

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ЛИВНЯ ОТ ЭЛЕКТРОНОВ В ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ ВОЛЬФРАМА

В. А. Басков

Развитие ливня от электронов с энергиями 26 и 28 ГэВ в ориентированном кристалле вольфрама приводит к сильному поглощению энергии ливня кристаллом и увеличению доли энергии частиц ливня, рассеивающихся между кристаллом и детектором. Отношения суммарных потерь энергий ливня в ориентированных кристаллах вольфрама к суммарным потерям в разориентированных кристаллах толщиной 1, 2.7, 5.8 и 8.4 мм составили 3.9, 2.6, 2.1 и 1.9 соответственно.

Ключевые слова: ориентированный кристалл, аномальные электромагнитные ливни, потери энергии, рассеяние вторичных частиц, мольеровский радиус.

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 $\Theta \ll \Theta_{\text{CSF}} = V/m \cdot c^2$ (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) [1–3].

Электромагнитные ливни, образованные электронами, позитронами и γ -квантами при взаимодействии с кристаллом в области ПСП (аномальные ливни) отличаются от ливней в аморфном веществе. Отличие ливней в ориентированных кристаллах (кристалл считается ориентированным, когда $\Theta \leq \Theta_{\text{CSF}}$; кристалл считается разориентированный, когда $\Theta \gg \Theta_{\text{CSF}}$) проявляется во всех характеристиках ливней: множестве заряженных и незаряженных частиц ливня, энергиях частиц по глубине развития ливня; наличии ориентационной зависимости; уменьшении радиационной длины кристалла и т. д. [2, 3].

Учреждение Российской академии наук Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в ориентированном кристалле происходит более сильная по сравнению со стандартным ливнем диссипация энергии первоначальной частицы на низкие энергии (~ 100 МэВ) e^+ , e^- и фотонов. Это приводит к сильному поглощению энергии ливня кристаллом и значительному многократному рассеянию вторичных частиц внутри кристалла и за его пределами на воздухе [1, 2]. При большом расстоянии между кристаллом и детектором, когда угол многократного рассеяния θ_{disp} превосходит полярный угол θ_{k-d} , под которым детектор “видит” кристалл ($\theta_{\text{disp}} > \theta_{k-d}$), часть частиц ливня не попадает в детектор. Таким образом, недобор энергии ливня детектором ($\Delta E = \Delta E_W + \Delta E_{\text{disp}}$) определяется энергией, поглощенной кристаллом (ΔE_W), и энергией (ΔE_{disp}), рассеянной в промежутке между кристаллом и детектором. Данный эффект имеет место как в случае разориентированного кристалла (аморфной мишени), так и при ориентации кристалла.

Интегральная кривая развития ливня в кристалле вольфрама и далее в составном черенковском спектрометре (СЧС) толщиной $25X_0$ (X_0 – радиационная длина) [4] показывает уменьшение зарегистрированной энергии частиц ливня E'_e , выходящего из кристалла, по сравнению с первоначальной энергией электрона E_e на величину $\Delta E = E_e - E'_e$. Наиболее сильное уменьшение наблюдается в случае ориентации кристалла [2, 5].

Работа выполнена на установке “Каскад” на электронном канале ускорителя У-70 ИФВЭ в Протвино. Энергия электронного пучка составляла $E_e = 26$ и 28 ГэВ. Исследовались ливни, выходящие из кристаллов вольфрама 1, 2.7, 5.8 и 8.4 мм. Ориентация кристаллов осуществлялась вдоль оси $\langle 111 \rangle$, мозаичность кристаллов составляла $\Delta\Theta_W \approx 1$ мрад. Кристалл считался разориентированным при $\Theta = 20 \div 30$ мрад. Температура кристаллов, кроме кристалла 1 мм ($T_W = 77$ К), составляла $T_W = 293$ К. Ориентация кристаллов осуществлялась с помощью гониометра, находящегося на расстоянии 65 см перед СЧС.

