

РАДИАЦИОННАЯ ДЛИНА ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА

В. А. Басков

Радиационная длина X'_0 ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама не является постоянной величиной, а зависит от температуры и толщины кристалла, энергии электронов. Оценка радиационной длины кристалла при температуре $T_{\text{disorient}}$, при которой кристалл становится практически аморфным веществом, не способным к ориентации, составила $X'_{0d} \sim 9$ мм.

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

Радиационная длина аморфного вещества X_0 , определяющая расстояние, проходимое электроном в аморфном веществе, на котором его энергия уменьшается в e раз, практически постоянна и зависит только от свойств вещества. X_0 является важнейшей характеристикой, с помощью которой описывается продольное и поперечное развитие электромагнитных ливней [1–3].

Аномальными считаются электромагнитные ливни, развивающиеся вдоль осей и плоскостей ориентированных кристаллов (кристалл считается ориентированным, если угол входа электрона в кристалл относительно кристаллографической оси составляет $\Theta \ll V/mc^2$, и разориентированным, если $\Theta > V/mc^2$ (V – масштаб потенциала оси; m – масса электрона; c – скорость света)). Они отличаются от стандартных ливней, развивающихся в аморфном веществе [4]. В этом случае радиационная длина, как и иные параметры развития ливней (например, критическая энергия [5]), не является постоянной величиной, а зависит от состояния кристалла (температуры, ориентации, потенциала оси, вдоль которой происходит ориентация кристалла) и энергии налетающей частицы [6].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований радиационной длины X'_0 ориентированного кристалла вольфрама (W) от энергии электронов

и температуры кристалла. В работе исследовались радиационные длины ориентированных относительно оси $\langle 111 \rangle$ кристаллов толщиной 0.07, 0.3, 1.0, 2.7, 5.8 и 8.4 мм при температурах $T_1 = 293$ К и $T_2 = 77$ К и энергиях электронов 26, 28 и 31 ГэВ. В качестве детектора за кристаллом использовался составной черенковский ливневый спектрометр (СЧЛС) [7–10]. Методика этих измерений описана в [11].

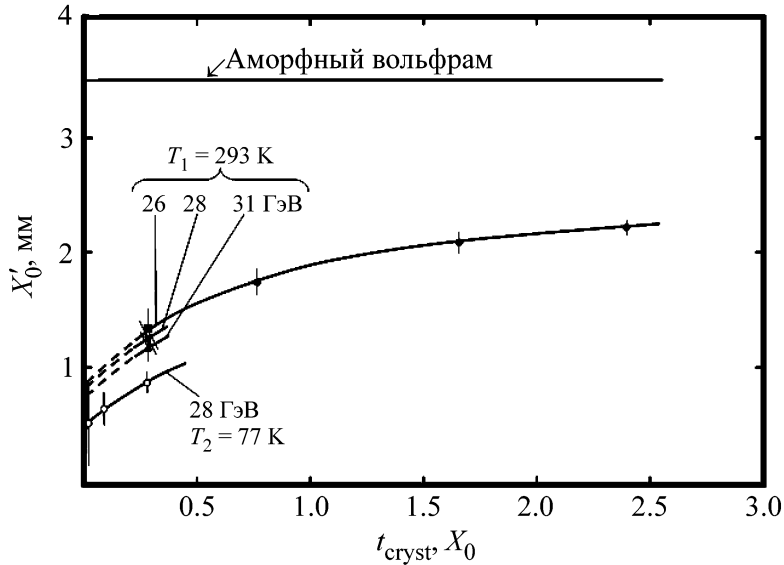


Рис. 1: Зависимость радиационной длины X'_0 ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама перед черенковским спектрометром от толщины кристалла $t_{\text{cryst}} X_0$ (■, ▼, ▲, ● – температура $T_1 = 293$ К; ○ – температура $T_2 = 77$ К; (▼, ▲, ●, ○ – эксперимент, ■ – оценка).

