

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КОНВЕРТОРА НА ОТКЛИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА

В. А. Басков

Представлены результаты экспериментальных исследований отклика электромагнитного спектрометра с конвертором из ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама при энергии электронов 26, 28 и 31 ГэВ. Обнаружено, что отношение разности положений максимума каскадной кривой при разориентированном и ориентированном конверторе к разности энерговыведения в максимуме каскадной кривой является величиной постоянной при данной энергии электронов, типе и толщине конвертора и не зависит от температуры конвертора.

Ключевые слова: ориентированный кристалл, электромагнитный спектрометр, отклик спектрометра, каскадная кривая, энергетическая зависимость.

Область взаимодействия электронов, позитронов и γ -квантов при энергиях в десятки и сотни ГэВ с кристаллом, в которой когерентный характер взаимодействия частиц с полем оси (плоскости) кристалла приводит к значительному росту сечений всех электродинамических процессов, получила название область “*постоянного сильного поля*” (ПСП). Область ПСП формируется при углах входа частиц в кристалл $\Theta \ll \Theta_{\text{CSF}} = V/mc^2$ (Θ – угол между импульсом γ -кванта, электрона или позитрона и осью (плоскостью) кристалла; V – масштаб потенциала оси или плоскости; m – масса электрона; c – скорость света) [1].

Электромагнитные ливни, образованные электронами, позитронами и γ -квантами при взаимодействии с кристаллом в области ПСП (*аномальные ливни*) отличаются от ливней в аморфном веществе (*стандартные ливни*). Отличие ливней в ориентированных кристаллах (кристалл считается ориентированным при $\Theta \leq \Theta_{\text{CSF}}$; кристалл считается разориентированным при $\Theta \gg \Theta_{\text{CSF}}$) проявляется во всех характеристиках ливней: множестве заряженных и незаряженных частиц ливня, в зависимостях энергии

частиц от глубины развития ливня; в наличии ориентационной зависимости; в уменьшении радиационной длины кристалла; в наличии температурной зависимости развития ливня и т.д. *Аномальный* ливень, выходящий из кристалла и продолжающийся развиваться в спектрометре, вызывает отклик спектрометра, отличный от отклика на *стандартный* ливень [2–4].

В данной работе представлены результаты исследований влияния разориентированного и ориентированного вольфрамового конвертора на отклик электромагнитного спектрометра, регистрирующего ливни от электронов.

Работа выполнена на установке “Каскад” на электронном канале 2В ускорителя ИФВЭ в рамках программы изучения эффектов квантовой электродинамики в сильных полях ориентированных кристаллов, одной из целей которой было изучение *аномальных* электромагнитных ливней.

В работе использовались кристаллы вольфрама толщинами 1.0, 2.7, 5.8, 8.4 мм ($X_0 = 3.5$ мм, X_0 – радиационная длина). Ориентация кристаллов осуществлялась вдоль оси $\langle 111 \rangle$. Разориентированным считался кристалл, ось которого была повернута относительно оси пучка электронов на угол $\Theta = 20 - 30$ мрад. Мозаичность кристаллов составляла $\Delta\Theta_W \approx 1$ мрад. Исследования проводились как с кристаллами, находящимися при комнатной температуре $T_1 = 293$ К, так и с кристаллами, охлажденными до температуры жидкого азота $T_2 = 77$ К. В эксперименте использовался пучок электронов с энергиями $E = 26, 28$ и 31 ГэВ.

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 100×100 мм² и толщиной $1X_0$. Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС находился черенковский спектрометр (ЧС) толщиной $15X_0$ [3, 5, 6].

Поведение положения максимума каскадной кривой t_{\max} при развитии электромагнитного ливня от энергии электронов в СЧЛС в отсутствие вольфрамового конвертора перед ним описывается выражением [7]:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c, \quad (1)$$

где E – энергия электронов в МэВ, $E_c = 15$ МэВ – критическая энергия черенковского стекла ТФ-1; $c = 0.5$.

Если поместить разориентированный вольфрамовый конвертор перед СЧЛС, то каскадная кривая сдвинется в сторону начала развития ливня в среднем на величину тол-

щины кристаллического конвертора t_w [8]:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c - t_w. \quad (2)$$

При ориентации кристалла вследствие взаимодействия электрона с сильным полем кристаллографической оси меняется характер развития ливня, что приводит к уменьшению радиационной длины кристалла (X_0') и увеличению его эффективной толщины $t_{w\text{eff}}$ (t_{eff} – эффективная толщина кристалла, на которой происходит наиболее эффективное взаимодействие частиц с кристаллом) [8]:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c - t_{w\text{eff}}, \quad (3)$$

где $t_{w\text{eff}} = t_w + \Delta t$, а $\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}$ является “добавкой” к толщине кристалла за счет ориентации ($t_{\max p}$ и $t_{\max o}$ – положение максимума каскадной кривой при разориентированном и ориентированном кристалле, соответственно).

Охлаждение ориентированного кристалла ведет к сокращению амплитуды тепловых колебаний атомов кристалла и увеличению потенциальной ямы кристаллографической оси, что в свою очередь ведет к возрастанию сечений электродинамических процессов, ещё большей сдвижке каскадной кривой к началу развития ливней или увеличению Δt [3, 8]:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c - t_{w\text{eff}} - \Delta t_{\text{temp}}, \quad (4)$$

где $\Delta t_{\text{temp}} = t(T_1)_{\max o} - t(T_2)_{\max o}$ является “добавкой” к толщине кристалла за счет изменения температуры с T_1 до T_2 уже ориентированного кристалла (индекс “о” – кристалл ориентирован).

