Письма в ЖЭТФ, том 99, вып. 12, с. 785 – 788

Регистрация электронов высокой энергии спектрометром направленного действия

В. А. Басков[1)]

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 γ-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 γ-квантов в десятки и сотни ГэВ и углах их входа в кристалл $\Theta \ll V/mc^2$ (где Θ – 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 $|\upsilon| \leq 0.1$ мрад по основанию [6].

Ливень, выходивший из кристалла, продолжал развиваться в составном черенковском ливневом спектрометре (СЧЛС), состоящем из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ-1 размером 100×100 мм^2 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].

[1)]e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

На рис. 1 представлены экспериментально полученные каскадные кривые начальной стадии развития 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: $\Delta E_{\mathrm{W}} > \Delta E_{\mathrm{PbWO}} > \Delta E_{\mathrm{G}}$, так как $V_{\mathrm{W}} > V_{\mathrm{PbWO}} > V_{\mathrm{G}}$ (здесь $\Delta E_{\mathrm{W(PbWO,G)}}$ и $V_{\mathrm{W(PbWO,G)}}$ – энерговыделение и масштаб потенциала в кристаллах W, PbWO и G соответственно [1, 9].

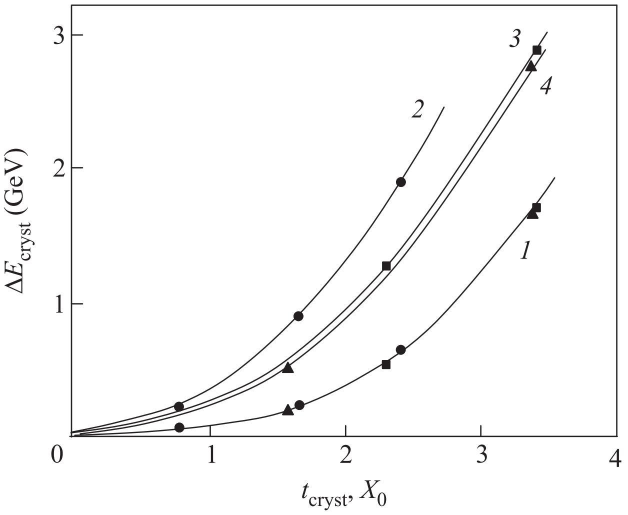

Рис. 1. Начало каскадных кривых развития электромагнитных ливней в разориентированных (*1*) и ориентированных (*2*–*4*) кристаллах вольфрама (кружки), вольфрамата (квадраты) и граната (треугольники) (ΔEcryst – энергия, выделившаяся в кристалле; t_{cryst} – толщина разориентированного кристалла; $E =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

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

На рис. 2 представлена зависимость эффективной толщины ориентированного кристалла вольфрама t_{Weff} от его толщины в разориентированном (аморфном) состоянии t_{W} (линия *1*). Из рисунка видно, что во всем диапазоне исследуемых толщин ($t_{\mathrm{W}} \leq 2.4X_0$) при ориентации кристалла его эффективная толщина увеличивается (линия *2*).

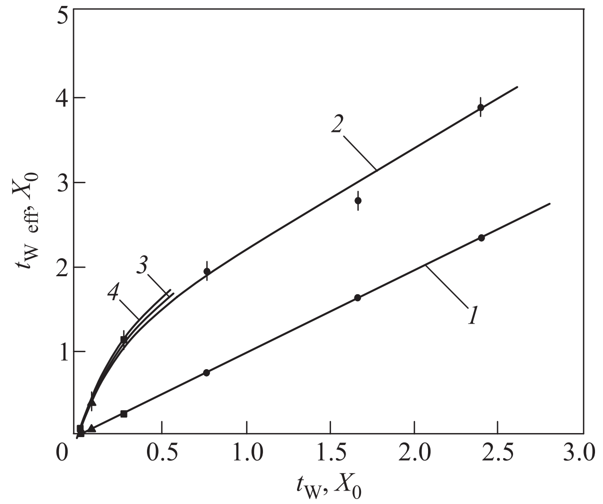

Рис. 2. Зависимости "эффективной" толщины кристалла вольфрама $t_{\mathrm{W\ eff}}$ от толщины разориентированного кристалла t_{W} (*1* – кристалл разориентирован, *2*–*4* – ориентирован; $E = 26$ ГэВ (кружки) и 28 ГэВ (треугольники и квадраты); $T_1 = 293$ К (кружки и треугольниуки), $T_2 = 77$ К (квадраты))

