

# Регистрация электронов высокой энергии спектрометром направленного действия

В. А. Басков<sup>1)</sup>

Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 мая 2014 г.

Представлен метод регистрации электронов с энергией 26 и 28 ГэВ с помощью спектрометра направленного действия на основе ориентированных кристаллов вольфрама, вольфрамата и граната. Несмотря на *аномальный* характер развития электромагнитного ливня на начальной стадии в ориентированном вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристалле, относительное энерговыделение ливня в спектрометре за кристаллом на конечной стадии описывается стандартной зависимостью развития электромагнитного ливня.

DOI: 10.7868/S0370274X14120017

Одним из методов регистрации  $e^-$ ,  $e^+$  и  $\gamma$ -квантов высоких энергий является регистрация спектрометром направленного действия (СНД) [1, 2]. Это – спектрометр полного поглощения, регистрирующий частицы в заданном направлении, с конвертером из ориентированного непрозрачного или прозрачного кристалла либо на основе непосредственно прозрачного кристалла. Кристаллографическая ось конвертора или прозрачного кристалла-спектрометра направлена на источник частиц (мишень или область взаимодействия в случае встречных пучков). В зависимости от целей установки и назначения СНД в качестве конвертера могут использоваться непрозрачные кристаллы типа кремния (Si), германия (Ge), вольфрама (W) и прозрачные кристаллы типа вольфрамата ( $PbWO_4$ ), граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ) и т.д. [3].

Суть метода регистрации заключается в том, что при энергии  $e^-$ ,  $e^+$  и  $\gamma$ -квантов в десятки и сотни ГэВ и углах их входа в кристалл  $\Theta \ll V/mc^2$  (где  $\Theta$  – угол между импульсом частицы и осью или плоскостью кристалла;  $V$  – масштаб потенциала оси или плоскости;  $m$  – масса электрона;  $c$  – скорость света) возникают *аномальные* электромагнитные ливни. Характер последних существенно отличается от характера развития *стандартных* электромагнитных ливней в аморфном веществе [1–4]. *Аномальные* ливни в кристаллах в отличие от *стандартных* ливней развиваются на меньших расстояниях. Это приводит к изменению характера развития ливня (изменяются множественность заряженных и не заряженных частиц ливня, энергии частиц по глубине развития ливня, возникают ориентационная и температурная зависимости развития ливня и т.д.) и, следовательно,

к изменению отклика спектрометра за кристаллом [3]. В результате уменьшается продольная длина спектрометра и улучшается его энергетическое разрешение [3, 5].

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований начальной и конечной стадий работы СНД на основе непрозрачных кристаллов вольфрама и прозрачных кристаллов вольфрамата и граната, которые использовались как непрозрачные конверторы (сигнал с кристаллов не снимался).

Работа была выполнена на установке Каскад на электронном канале ИФВЭ. В исследованиях использовались кристаллы вольфрама с толщинами 0.07, 0.3, 1.0, 2.7, 5.8 и 8.4 мм (радиационная длина  $X_0 = 3.5$  мм), кристаллы вольфрамата с толщинами 20 и 30 мм ( $X_0 = 8.9$  мм), а также кристаллы граната с толщинами 6, 23 и 50 мм ( $X_0 = 14.5$  мм). Ориентация кристаллов осуществлялась вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ . Измерения были выполнены при температурах кристаллов  $T_1 = 293$  К и  $T_2 = 77$  К. Кристаллы считались разориентированными при  $\Theta > (20-30)$  мрад. В эксперименте использовался пучок электронов с энергиями  $E = 26$  и 28 ГэВ с расходимостью  $|\nu| \leq 0.1$  мрад по основанию [6].

Ливень, выходящий из кристалла, продолжал развиваться в составном черенковском ливневом спектрометре (СЧЛС), состоящем из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ-1 размером  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> и толщиной  $1X_0$ . Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС был помещен черенковский спектрометр полного поглощения (ЧС) толщиной  $15X_0$ . Он имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 180 мм [6, 7].

<sup>1)</sup>e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

На рис. 1 представлены экспериментально полученные каскадные кривые начальной стадии разви-

