

УДК 621.384.634

## ОТКЛОНЕНИЕ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ КРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ В ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛАХ

© 2013 г. А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, В. А. Маишеев, Д. А. Савин,  
Ю. Е. Сандомирский, Ю. А. Чесноков, И. А. Язынин

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

Поступила в редакцию 10.12.2012 г.

В настоящее время на крупных ускорителях для вывода и коллимации пучка используются изогнутые монокристаллы кремния в режиме плоскостного каналирования. Объемное отражение более эффективно, чем каналирование, однако имеет малый угол отклонения. В данной работе описывается устройство для кратного отклонения протонного пучка несколькими изогнутыми полосками кремния в режиме отражения. Изгиб последовательных полосок кремния на поверхности толстой пластины достигается за счет внутренних напряжений в материале кристалла вследствие эффекта Тваймана. Расчеты Монте-Карло показали, что такой метод поворота пучков оптимален для тераэлектронвольтовой области энергий.

DOI: 10.7868/S0032816213060013

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На крупных кольцевых ускорителях все большее применение в системах вывода и коллимации находят изогнутые кристаллы благодаря высоким значениям напряженности электрического поля внутри кристалла [1–6]. Такие кристаллы использовались в основном в режиме плоскостного каналирования. Недавно экспериментально наблюдалось новое физическое явление – отражение пучка протонов высокой энергии от изогнутых атомных плоскостей кристалла кремния, и начались работы по использованию этого явления на ускорителях [7–10].

Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на малой длине в области касательной к изогнутой атомной плоскости. Угол отклонения частиц при отражении от кристаллографических плоскостей ограничен величиной  $1.5\theta_c$ , где  $\theta_c = (2U_c/pv)^{1/2}$  – критический угол каналирования,  $U_c \sim 20$  эВ – величина потенциального барьера плоскостного канала (111) в кремнии;  $p$ ,  $v$  – импульс и скорость налетающей частицы. Протоны с энергией  $E$  70, 400 и 7000 ГэВ отклоняются одиночной полоской в сторону, противоположную изгибу, соответственно на угол 36, 15 и 3.6 мкрад [10]. Вероятность однократного отражения высока и при энергиях около 100 ГэВ приближается к единице. Для практического применения объемного отражения при выводе и коллимации пучков необходимо увеличить значение угла отклонения заряженных частиц.

### 2. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Очевидно, что, применяя последовательно расположенные кристаллы, можно увеличить угол отклонения, поскольку отклонение протонов каждой кристаллической полоской приводит к увеличению области углов захвата пропорционально числу полосок. Принцип усиления угла отражения на цепочке кристаллов показан на рис. 1. Применяя  $n \leq 10$  последовательно расположенных ориентированных кристаллов, можно увеличить угол отклонения частицы примерно в 5–10 раз. Дальнейшее увеличение количества кристаллов приводит к потере эффективности процесса из-за возрастания количества ядерных взаимодействий.

В экспериментах на ускорителях ИФВЭ и ЦЕРН было показано, что протонные пучки с энергией соответственно 70 и 400 ГэВ эффективно отклоняются за счет отражения и каналирова-

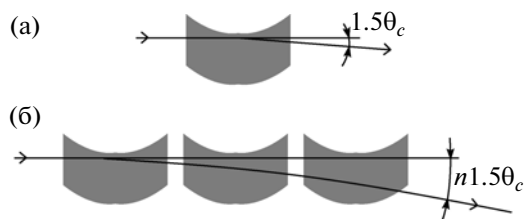
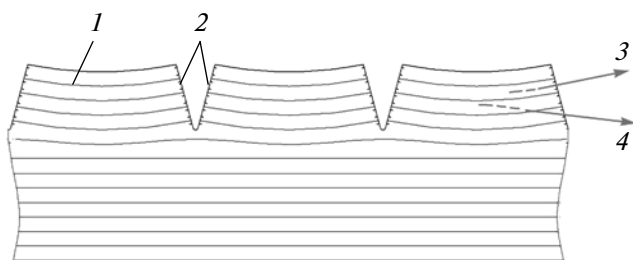


Рис. 1. Отражение пучка на одном изогнутом кристалле (а) и усиление угла отражения на цепочке кристаллов (б).