Экспериментальные результаты показывают, что каскадная кривая развития электромагнитного ливня, выходящего из ориентированного кристалла вольфрама и далее развивающегося в спектрометре за кристаллом, сдвигается к началу развития ливня, то есть в кристалл [12]. При ориентации кристалла вещество перед ним не помещается, тем не менее каскадная кривая сдвигается в сторону начала развития ливня, что означает изменение эффективной толщины ориентированного кристалла $t_{w \text{ eff}}$. $t_{w \text{ eff}}$ определяется как $t_{w \text{ eff}} = t_{wp} + \Delta t$, где $\Delta t = t_{wp} - t_{wo}$ – разность положений максимумов каскадных кривых в детекторе за кристаллом при разориентированном (t_{wp}) и ориентированном (t_{wo}) кристалле, соответственно. Новая радиационная длина ориентированного кристалла X'_0 , таким образом, определяется как $X'_0 = X_0(t_{wp}/t_{w \text{ eff}})$, где X_0 – радиационная длина разориентированного кристалла. X'_0 ориентированного кристалла не является

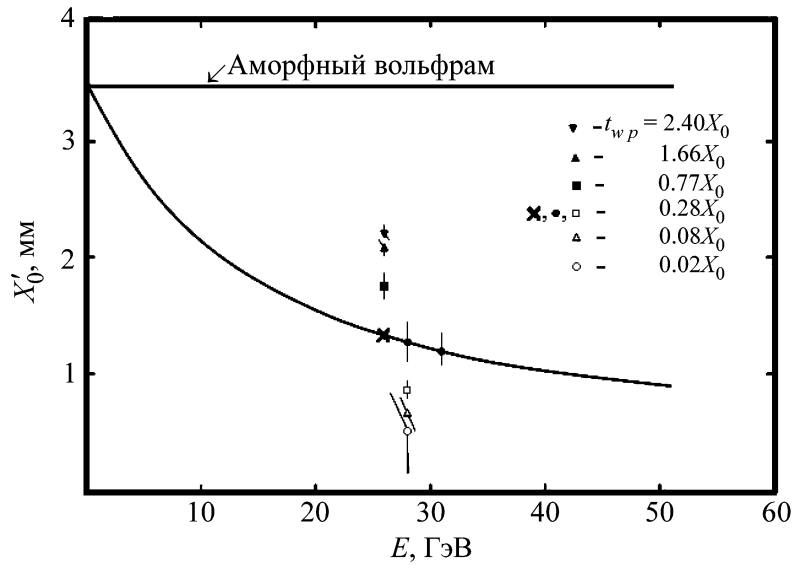


Рис. 2: Зависимость радиационной длины X'_0 ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама перед черенковским спектрометром от энергии электронов E (\blacktriangledown , \blacktriangle , \blacksquare , \bullet , \times – температура $T_1 = 293$ К; \square , \triangle , \circ – температура $T_2 = 77$ К; (\blacktriangledown , \blacktriangle , \blacksquare , \bullet , \square , \triangle , \circ – эксперимент, \times – оценка).

постоянной величиной, а меняется в зависимости от состояния кристалла (толщины, ориентации, температуры) и энергии электронов [4, 10–13].

На рис. 1 и 2 представлены зависимости радиационной длины X'_0 ориентированного кристалла вольфрама от его толщины (рис. 1) и энергии электронов (рис. 2) для двух температур $T_1 = 293$ К и $T_2 = 77$ К. Видно, что X'_0 уменьшается при увеличении энергии электронов, уменьшении температуры и уменьшении толщины кристалла. Увеличение энергии электронов ведет к увеличению сечений электродинамических процессов излучения электронами и рождения e^+e^- -пар фотонами, что, в свою очередь, ведет к увеличению вероятностей излучения электронами и рождения e^+e^- -пар фотонами, развитию аномального ливня и увеличению $t_{w\text{eff}}$. Уменьшение температуры кристалла приводит к уменьшению амплитуды тепловых колебаний атомов решетки и, соответственно, к увеличению потенциала кристаллографической оси, что, в свою очередь, ведет также к росту сечений электродинамических процессов излучения электронами и рождения e^+e^- -пар фотонами, увеличению $t_{w\text{eff}}$. Увеличение толщины кристалла приводит к увеличению (в продольном направлении развития ливня) пространственной области, в которой высоки сечения электродинамических процессов излучения электронами и рождения e^+e^- -пар фотонами. Из-за многократного рассеяния часть ливневых

частиц выходит из области угла ориентации Θ , что приводит к уменьшению вероятности излучения электронами и рождения e^+e^- -пар фотонами. Однако, из-за того же многократного рассеяния часть ливневых частиц возвращается в область угла ориентации. Этот эффект даёт возможность сохраняться аномальному характеру ливня и также ведет к увеличению $t_{w\text{eff}}$ [4, 6, 7].