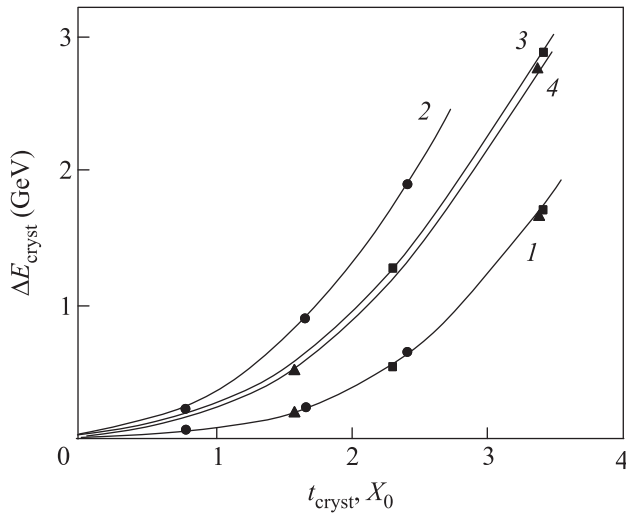


Рис. 1. Начало каскадных кривых развития электромагнитных ливней в разориентированных (1) и ориентированных (2–4) кристаллах вольфрама (кружки), вольфрамата (квадраты) и граната (треугольники) ( $\Delta E_{\text{cryst}}$  – энергия, выделившаяся в кристалле;  $t_{\text{cryst}}$  – толщина разориентированного кристалла;  $E = 26$  ГэВ; температура кристаллов  $T_1 = 293$  К)

тия ливня в разориентированных (1) и ориентированных (2) кристаллах вольфрама, вольфрамата (3) и граната (4) [8]. Видно, что в ориентированных кристаллах ливни развиваются более интенсивно и каскадные кривые лежат выше по величинам энерговыделения, чем в случае разориентированных кристаллов (в разориентированных кристаллах начальные стадии развития ливней из-за небольших различий в энерговыделениях практически совпали). Рисунок также демонстрирует, что в ориентированном кристалле ливень интенсивно развивается с увеличением потенциала оси:  $\Delta E_W > \Delta E_{\text{PbWO}} > \Delta E_G$ , так как  $V_W > V_{\text{PbWO}} > V_G$  (здесь  $\Delta E_{W(\text{PbWO}, G)}$  и  $V_{W(\text{PbWO}, G)}$  – энерговыделение и масштаб потенциала в кристаллах W, PbWO и G соответственно [1, 9]).

Радиационная длина аморфного вещества, в котором развивается обычный ливень, постоянна [10]. Поэтому помещение перед спектрометром разориентированного кристалла толщиной  $t_{\text{cryst}}$  сдвигает каскадную кривую в сторону начала развития ливня на величину  $t_{\text{cryst}}$ . Ориентация кристалла вдоль оси за счет более интенсивного развития ливня приводит к дополнительной сдвигке каскадной кривой на  $\Delta t$  [3]. Это может означать изменение эффективной толщины кристалла  $t_{\text{eff}} = t_{\text{cryst}} + \Delta t$  (где  $t_{\text{eff}}$  – толщина, на которой происходит наиболее эффективное вза-

имодействие частиц с кристаллом). Последнее эквивалентно изменению радиационной длины кристалла [3, 10].

На рис. 2 представлена зависимость эффективной толщины ориентированного кристалла вольфрама

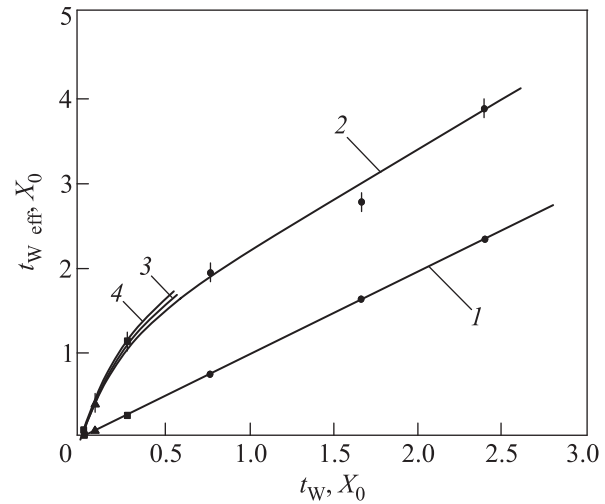


Рис. 2. Зависимости “эффективной” толщины кристалла вольфрама  $t_{W \text{ eff}}$  от толщины разориентированного кристалла  $t_W$  (1 – кристалл разориентирован, 2–4 – ориентирован;  $E = 26$  ГэВ (кружки) и 28 ГэВ (треугольники и квадраты);  $T_1 = 293$  К (кружки и треугольники),  $T_2 = 77$  К (квадраты))

$t_{W \text{ eff}}$  от его толщины в разориентированном (аморфном) состоянии  $t_W$  (линия 1). Из рисунка видно, что во всем диапазоне исследуемых толщин ( $t_W \leq 2.4X_0$ ) при ориентации кристалла его эффективная толщина увеличивается (линия 2).