Зависимость отношения $\Delta E/E_e$ от толщины кристаллов представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что наличие вещества перед составным спектрометром приводит к “недобору” энергии детектором. Например, разориентированный кристалл вольфрама толщиной 8.4 мм, приводит к “недобору” энергии $\approx 5.3\%$ (кривая 1), ориентация кристалла увеличивает “недобор” до $\approx 11\%$ (кривая 2). Для исследуемых толщин кристаллов отношения величин “недобранной” энергии СЧС в ориентированных кристаллах к аналогичным величинам при разориентированных составили 3.9, 2.6, 2.1 и 1.9 раз соответственно (рис. 2).

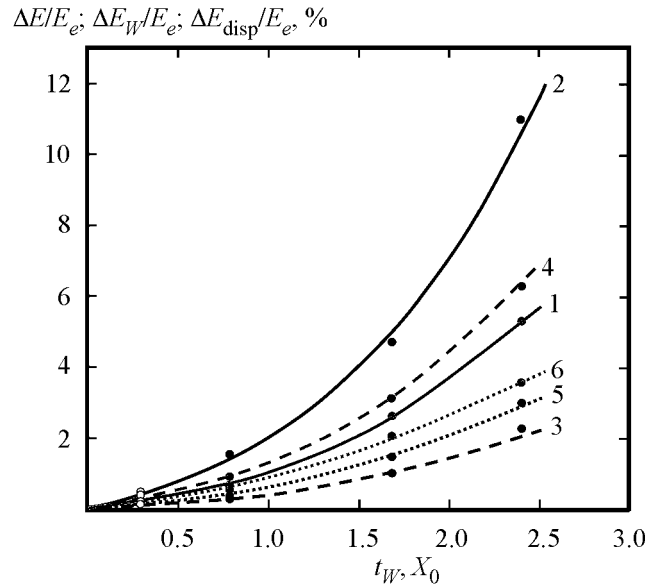


Рис. 1: Потери энергии частиц ливня, выходящего из кристалла вольфрама, в зависимости от толщины кристалла t_W , выраженной в единицах радиационной длины X_0 , относительно первоначальной энергии электрона (\bullet – $E_e = 26$ ГэВ, \circ – $E_e = 28$ ГэВ). ΔE – разность первоначальной энергии электрона и энергии ливня, зарегистрированного СЧС (кривые 1 и 2); ΔE_W – энергия ливня, поглощенная кристаллом (кривые 3 и 4); ΔE_{disp} – энергия ливня, вышедшая из кристалла и рассеянная в промежутке между кристаллом и СЧС (кривые 5 и 6) (1, 3, 5 – кристалл разориентированный; 2, 4, 6 – кристалл ориентированный).

Кривые 5 и 6 рисунка 1, определяющие рассеянную энергию ливня в случае разориентированного и ориентированного кристалла вольфрама ($\Delta E_{\text{disp}} = \Delta E - \Delta E_W$), получены вычитанием из общего “недобора” энергии (ΔE) (кривые 1 и 2) энергии ливня, поглощенной разориентированными и ориентированными кристаллами (ΔE_W) (кривые 3 и 4). Энергия ливня, поглощенная кристаллическим конвертером (ΔE_W), для указанных толщин кристаллов была определена из анализа каскадных кривых и интегральных кривых развития ливня в работах [4, 5]. Ход всех кривых рис. 1 показывает, что величина энергии, поглощенной кристаллом и рассеянной между кристаллом и СЧС, а также их суммарная величина, определяющая энергию, “недобранную” СЧС, увеличивается с толщиной кристалла и особенно возрастает при его ориентации.