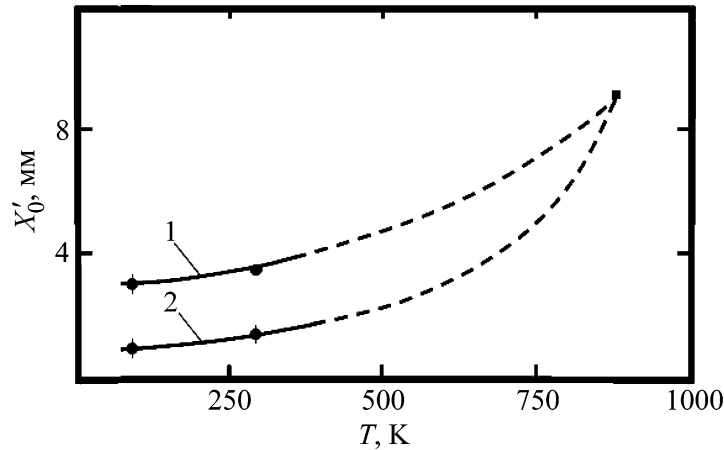


Рис. 3: Зависимость радиационной длины кристалла вольфрама X'_0 от температуры T (1 – кристалл разориентирован ($\Theta \geq 20$ мрад), 2 – кристалл ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$); ● – эксперимент, ■ – оценка).

В работе [13] представлена зависимость параметров ливня (положение максимума каскадной кривой и энерговыведения в максимуме каскадной кривой в детекторе за кристаллом) от температуры кристалла и показано, что взаимодействие электронов как с разориентированным, так и с ориентированным кристаллом отличается от взаимодействия с аморфным веществом. Данное отличие происходит в значительном интервале температур. Можно предположить, что для каждого кристалла существует температура $T_{\text{disorient}}$, при которой кристалл становится практически аморфным веществом, не способным к ориентации. В этом случае из-за увеличения амплитуды тепловых колебаний потенциал оси, относительно которой происходит ориентация кристалла, сравнивается с потенциалом оси разориентированного кристалла. Оценка показала, что для 1 мм кристалла вольфрама такая температура составляет $T_{\text{disorient}} \sim 980$ К [13].

На рис. 3 на основании экспериментальных результатов [13] представлена зависимость X'_0 от температуры и оценка $X'_{0\text{disorient}}$, которая имеет место при $T_{\text{disorient}}$. Оценка радиационной длины при этой температуре составила $X'_{0\text{disorient}} \sim 9$ мм.

Таким образом, в отличие от радиационной длины аморфного вещества, радиационная длина кристалла не является постоянной величиной, а зависит от толщины (ориентации [7]) и температуры кристалла, энергии электронов. Оценка радиационной длины кристалла, при которой кристалл становится практически аморфным веществом, не способным к ориентации, составила $X'_{0\text{disorient}} \sim 9$ мм.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Д. Перкинс, *Введение в физику высоких энергий* (М., Энергоиздат, 1991).
- [2] К. Групен, *Детекторы элементарных частиц* (Новосибирск, Сибирский хронограф, 1999).
- [3] А. Н. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, *Прохождение частиц высоких энергий через вещество* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [4] В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах* (Новосибирск, Наука, СО АН СССР, 1989).
- [5] В. А. Басков, Препринт ФИАН № 1 (Москва, ФИАН, 2014).
- [6] U. I. Uggerhoj, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 1131 (2005).
- [7] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(10), 8 (2012).
- [8] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(8), 16 (2012).
- [9] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(5), 3 (2013).
- [10] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(3), 32 (2014).
- [11] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Препринт ФИАН № 31 (Москва, ФИАН, 2006).
- [12] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(10), 28 (2012).
- [13] В. А. Басков, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42**(4), 3 (2015).

Поступила в редакцию 18 сентября 2014 г.