К. Ориентация кристаллов вольфрама осуществлялась вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ , кристалла кремния вдоль оси  $\langle 110 \rangle$ . Мозаичность кристаллов вольфрама в данной работе составляла  $\approx 1$  мрад [8], в работах [5–7]  $\approx 124$  мкрад.

Метод определения множественности заряженных частиц в ливне от электронов заключался в том, что за кристаллом помещался пластиковый сцинтилляционный счетчик размером  $200 \times 100$  мм<sup>2</sup> и толщиной 20 мм, сигнал с которого подавался на амплитудный анализ. По величине сигнала делалось заключение о величине средней ионизации и о среднем числе заряженных частиц в ливне, выходящих из кристалла. Число фотонов электромагнитного ливня, давших конверсию  $e^+e^-$ -пар на толщине счетчика, составляло  $\sim 4\%$  [10].

Калибровка сцинтилляционного счетчика осуществлялась на пучке электронов без кристаллических мишеней и с мишенями, а также при разных напряжениях на делителе ФЭУ-85. Целью калибровки являлось определение положения ионизационных пиков от первичного электрона и вторичных заряженных частиц. Разные напряжения были необходимы для того, чтобы спектр ионизационных потерь для каждой толщины кристалла находился в заданном диапазоне чувствительности электронного блока амплитудного анализа (БАП).

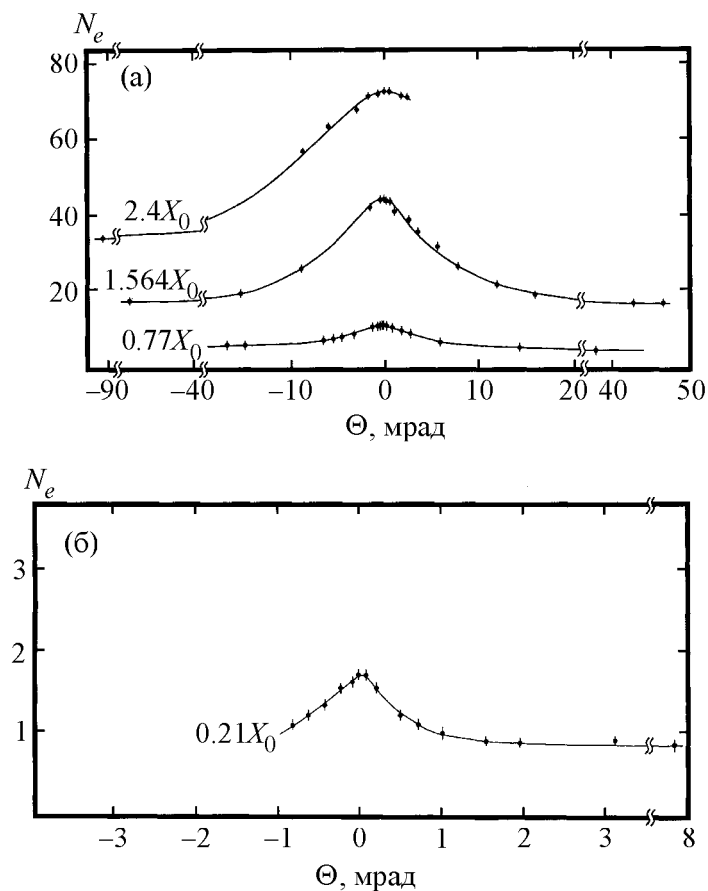


Рис. 1: Ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц  $N_e$  в ливне от электронов 26 ГэВ в кристаллах вольфрама (а) ( $\langle 111 \rangle$ ,  $T_W = 293$  K) и от электронов 28 ГэВ в кристалле кремния (б) ( $\langle 110 \rangle$ ,  $T_{Si} = 293$  K) (толщины кристаллов на рисунках представлены слева от соответствующих кривых).

На рис. 1 показаны ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц в ливне ( $N_e$ ) для трех толщин кристаллического вольфрама (рис. 1(а)) и одной толщины кристалла кремния (рис. 1(б)). Из рис. 1(а) видно, что по мере увеличения толщины кристалла ( $t_W$ ) средняя множественность заряженных частиц в ливне растет.