Рис. 2 представляет зависимость отношения величин незарегистрированной или “недобранной” энергии СЧС (кривая 1), энергии, поглощенной кристаллом (кривая 2),

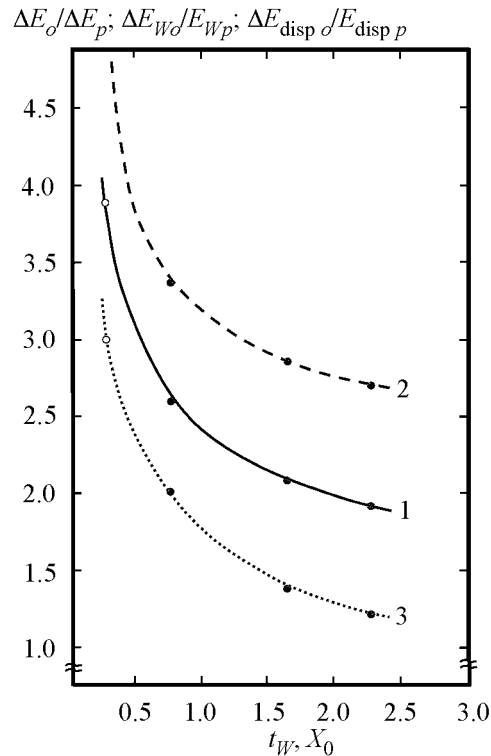


Рис. 2: Зависимость от толщины кристалла t_W отношения незарегистрированной СЧС энергии ливня (ΔE); энергии, поглощенной кристаллом (ΔE_W); энергии, рассеянной между кристаллом и СЧС (ΔE_{disp}) при ориентированном кристалле (индекс o) к аналогичным энергиям при разориентированном кристалле (p): 1 – $\Delta E_o/\Delta E_p$; 2 – $\Delta E_{W_o}/\Delta E_{W_p}$; 3 – $\Delta E_{\text{disp}_o}/\Delta E_{\text{disp}_p}$ (\bullet – $E_e = 26$ ГэВ, \circ – $E_e = 28$ ГэВ).

и энергии, рассеянной между кристаллом и СЧС (кривая 3), при ориентированном кристалле к аналогичным величинам при разориентированном кристалле. Ход всех кривых показывает, что при ориентации кристалла эффект “ориентированности” или наиболее интенсивное развитие аномального ливня относительно разориентированного состояния происходит в тонких кристаллах ($t_W \leq 3.5$ мм = $1X_0$). С увеличением толщины ориентированного кристалла ($t_W > 3.5$ мм) внутри кристалла увеличивается диссипация энергии ливня и многократное рассеяние, приближающие эффект развития ливня в ориентированном кристалле к развитию в разориентированном.

Эффект значительного рассеяния ливня при ориентации кристалла объясняется наличием большого числа заряженных частиц с энергиями < 100 МэВ, рожденных за счет механизма Бете–Гайтлера более мягкими гамма-квантами по сравнению с гамма-квантами обычного ливня, способными эффективней рассеиваться в веществе [1].

Эффект также указывает на то, что мольеровский радиус r_M , определяющий поперечное развитие ливня в ориентированном кристалле, отличается от аналогичного радиуса обычного ливня [5].

Значительные величины поглощения и рассеяния энергии ливня в ориентированном кристалле и вне его необходимо учитывать в практической деятельности при создании кристаллических мишеней на основе ориентированных кристаллов и спектрометров направленного действия для применения в физике высоких энергий и астрофизике.

Автор выражает благодарность Е.И. Тамму и Е.И. Малиновскому за поддержку работы; В.И. Сергиенко за научное руководство и организацию работ; Б.И. Лучкову, В.Ю. Тугаенко, В.В. Ким и В.А. Хабло за помощь в работе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] U. I. Uggerhoj, Rev. Mod. Phys. **77**, 1131 (2005).
- [2] V. A. Baskov, V. A. Khablo, V. V. Kim, et al., Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. **B145**, 92 (1998).
- [3] В. Н. Байер, В. А. Басков, В. Б. Ганенко и др., Письма в ЖЭТФ **49**, 533 (1990).
- [4] В. А. Басков, В. В. Ким, В. А. Хабло, Препринт ФИАН № 9 (ФИАН, Москва, 2010).
- [5] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Препринт ФИАН № 31 (ФИАН, Москва, 2006).

Поступила в редакцию 7 октября 2010 г.