

ПРИМЕНЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ В СПЕКТРОМЕТРИИ ГАММА-КВАНТОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

В. А. Басков, Б. Б. Говорков, В. В. Ким, Б. И. Лучков*,
В. И. Сергиенко, В. Ю. Тугаенко*, В. А. Хабло

Показано, что применение ориентированных монокристаллов в спектрометрии гамма-квантов и электронов с энергией $10^2 - 10^3$ ГэВ позволит сократить продольные размеры спектрометров и улучшить их энергетическое разрешение.

Исследования взаимодействия высокоэнергетичных электронов и гамма-квантов ($10 - 10^2$ ГэВ) с монокристаллами обнаружили ряд эффектов, которые могут иметь прикладное значение. Так, ориентационные зависимости сечений рождения e^+e^- -пар, тормозного излучения и развития электромагнитных ливней при прохождении электронов и гамма-квантов через монокристалл позволяют определять направление прихода частиц с высокой точностью /1, 2/, что может найти применение как в физике высоких энергий, так и в астрофизике для создания гамма-телескопа высокого углового разрешения /3, 4/. Особенности развития ливней в ориентированных кристаллах также могут быть использованы для улучшения характеристик электромагнитных спектрометров. Обсуждению этих возможностей, проявляющихся при анализе экспериментальных данных, полученных на установке "Каскад" Серпуховского ускорителя /5/, посвящена настоящая статья. В работе исследовалось развитие электромагнитных ливней, инициированных электронами с энергией 26 и 28 ГэВ и мечеными гамма-квантами с энергией 10 — 25 ГэВ. До попадания в спектрометр, где развивался и регистрировался ливень, частицы проходили через монокристалл кремния толщиной 20 мм. (ориентированный вдоль оси $\langle 110 \rangle$) или вольфрама толщиной от 0,07 до 8,4 мм (ориентированный вдоль оси $\langle 111 \rangle$).

В области относительно низких энергий (0,1 — 10 ГэВ) взаимодействие частиц с кристаллами хорошо описывается когерентной теорией. При более высоких энергиях добавляется механизм "постоянного сильного поля" (ПСП), в результате чего значительно возрастают сечения и угловая направленность всех процессов взаимодействия электронов и гамма-квантов с веществом.

* Инженерно-физический институт, г. Москва.

Критерием перехода от когерентной теории к механизму ПСП служит параметр $\chi_s = (E/E_c)(\epsilon/m)$, где E — электрический потенциал в кристалле; $E_c = (m^2 c^2)/(e\hbar) = 1,3 \cdot 10^{16}$ В/см — потенциал критического поля; ϵ — энергия частицы; m — масса электрона; e , c , \hbar — мировые константы. При $\chi_s \ll 1$ процессы описываются когерентной теорией. Для $\chi_s \geq 1$ вступают в силу эффекты ПСП. Для каждого кристалла существует своя критическая энергия ϵ_c "вступления" в область ПСП. Например, для вольфрама и кремния критические энергии равны соответственно 23 ГэВ и 150 ГэВ /3/.

Электромагнитные ливни в продольном направлении в ориентированном кристалле развиваются на более коротких расстояниях, чем в разориентированном кристалле или аморфном веществе. При взаимодействии электронов с энергией 28 ГэВ с кристаллом вольфрама толщиной 1,0 мм, ориентированным вдоль оси $\langle 111 \rangle$, энерговыделение в черенковском счетчике из свинцового стекла толщиной в 1 радиационную длину по пучку, расположенном за кристаллом, возрастает в $4,4 \pm 0,2$ раза по сравнению с разориентированным состоянием. Аналогичное возрастание энерговыделения происходит во всем интервале исследованных энергий гамма-квантов и электронов, при разных толщинах кристаллов вольфрама и кремния /6—8/. Каскадная кривая, характеризующая развитие ливня, в ориентированном кристалле имеет меньшую протяженность, чем в разориентированном. Радиационная длина ориентированного кристалла (X'_0), таким образом, перестает быть постоянной величиной и зависит от ориентации кристалла, электрического потенциала оси (плоскости) и энергии гамма-квантов и электронов. На рис. 1 показано изменение радиационной единицы длины ориентированных кристаллов вольфрама и кремния разной толщины в зависимости от энергии гамма-квантов и электронов. С увеличением энергии частиц радиационная длина ориентированных кристаллов уменьшается, поэтому при большей энергии на одной и той же толщине кристалла в X_0 укладывается больше радиационных длин X'_0 .

Используя экспериментальные результаты /3, 6, 8/, можно приблизительно оценить толщину кристалла, с помощью которого можно поглотить $\sim 90\%$ энергии электромагнитного ливня. Например, для поглощения ливня, вызванного электронами с энергией от 26 ГэВ ($\chi_s \sim 0,8$) до 1 ТэВ ($\chi_s \gg 1$), необходимо использовать кристалл вольфрама толщиной ~ 50 мм. Для поглощения гамма-квантов таких же энергий потребуется кристалл вольфрама толщиной 68 мм. При толщине вольфрама, например, 1,0 мм и энергии электронов 28 ГэВ радиационная длина ориентированного кристалла составляет $0,8 \pm 0,1$ мм и уменьшается при 1 ТэВ до $\sim 0,3$ мм /9/.