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 ($\Delta E_{\mathrm{Ch.S}}/E$, где $\Delta E_{\mathrm{Ch.S}}$ – 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

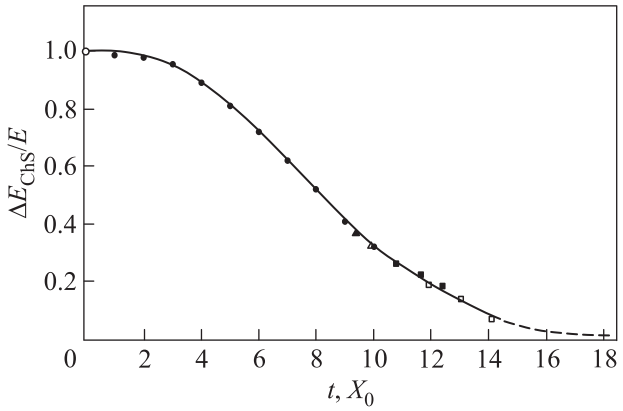

Рис. 3. Зависимость отношения энергии ΔE_{ChS}, выделившейся в ЧС, к энергии электронов в пучке E от эффективной толщины t вещества перед ним: открытые кружки – вещество перед ЧС отсутствует; закрытые кружки – аморфное вещество; закрытые (открытые) треугольники – разориентированный (ориентированный)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

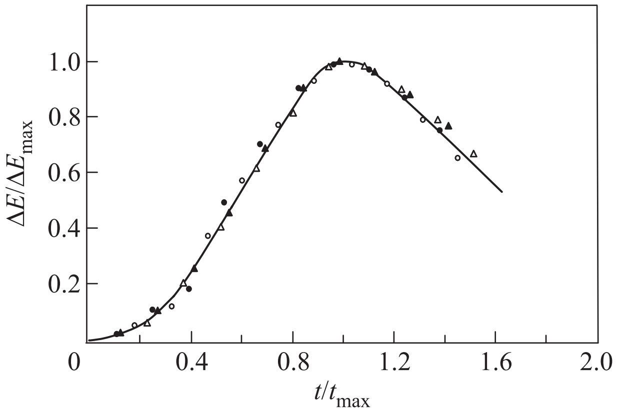

Рис. 4. Зависимость относительного энерговыделения ливня $\Delta E/\Delta E_{\max}$ в СЧЛС от глубины его проникновения $t/t_{\max}$ (*универсальная* каскадная кривая) в присутствии перед ним разориентированного (закрытые значки) и ориентированного вдоль оси $\langle 111\rangle$ (открытые значки)одномиллиметрового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

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 $\Delta E/\Delta E_{\max}$ в СЧЛС в присутствии перед ним разориентированного и ориентированного кристаллического конвертора от глубины его проникновения $t/t_{\max}$ (здесь ΔE и $\Delta E_{\max}$ – энерговыделения в спектрометре на глубине проникновения t и в максимуме развития ливня $t_{\max}$ 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 детектором: 1) конвертор из аморфного вещества соответствующей толщины t; 2) кристаллический конвертор с толщиной t_{cryst}, такой, что при ориентации его эффективная толщина составила бы $t = t_{\mathrm{eff}} = t_{\mathrm{cryst}} + \Delta t$ (где Δt – добавка к толщине кристалла за счет ориентации); 3) кристаллический конвертор такой толщины t_{cryst}, что при ориентации и последующем охлаждении его эффективная толщина составила бы $t = t_{\mathrm{eff}} = t_{\mathrm{cryst}} + \Delta t + \Delta t_{\mathrm{T}}$ (где Δt и Δt_T – добавки к толщине кристалла за счет ориентации и уменьшения температуры соответственно). Например, чтобы "получить" относительное энерговыделение в ЧС $\Delta E_{\mathrm{ch.S}}/E \sim 0.9$ 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 $\boxed{\text{Е.И. Тамму}}$ 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. Гущин, Ю. В. Жебровский, 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).