Характер развития ливня в ЧС в зависимости от толщин аморфного вещества в виде счетчика СЧЛС, а также разориентированных и ориентированных кристаллов граната и вольфрама перед ним представлен на рис. 3 [11]. Видно, что при помещении перед ЧС счетчиков СЧЛС относительное энерговыделение в ЧС ( $\Delta E_{\text{Ch.S}}/E$ , где  $\Delta E_{\text{Ch.S}}$  – энерговыделение в ЧС,  $E$  – энергия электронов пучка) падает (часть энергии ливня остается в счетчиках). Помещение перед СЧЛС разориентированных кристаллов продолжает уменьшать относительное энерговыделение в ЧС. Ориентация же кристаллов за счет интенсивного развития ливня дополнительно уменьшает энерговыделение.

Вместе с тем рис. 3 показывает, что относительные энерговыделения в ЧС с учетом увеличения эффективных толщин ориентированных кристаллов хорошо ложатся на профиль продольного развития ливня в детекторе [7, 8, 10]. Последнее означает, что

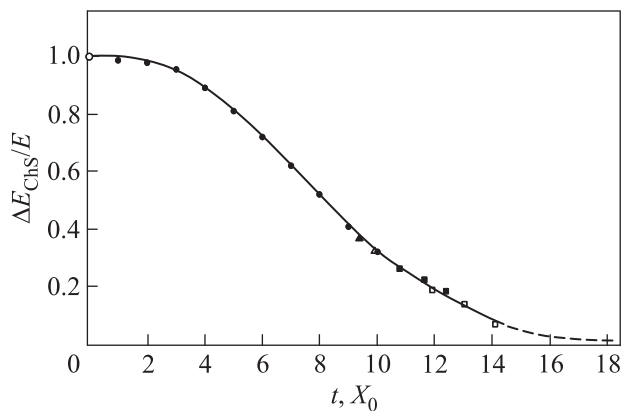


Рис. 3. Зависимость отношения энергии  $\Delta E_{\text{chs}}$ , выделившейся в ЧС, к энергии электронов в пучке  $E$  от эффективной толщины  $t$  вещества перед ним: открытые кружки – вещество перед ЧС отсутствует; закрытые кружки – аморфное вещество; закрытые (открытые) треугольники – разориентированный (ориентированный) кристалл граната; закрытые (открытые квадраты) – разориентированные (ориентированные) кристаллы вольфрама ( $E = 26$  ГэВ,  $T_1 = 293$  К)

характер развития ливня в разориентированном и ориентированном кристаллах одинаков. Это электромагнитный ливень, развивающийся в веществе независимо от его природы. С точки зрения развития ливня в ориентированном кристалле по отношению к разориентированному изменяется только соотношение величин заряженной и незаряженной компонент ливня с соответствующими энергетическими характеристиками на глубине развития [1, 9, 12]. Действительно, если построить зависимость относительного энерговыделения ливня  $\Delta E/\Delta E_{\text{max}}$  в СЧЛС в присутствии перед ним разориентированного и ориентированного кристаллического конвертора от глубины его проникновения  $t/t_{\text{max}}$  (здесь  $\Delta E$  и  $\Delta E_{\text{max}}$  – энерговыделения в спектрометре на глубине проникновения  $t$  и в максимуме развития ливня  $t_{\text{max}}$  соответственно), или, иначе, *универсальную* каскадную кривую, то окажется, что независимо от степени ориентации кристалла и его температуры все значения энерговыделения ложатся на одну кривую (рис. 4) [3, 8, 10, 13].

Аналогом разницы развития ливня в разных веществах, но при этом имеющего одинаковую природу, может служить развитие ливня в легком и тяжелом веществах, например в алюминии и свинце [10].

Рис. 3 показывает, что заданное энерговыделение ливня в спектрометре можно “получить” несколькими способами, а именно располагая перед детекто-

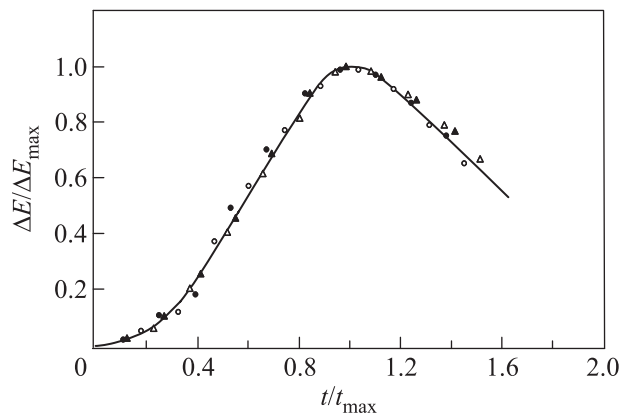


Рис. 4. Зависимость относительного энерговыделения ливня  $\Delta E/\Delta E_{\text{max}}$  в СЧЛС от глубины его проникновения  $t/t_{\text{max}}$  (*универсальная* каскадная кривая) в присутствии перед ним разориентированного (закрытые значки) и ориентированного вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  (открытые значки) одномиллиметрового кристаллического конвертора при температурах  $T_1 = 293$  К (кружки) и  $T_2 = 77$  К (треугольники). Энергия электронов  $E = 28$  ГэВ