Эффект уменьшения радиационной длины ориентированного кристалла может быть использован для создания компактных спектрометров, предназначенных для определения энергии гамма-квантов и электронов высоких и сверхвысоких энергий. Варианты конструкций

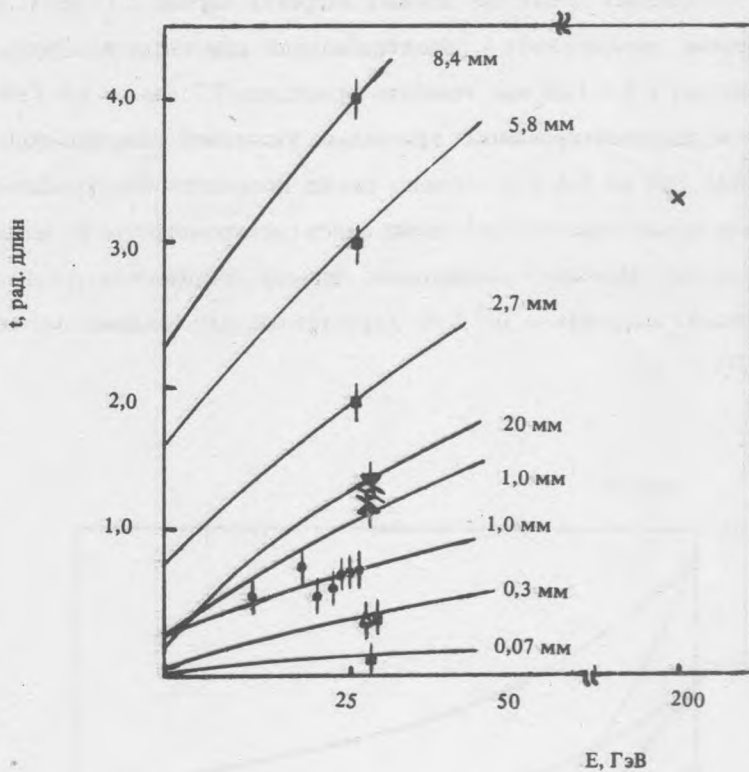


Рис. 1. Зависимость толщины ориентированных кристаллов вольфрама и кремния, выраженной в радиационных длинах (t), от энергии гамма-квантов и электронов (толщины кристаллов указаны над соответствующими кривыми): \circ , Δ — кристаллы вольфрама, $\langle 111 \rangle$, $T = 77$ К, электроны; \blacksquare — кристаллы вольфрама, $\langle 111 \rangle$, $T = 293$ К, электроны; \times , \blacktriangle — кристалл вольфрама, $\langle 111 \rangle$, $T = 293$ К, электроны /9/; \blacktriangledown — кристалл кремния, $\langle 110 \rangle$, $T = 293$ К, электроны; \bullet — кристалл вольфрама, $\langle 111 \rangle$, $T = 77$ К, гамма-кванты.

спектрометров могут быть различны. Ориентированный кристалл можно пассивно использовать перед обычным спектрометром в качестве преконвертора, в котором интенсивно начинает развиваться электромагнитный ливень, продолжающийся далее в обычном спектрометре. Возможен вариант использования кристалла в качестве самостоятельного спектрометра со съемом сигналов непосредственно с кристалла.

На установке "Каскад" исследовался вариант, в котором ориентированные кристаллы вольфрама помещались перед составным черенковским спектрометром полного поглощения (СЧС) /10/. Спектрометр состоял из расположенных друг за другом счетчиков из свинцового стекла ТФ-1 толщиной в 1 радиационную длину по пучку. Электромагнитный ливень, развивающийся в

ориентированном кристалле и продолжающийся в СЧС, позволяет уменьшить продольные размеры СЧС, необходимые для поглощения ливня при данных энергиях частиц с 15 до 11 радиационных длин. При этом доля энергии, поглощенная в ориентированном кристалле вольфрама при энергии электронов 26 ГэВ, возрастает с 0,1 ГэВ при толщине кристалла 2,7 мм до 1,6 ГэВ при толщине кристалла 8,4 мм. В случае разориентированных кристаллов указанной толщины доля поглощенной энергии возрастает с 0,023 ГэВ до 0,6 ГэВ. Можно также поглощать электромагнитный ливень заданной энергии, изменяя только толщину кристалла перед спектрометром и не меняя продольных размеров самого спектрометра. Наиболее значительно эффект сокращения длины спектрометра проявится при очень больших энергиях $\sim 10^3$ ГэВ, характерных для создаваемых сейчас мощных ускорителей (SSC, ВЛЭПП и т.д.).