Изменение ширины  $\Delta\Theta$  ориентационной зависимости  $N_e$  в ливне, определяемой как ширина ориентационной зависимости на половине высоты, от толщины кристалла ( $t_{\text{cryst}}$ ) представлено на рис. 2. Видно, что ширина ориентационной зависимости увеличивается пропорционально толщине кристалла. Ширина ориентационной зависимости средней множественности заряженных частиц для кристалла кремния составила

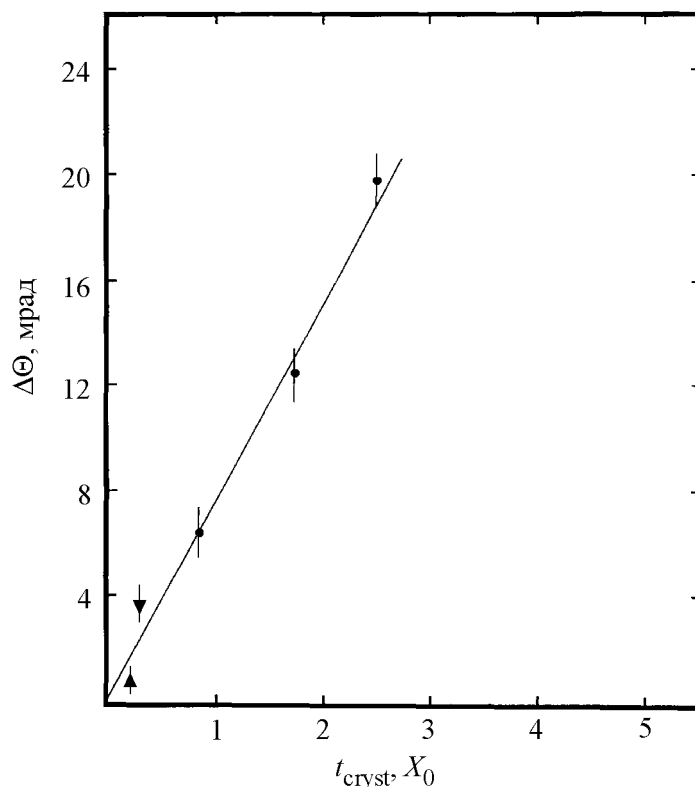


Рис. 2: Зависимость ширины ( $\Delta\Theta$ ), ориентационной зависимости средней множественности заряженных частиц, выходящих из кристалла, в зависимости от толщины кристалла ( $t_{\text{cryst}}$ ) ( $\bullet, \blacktriangledown$  – кристаллы вольфрама ( $\langle 111 \rangle$ );  $\blacktriangle$  – кристалл кремния ( $\langle 110 \rangle$ );  $\bullet$  –  $E = 26$  ГэВ,  $\blacktriangledown, \blacktriangle$  –  $E = 28$  ГэВ;  $\bullet, \blacktriangle$  –  $T_W = 293$  К;  $\blacktriangledown$  –  $T_W = 77$  К).

$\Delta\Theta = 1.0 \pm 0.1$  мрад, что в 1.5 раза меньше ширины ориентационной зависимости для кристалла вольфрама такой же радиационной толщины [6].

Можно отметить, что ширина ориентационной зависимости при энергии электронов 28 ГэВ только в  $\approx 2$  раза шире аналогичной зависимости при энергии позитронов 205 ГэВ (результаты работы [5], в которой приведены ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц в ливнях от позитронов с энергией 205 ГэВ в кристаллах кремния разных толщин, ориентированных вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  (потенциал оси  $\langle 110 \rangle V_0 = 70$  эВ, потенциал оси  $\langle 111 \rangle V_0 = 54$  эВ)).

Из рис. 2 также видно, что для кристалла вольфрама 1.7 мм ( $t_W = 0.48X_0$ ) ширина ориентационной зависимости составляет  $\approx 3.6$  мрад при энергии электронов 26 ГэВ. Эта величина превышает результат, полученный в [6] на  $\sim 1$  мрад. В [6] представлены ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц, выходящих

из кристалла вольфрама толщиной 1.7 мм при разных энергиях электронов. Превышение можно объяснить большей мозаичностью исследуемых кристаллов вольфрама по сравнению с мозаичностью кристаллов работы [6].

При увеличении энергии электронов ширина ориентационной зависимости средней множественности заряженных частиц для кристалла вольфрама 1.7 мм убывает с  $\approx 3.6$  мрад при 26 ГэВ до  $\approx 1.3$  мрад при  $\sim 200$  ГэВ и далее при больших энергиях меняется слабо [6]. Эти результаты показывают, что величины ширин ориентационных зависимостей  $\Delta\Theta$  изменяются с энергией электронов (и  $\gamma$ -квантов [10]) как  $\Delta\Theta = k \cdot E^{-1/2}$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $E$  – энергия электронов. Для кристалла вольфрама 1.7 мм этот коэффициент составил  $k = 1.84$  мрад·ГэВ $^{1/2}$ .