ром: 1) конвертор из аморфного вещества соответствующей толщины  $t$ ; 2) кристаллический конвертор с толщиной  $t_{\text{cryst}}$ , такой, что при ориентации его эффективная толщина составила бы  $t = t_{\text{eff}} = t_{\text{cryst}} + \Delta t$  (где  $\Delta t$  – добавка к толщине кристалла за счет ориентации); 3) кристаллический конвертор такой толщины  $t_{\text{cryst}}$ , что при ориентации и последующем охлаждении его эффективная толщина составила бы  $t = t_{\text{eff}} = t_{\text{cryst}} + \Delta t + \Delta t_T$  (где  $\Delta t$  и  $\Delta t_T$  – добавки к толщине кристалла за счет ориентации и уменьшения температуры соответственно). Например, чтобы “получить” относительное энерговыделение в ЧС  $\Delta E_{\text{ch.s.}}/E \sim 0.9$  при  $E = 26$  ГэВ, можно поставить перед ним аморфный конвертор толщиной  $\sim 4X_0$  или разориентированный кристалл вольфрама толщиной  $\sim 2.5X_0$  при комнатной температуре и сориентировать его.

Из результатов работы следует, что *аномальные* электромагнитные ливни, возникающие в ориентированном кристаллическом конверторе перед электромагнитным спектрометром, даже при небольших толщинах конвертора изменяют отклик спектрометра относительно отклика спектрометра, регистрирующего *стандартные* ливни. Относительное энерговыделение ливня в спектрометре при его развитии в продольном направлении независимо от разориентации или ориентации кристалла имеет *стандартный* характер. Спектрометр направленного действия, формирующий и регистрирующий *аномальный* ливень, можно использовать в физике высоких

энергий в качестве компактного электромагнитного спектрометра.

Автор выражает благодарность Е.И. Тамму и Е.И. Малиновскому за поддержку исследований; В.И. Сергиенко за научное руководство, В.В. Ким, И.В. Конорову, В.В. Полянскому, В.А. Хабло, сотрудникам НИЯУ МИФИ Б.И. Лучкову и В.Ю. Тугаенко, сотруднику ИФВЭ В.А. Маишееву и сотрудникам Харьковского физико-технического института (Украина) под рук. Л.Я. Колесникова за помощь в работе.

1. В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах*, Наука, Н. (1989).
2. В. А. Басков, В. Б. Ганенко, В. А. Гуцин, Ю. В. Желобовский, В. В. Ким, Л. Ю. Колесников, И. В. Коноров, Б. И. Лучков, В. А. Маишеев, А. Л. Рубашкин, В. И. Сергиенко, В. Ю. Тугаенко, В. А. Хабло, ПТЭ **5**, 52 (1992).
3. В. А. Басков, Краткие сообщения по физике ФИАН **10**, 8 (2012).
4. А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шульга, *Электродинамика высоких энергий в веществе*, Наука, М. (1993).
5. В. А. Басков, Б. Б. Говорков, В. В. Ким, Б. И. Лучков, В. И. Сергиенко, В. Ю. Тугаенко, В. Хабло, Краткие сообщения по физике ФИАН **9–10**, 41 (1992).
6. В. А. Басков, В. В. Ким, В. И. Сергиенко, В. А. Хабло, ПТЭ **5**, 58 (1990).
7. В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким, Е. И. Малиновский, А. П. Усик, В. А. Хабло, ПТЭ **5**, 66 (2011).
8. V. A. Baskov, A. P. Bugorsky, V. A. Kachanov, V. A. Khablo, V. V. Kim, B. I. Luchkov, A. P. Meschanin, A. I. Mesnik, V. V. Poliansky, V. I. Sergienko, V. Yu. Tugaenko, and A. N. Vasil'ev, Phys. Lett. B **456**, 86 (1999).
9. U. I. Uggerhoj, Rev. Mod. Phys. **77**, 1131 (2005).
10. А. Н. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, *Прохождение частиц высоких энергий через вещество*, Энергоатомиздат, М. (1985).
11. В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков, В. Ю. Тугаенко, В. А. Хабло, *Препринт ФИАН*, М. (2006), # 31.
12. В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков, В. Ю. Тугаенко, В. А. Хабло, Краткие сообщения по физике ФИАН **4**, 35 (2013).
13. В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков, В. Ю. Тугаенко, В. А. Хабло, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **5**, 3 (2013).