Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 1, с. 10 – 13 © 2025 г. 10 июля

Объемный захват в каналирование в слабоизогнутом кристалле

А. Г. Васильева, А. А. Дурум, М. Ю. Костин, В. А. Маишеев, Е. В. Парменова, И. В. Полуэктов, Ю. Е. Сандомирский, М. Ю. Чесноков, Ю. А. Чесноков[1], А. А. Янович

Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.
После переработки 27 мая 2025 г.
Принята к публикации 27 мая 2025 г.

Представлены данные эффективности объемного захвата в каналирование частиц высокой энергии в слабоизогнутом кристалле. В работе на отечественном ускорителе У-70 исследовался объемный захват протонов энергией 50 ГэВ в слабоизогнутом кристалле кремния с радиусом изгиба 5 м (60 критических радиусов). Измерена доля отклоненного пучка, которая составила (3.6 ± 1) % и (1.1 ± 0.3) % в зависимости от угла поворота частиц и пути в кристалле. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с теоретическими расчетами,демонстрируя удовлетворительное согласие. Метод поворота пучка с помощью объемного захвата перспективен для управления вторичными пучками частиц с большой угловой расходимостью.

DOI: 10.31857/S0370274X25070028, EDN: TCXJEF

Изогнутые кристаллы применяются на ускорителях для управления пучками частиц с помощью явления каналирования [1–3]. В этом процессе участвуют частицы, влетающие в кристалл под малыми углами, в пределах критического угла каналирования [2] (в этой работе подробно обсуждаются и другие параметры каналирования, критический радиус, длина деканалирования и др.). Недавно сотрудниками нескольких российских и зарубежных научных центров было открыто новое физическое явление – отражение пучка протонов высокой энергии от изогнутых атомных плоскостей кристалла кремния [4]. Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит в середине кристалла на малой длине в области касательной к изогнутой атомной плоскости, приводя к отклонению частицы в сторону, противоположную изгибу (см. рис. 1).

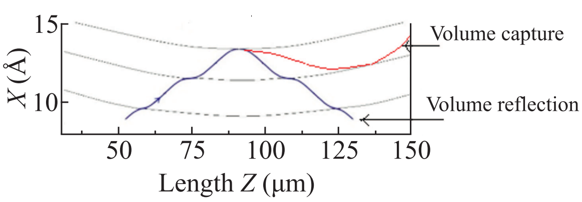

Рис. 1. (Цветной онлайн) Траектория положительно заряженной 150 ГэВ-частицы вблизи касательной к изогнутым атомным плоскостям в кристалле кремния [5]

Вероятность отражения высока и при энергиях около 100 ГэВ в сильно изогнутых кристаллах приближается к единице. Меньшая доля частиц в результате рассеяния на ядрах захватывается в режим каналирования (этот процесс называется объемным захватом) и отклоняется в другую сторону (см. рис. 1). Объемное отражение достаточно подробно исследовано теоретически и экспериментально [4–9]. Объемный захват (ОЗ) исследовался в ограниченном масштабе, хотя исторически он был открыт заметно раньше, в 1982 г. при малых энергиях 1 ГэВ [10]. В этой работе получена оценка вероятности объемного захвата около 10 %. Позднее ОЗ исследовался при более высоких энергиях при малых радиусах изгиба (несколько критических радиусов) [4, 11, 12], и был сделан вывод, что при высоких энергиях его роль невелика. В частности, в [11] приведена оценка вероятности ОЗ при 70 ГэВ, равная 0.3 %. Между тем современная теория [13] предсказывает существенное увеличение вероятности объемного захвата при больших радиусах изгиба (порядка нескольких десятков критических радиусов). Метод поворота пучка с помощью объемного захвата в слабоизогнутых кристаллах может представлять интерес в ускорительных задачах (вывод и коллимация пучков). В данной работе исследовалась эффективность объемного захвата протонов 50 ГэВ в слабоизогнутом кристалле кремния.