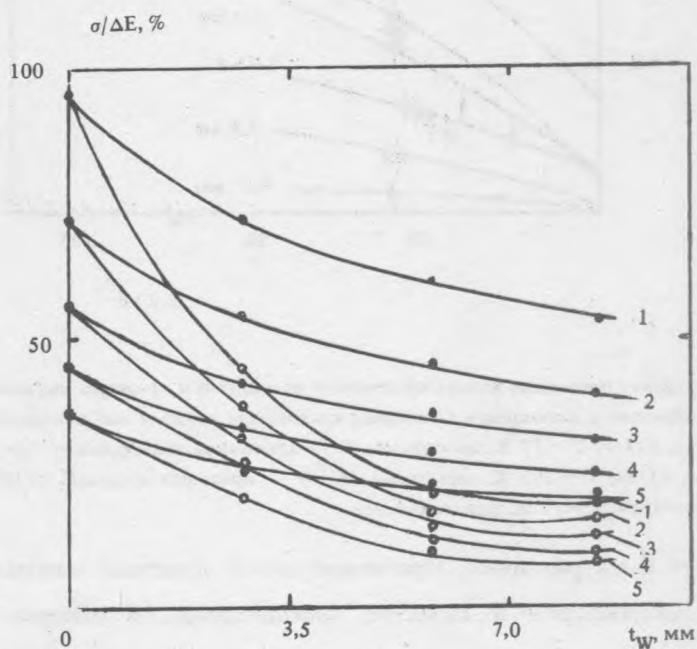


Рис. 2. Энергетическое разрешение спектрометра с радиатором из кристалла вольфрама в зависимости от толщины кристалла t_w . ● — кристалл разориентирован; ○ — кристалл ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$. Толщина спектрометра, стоящего за кристаллом, в радиационных длинах указана справа. Энергия электронов 26 ГэВ. ΔE — доля энергии ливня, поглощенная спектрометром соответствующей толщины.

На рис. 2 показано энергетическое разрешение спектрометра, перед которым помещен кристалл вольфрама, в зависимости от длины спектрометра в радиационных длинах и толщины кристалла

в мм при энергии электронов 26 ГэВ. При разных радиационных длинах спектрометра наблюдается существенное (в 2 — 5 раз) улучшение энергетического разрешения по сравнению с разрешением спектрометра без кристалла и с разориентированным кристаллом. Из рисунка видно также, что при данной энергии частиц существует "оптимальная" толщина кристалла, при которой энергетическое разрешение наилучшее. В данном случае "оптимальная" толщина вольфрама составляет $\sim 7,0$ мм. Использование ориентированного кристалла позволяет применять спектрометры меньшей длины для получения заданного энергетического разрешения. Например, энергетическое разрешение в 20 — 25% (рис. 2) может быть получено при использовании ориентированного кристалла вольфрама толщиной 5,3 — 8,7 мм и СЧС в 1 радиационную длину по пучку, либо только с помощью СЧС толщиной по пучку более четырех радиационных длин без кристалла.

Интересной особенностью, которая может найти применение в практическом использовании кристаллов в спектрометрии, является способность ориентированных кристаллов изменять радиационную длину при изменении температуры. В этом случае при изменении температуры меняется потенциал оси (плоскости), вдоль которой произведена ориентация, и который, в свою очередь, меняет величину χ_s . При энергии электронов 28 ГэВ (рис. 1) радиационная длина кристалла уменьшается на 10% при охлаждении его с 293 К до 77 К, что эквивалентно увеличению эффективной толщины ориентированного кристалла примерно на такую же величину /11/.

Наиболее практичным материалом, который может быть использован перед спектрометром или в качестве самого спектрометра, является кремний. Этот кристалл наиболее доступен, радиационно стойкий, имеет большое отношение радиационной длины разориентированного кристалла к минимальной радиационной длине ориентированного кристалла ($X_0/X'_0 \approx 70$), хорошо поддается обработке, позволяет создавать спектрометры с большим конструктивным разнообразием и обеспечивать регистрацию частиц в 4π -геометрии. Важным достоинством кремния является возможность снятия сигнала непосредственно с кристалла.

Из приведенных в статье экспериментальных результатов и оценок можно сделать заключение о возможном создании компактного спектрометра на основе ориентированного кристалла, способного определять энергию гамма-квантов и электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baier V. N., Katkov V. M., Strakhovenko V. M.. Nucl. Instr. Meth. (A), 250, 514 (1986).
2. Басков В. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 50, 395 (1989).
3. Байер В. Н., Катков В. М., Страховенко В. М. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах, Издательство "Наука" СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989.
4. Baskov V. A. et al. Preprint MPEI, № 045—91, Moscow, 1991.
5. Басков В. А. и др. ПТЭ, 5, 58 (1990).
6. Elsener K., et al. Phys. Lett. (B), 212, 537.(1988)
7. Басков В. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 52, 1082 (1990).
8. Басков В. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 52, 740 (1990).
9. Байер В. Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 49, 533 (1989).
10. Белоусов А. С. и др. Препринт ФИАН № 266, М., 1986.
11. Басков В. А. и др. Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Издательство МГУ, Москва, 1989.

Поступила в редакцию 13 июля 1992 г.