Развитие ливня в аморфном веществе спектрометра без кристаллического конвертора и с конвертором можно представить в виде зависимости положения максимума развития электромагнитного ливня (t_{\max}) в спектрометре (СЧЛС) от энерговыделения в максимуме развития (ΔE_{\max}). Данная зависимость для разных энергий электронов, толщин разориентированных и ориентированных кристаллов представлена на рис. 1 [9].

Из рис. 1 видно, что зависимость положения максимума развития ливня t_{\max} и энерговыделение в максимуме развития ливня ΔE_{\max} для разориентированного и ориентированного кристалла окажутся разными. Действительно, при разориентированном конверторе для каждой фиксированной энергии электронов E зависимость t_{\max} от ΔE_{\max} , как и в случае зависимости t_{\max} от E , является прямой, параллельной оси t_{\max} (зависимость показана штрихпунктирной линией). Если кристалл ориентирован, то меняются

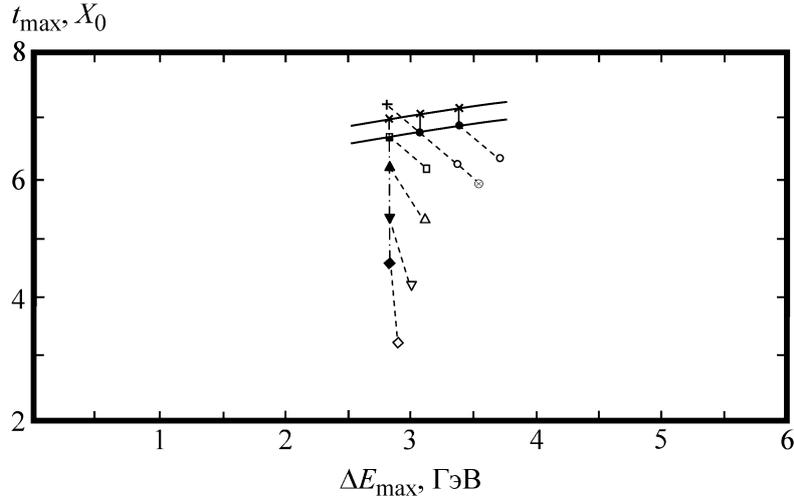


Рис. 1: Зависимость положения максимума развития электромагнитного ливня t_{\max} в СЧЛС с кристаллическим вольфрамовым конвертором от энерговыведения в максимуме развития ливня ΔE_{\max} ($\times, \bullet, \circ, \blacktriangle, \triangle, \blacktriangledown, \triangledown, \otimes, \blacklozenge, \diamond$ – эксперимент; $\blacksquare, \square, +$ – оценка [10, 11]; \times – спектрометр без кристалла ($t_w = 0$); $\bullet, \blacksquare, \blacktriangle, \blacktriangledown, \blacklozenge, +$ – кристалл разориентирован; $\triangledown, \circ, \square, \otimes, \triangle, \diamond$ – кристалл ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$; $\bullet, \circ, \blacksquare, \square, +$ – $t_w = 1.0$ мм; $\blacktriangle, \triangle$ – $t_w = 2.7$ мм; $\blacktriangledown, \triangledown$ – $t_w = 5.8$ мм; \blacklozenge, \diamond – $t_w = 8.4$ мм; $\bullet, \circ, \blacksquare, \square, \blacktriangle, \triangle, \blacktriangledown, \triangledown, \otimes, \blacklozenge, \diamond$ – $T = 293$ К; \otimes – $T = 77$ К; $+$ – $T_d \sim 980$ К).

поведение t_{\max} и ΔE_{\max} . В этом случае при данной энергии электронов, толщине и температуре кристалла отношение $\Delta t_{\max}/\Delta E_{\max} = \text{const}$ ($\Delta t_{\max} = t_{\max p} - t_{\max o}$; $\Delta E_{\max} = E_{\max o} - E_{\max p}$; $t_{\max p(o)}$ и $E_{\max o(p)}$ – положение максимума и энерговыведение в максимуме развития ливня при разориентированном (p) и ориентированном (o) кристалле, соответственно) (зависимость показана штриховой линией). Из рис. 1 также видно, что отношение $\Delta t_{\max}/\Delta E_{\max}$ не меняется при изменении температуры с $T_1 = 293$ К до $T_2 = 77$ К и при увеличении температуры $T_1 = 293$ К до T_d (T_d – температура, при которой происходит полная дезориентация кристалла, то есть кристалл невозможно сориентировать (оценка показывает, что $T_d \sim 980$ К [10])).

Таким образом, можно утверждать, что для каждой энергии электронов, типа и толщины разориентированного и ориентированного кристалла, диапазона температур от $T = T_d$ до $T \geq 77$ К существует присущее только этому набору параметров отношение $\Delta t_{\max}/\Delta E_{\max} = \text{const}$.

Автор выражает благодарность Е. И. Тамму и Е. И. Малиновскому за поддержку работы; 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 руководством Л. Я. Колесникова за помощь в работе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] U. I. Uggerhoj, *Reviews of Modern Physics* **77**, 1131 (2005).
- [2] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(10), 28 (2012).
- [3] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(5), 3 (2013).
- [4] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(4), 21 (2014).
- [5] В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким и др., *ПТЭ* **5**, 66 (2011).
- [6] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(8), 16 (2012).
- [7] А. В. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, *Прохождение частиц высоких энергий через вещество* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [8] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(3), 32 (2014).
- [9] В. А. Басков, *Препринт ФИАН № 9* (Москва, ФИАН, 2013).
- [10] В. А. Басков, в: *Сессия-конференция Отделения Ядерной физики РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”*, 12.11-16.11.2012 г., НИЯУ МИФИ; (http://www.icssnp.mephi.ru/content/file/section7/7_18_baskov.pdf).
- [11] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(8), 43 (2013).

Поступила в редакцию 26 января 2015 г.