На выведенном пучке протонов 50 ГэВ в ИФВЭ проводился опыт с кристаллом кремния (111) длиной 24 мм, изогнутым с радиусом 5 м (60 критиче-

[1]e-mail: chesnokov@ihep.ru

ских). Заметим, критический радиус при этой энергии $R_c = 8.9$ см. Кристалл ориентировался боком по отношению к пучку, как показано на рис. 2. Падающий пучок наводился на кристалл с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков S1–S3. Отклоненный пучок регистрировался с помощью дозиметрической пленки EBT3 при обработке изображения цифровым сканером с высоким разрешением.

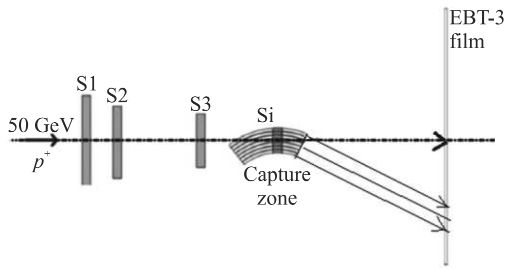

Рис. 2. Схема опыта

На рисунках 3 и 4 в центре показан профиль неотклоненного пучка, справа и на вставке этих рисунков показан отклоненный за счет объемного захвата пучок.

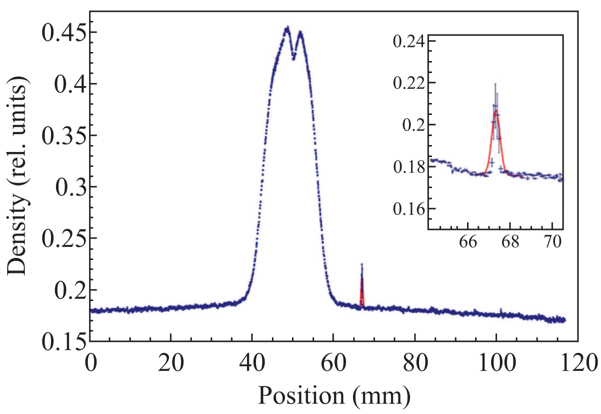

Рис. 3. (Цветной онлайн) Профили прямого и отклоненного пучков за кристаллом, когда угол поворота частиц равен 2.14 мрад, а путь в кристалле от точки захвата до выхода их него 10.7 мм. Отклоненный пучок помечен красной фитирующей кривой, а также увеличен на вставке рисунка

По результатам измерения, доля отклоненного пучка составила (3.6 ± 1) % от падающего для первого случая, и (1.1 ± 0.3) % для второго случая.

На рисунке 5 с помощью теоретического подхода [13] представлены данные эффективности отклонения пучка в результате объемного захвата в каналирование в зависимости от длины пути в кристалле. В начальный момент времени вероятность ОЗ составляет 16 %. Затем, из-за деканалирования, доля каналированных частиц уменьшается. На теоретическую кривую нанесены две полученные экспериментальные точки. Имеется удовлетворительное согласие.

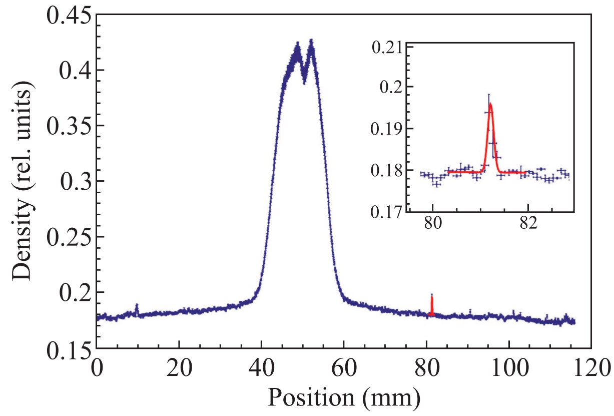

Рис. 4. (Цветной онлайн) Те же величины, что и на рис. 3, когда угол поворота равен 4.5 мрад, а путь в кристалле равен 22.5 мм