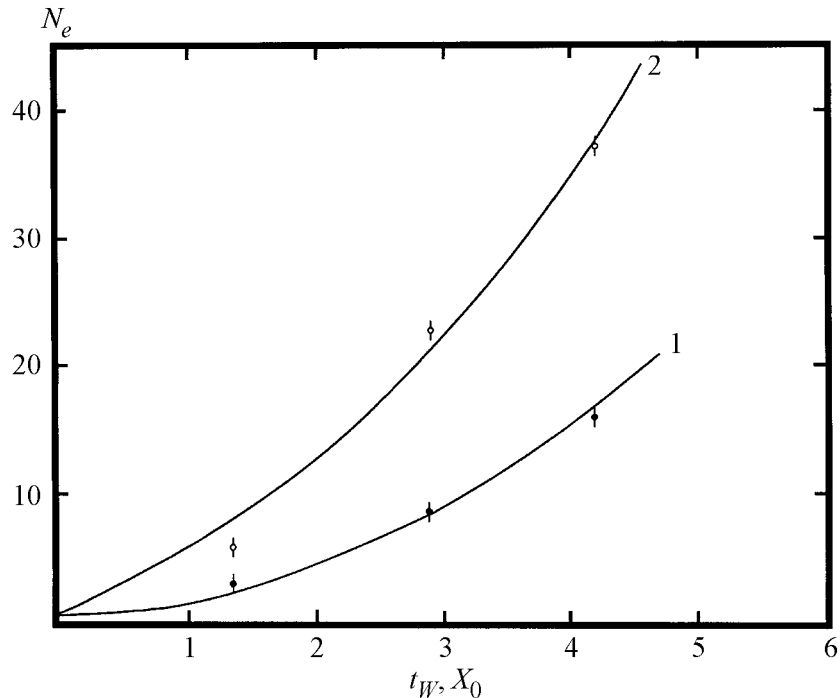


Рис. 3: Зависимость средней множественности заряженных частиц в ливнях от электронов 26 ГэВ в кристаллах вольфрама от толщины кристалла (1 – кристалл разориентирован ( $\Theta \geq 40$  мрад); 2 – кристалл ориентирован ( $\Theta = 0$  мрад);  $T_W = 293$  К).

Надо также отметить, что для кристалла вольфрама 1.0 мм при энергии электронов 26 ГэВ (рис. 2) ширина ориентационной зависимости средней множественности заряженных частиц в  $\approx 1.5$  раза уже ширины ориентационной зависимости средней множественности заряженных частиц, выходящих из того же кристалла при

такой же энергии  $\gamma$ -квантов [10].

На рис. 3 с учетом данных рис. 1(а) представлены зависимости средней множественности заряженных частиц для разориентированных ( $\Theta \geq 45$  мрад, зависимость 1) и ориентированных кристаллов ( $\Theta = 0$  мрад, зависимость 2) от толщины кристаллов при энергии электронов 26 ГэВ. Отношения средней множественности заряженных частиц, выходящих из ориентированного кристалла, к средней множественности заряженных частиц, выходящих из разориентированного кристалла, составили  $\sim 3.5$ ,  $\sim 2.7$  и  $\sim 2.3$  для толщин кристаллов 2.7, 5.8 и 8.4, соответственно.

Таким образом, экспериментальные результаты показывают увеличение выхода среднего числа заряженных частиц из ориентированных кристаллов по сравнению с разориентированными при развитии в них ливней от электронов. Ширины ориентационных зависимостей средней множественности заряженных частиц в ливнях от электронов в кристаллах кремния и вольфрама пропорциональны толщинам кристаллов. Для кристаллов вольфрама, а с учетом результатов развития ливней от  $\gamma$ -квантов в кристаллах кремния, можно предположить, что и для кристаллов кремния, ширины ориентационных зависимостей средней множественности заряженных частиц в ливнях от электронов зависят от энергии электронов как  $E^{-1/2}$ .

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах* (Издательство “Наука” СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989).
- [2] А. И. Ахизер, Н. Ф. Шульга, *ЖЭТФ* **85**, 94 (1983).
- [3] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., *ПТЭ* **6**, 10 (1996).
- [4] В. А. Басков, *Препринт ФИАН N 36* (Москва, ФИАН, 2011).
- [5] K. Elsener, S. P. Moller, J. B. V. Petersen, and E. Uggerhoj, *Phys. Lett.* **B 212**, 537 (1988).
- [6] R. Medenwaldt, S. P. Moller, S. Tang-Petersen, et al., *Phys. Lett.* **B 227**, 483 (1989).
- [7] R. Medenwaldt, S. P. Moller, S. Tang-Petersen, et al., *Phys. Lett.* **B 242**, 517 (1990).
- [8] В. А. Басков, В. В. Ким, И. В. Коноров и др., *ПТЭ* **5**, 58 (1990).
- [9] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., *Препринт ФИАН N 14* (Москва, ФИАН, 2012).

- [10] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(6), 8 (2011).

Поступила в редакцию 4 июня 2012 г.