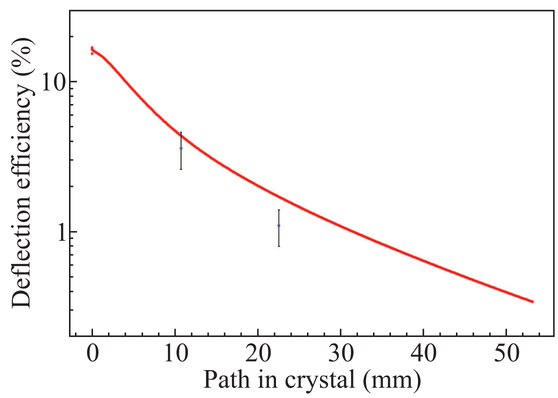

Рис. 5. (Цветной онлайн) Расчетная эффективность отклонения протонов 50 ГэВ в результате ОЗ в зависимости от длины прохождения в кристалле (масштаб по вертикали логарифмический). Синие точки на графиках – эксперимент

Следует отметить, расчет вероятности ОЗ и последующего деканалирования является достаточно сложной задачей. В использованной модели [13] рассматривается явление объемного захвата частиц в кристаллах кремния с ориентацией (111). Описывается, как частицы, проходящие через кристалл в области касательной к плоскостям, могут захватываться в режим каналирования из-за многократного рассеяния и изменения их поперечной энергии. Представлены математические формулы для расчета вероятности объемного захвата, учитывающие параметры кристалла (межплоскостное расстояние), энергию частиц и радиус изгиба кристалла. Рассматривается как случай плоскостей с одним основным периодом, так и случай (111) плоскостей с двойной ямой потенциала, требующий учета двух периодов.

В работе [13] показано также, что линейный закон изменения эффективности объемного захвата ε переходит постепенно на плато в $\varepsilon = 0.3$ при больших отношениях R/R_c. В нашем эксперименте объемный захват проявляется только в измерении фракции каналирующих частиц на выходе из кристалла (см. рис. 2). Поэтому расчет для сравнения с экспериментом проводится в две стадии. На первой стадии вычисляется вероятность захвата частиц в плоскостной канал. На второй стадии учитывается деканалирование частиц по длине кристалла. Рисунок 6 иллюстрирует вероятность захвата частиц в начальный момент.

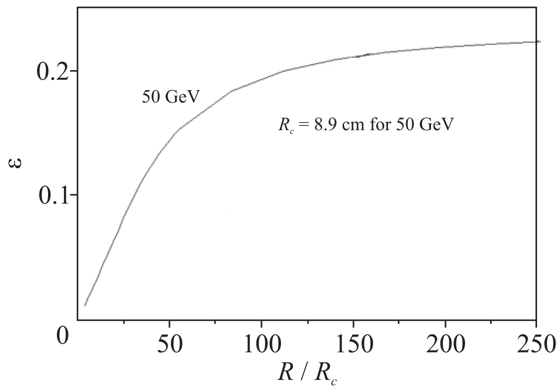

Рис. 6. Вероятность ОЗ в каналирование в начальный момент при разных радиусах изгиба кристалла

Заметим, что особенностью расчетов эффективности для (111) плоскости является наличие двух каналов в этой ориентации кристалла (см. [2]).Один из них – широкий, имеет межплоскостное расстояние 2.35 Å и другой, узкий – с расстоянием 2.35/3Å. Расчеты показывают, что интенсивность захваченных в каналирование частиц определяется в основном широким каналом, так как захваченные частицы в узкий канал очень быстро деканалируют.

На рисунке 6 показана расчетная вероятность ОЗ частиц с энергией 50 ГэВ в широкий плоскостной канал (111) кремния. В расчетах принимался во внимание факт, что в широкий канал попадает $3/4$ частиц, а в узкий канал $1/4$. Согласно расчетам, захваченные в каналирование частицы быстро деканалируют, но тем не менее заметная их доля отклоняется в кристалле.

Окончательные расчеты эффективности отклонения частиц при объемном захвате для сравнения с экспериментом, учитывающие путь прохождения в кристалле, показаны на рис. 5, демонстрируя согласие с измерениями. Этот результат существенно отличается от ранних данных вероятности ОЗ для 70 ГэВ 0.3 % [11], выполненных при меньших радиусах изгиба кристалла. Еще одной возможной причиной занижения вероятности объемного захвата, кроме отличия радиуса изгиба, является неточное понимание процесса деканалирования при ОЗ. В этой ранней работе при оценке вероятности ОЗ полагалось, что деканалирование частиц в протяженном кристалле (около 10 см), происходит экспоненциально, как при торцевом захвате, однако из рис. 5 видно, что это не так (деканалирование на начальном участке кристалла происходит значительно быстрее).

В заключение отметим, в работе впервые представлены данные эффективности ОЗ в каналирование частиц высокой энергии в слабоизогнутом кристалле. Метод поворота пучка таким способом перспективен для управления вторичными пучками частиц, имеющими большую расходимость. В частности, на рис. 7 показана возможная схема формирования пучка вторичных частиц на ускорителе с помощью внутренней мишени и кристалла, отклоняющего частицы за счет объемного захвата.

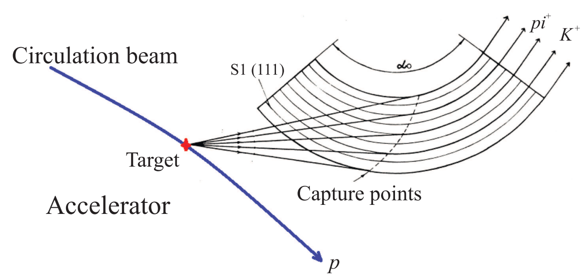

Рис. 7. (Цветной онлайн) Схема вывода пучка вторичных частиц кристаллом

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют,что у них нет конфликта интересов.

1. E. N. Tsyganov, *Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a mono crystal*, preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia (1976).
2. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal channeling and its application at high-energy accelerators*, Berlin, Germany, Springer (1997), 219 p.

3. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **758**, 129 (2016).
4. Y. M. Ivanov, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov et al. (Collaboration), Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006).
5. W. Scandale, A.Vomiero, E. Bagli et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **681**, 233 (2009).
6. Ю. М. Иванов, Н. Ф. Бондарь, Ю. А. Гавриков, А. С. Денисов, А. В. Желамков, В. Г. Ивочкин, С. В. Косьяненко, Л. П. Лапина, А. А. Петрунин, В. В. Скоробогатов, В. М. Суворов, А. И. Щетковский, А. М. Таратин, В. Скандале, Письма в ЖЭТФ **84**, 445 (2006).
7. W. Scandale, D. Still, A. Carnera et al. (Collaboration), Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
8. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, Phys. Lett. A **119**, 425 (1987).
9. V. A. Maisheev, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 084701 (2007).
10. V. A. Andreev, V. V. Baublis, E. A. Damaskinski et al. (Collaboration), JETP Lett. **36**, 340 (1982)
11. Yu. A. Chesnokov, N. A. Galyaev, V. I. Kotov, S. V. Tsarik, and V. N. Zapolsky, Nucl. Instrum. Meth. B **69**, 247 (1992).
12. S. Bellucci, Y. A. Chesnokov, V. A. Maisheev, and I. A. Yazynin, Phys. Rev. Accel. Beams **18**, 114701 (2015).
13. V. A. Maisheev, Nuclear Instruments and Methods A **1077**, 170487 (2025).