**Рис. 2.** Принципиальная схема отклонения пучка разработанным устройством. 1 – изогнутые кристаллографические плоскости; 2 – шероховатые поверхности канавок; 3 – отклоненный пучок за счет каналирования; 4 – отраженный пучок частиц.

ния в подобных кристаллических структурах, состоящих из нескольких взаимно ориентированных кристаллов [11, 12]. В этих устройствах применены методы изготовления мультикристаллов, которые предусматривают изгиб отдельных кремниевых полосок в одном металлическом держателе, создающем изгибающий момент. Эти кристаллы устанавливаются в гониометры с механизмами перемещения по координате и углу. Для вывода и коллимации пучка в зависимости от энергии протонов в ускорителе требуется обеспечить разный угол изгиба кристаллов. Объемное отражение в кристаллах будет иметь место при условии, что угол изгиба

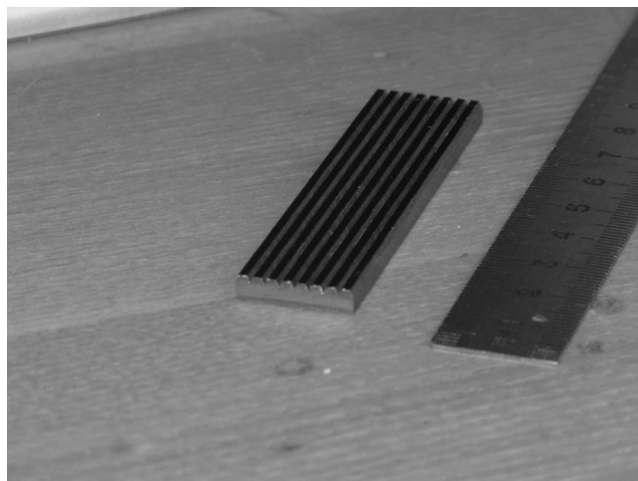
$$\alpha = L/R > 1.5\theta_c n + \psi,$$

где  $L$  – длина кристалла по пучку;  $R$  – радиус изгиба кристалла;  $n$  – число полосок;  $\psi$  – расходимость пучка.

Так для протонного синхротрона ИФВЭ при энергии 70 ГэВ угол изгиба должен составлять 600 мкрад, для SPS при  $E = 400$  ГэВ этот угол равен 250 мкрад, а для энергии 7 ТэВ этот угол ~60 мкрад [13].

Недостатком конструкций мультикристаллов с последовательно расположенными полосками, изогнутыми механическим держателем, является разориентация отдельных полосок на ~ 50 мкрад [12]. Поэтому для применения, например, на Большом адронном коллайдере (БАК) такое устройство выходит за рамки требований к системе коллимации пучка, где нужны кристаллы, разориентированные не более чем до 2–3 мкрад друг от друга, изогнутые на несколько десятков микроградан с радиусом изгиба около 100 м [14].

Из сказанного ясно, что для пучков частиц ультравысоких энергий нужна цепочка последовательно расположенных кристаллов с очень близкими параметрами изгиба каждой из них. Для создания такого устройства предложена новая схема изгиба, которая основана не на внешней силе, создаваемой держателем, а вызвана внутренними напряжениями, создаваемыми ме-



**Рис. 3.** Внешний вид кремниевой пластины с канавками.

ханически нанесенными канавками на поверхности толстого кристалла. Изгиб кристаллических полосок между канавками обусловлен деформацией их поверхностных слоев, вызванных известным из оптики эффектом Тваймана [15]. Предпосылкой для разработки такой технологии явилось то обстоятельство, что на ускорителе ИФВЭ было установлено, что механически нанесенная микронная царапина производит изгиб кристалла на расстоянии, значительно превышающем размер этой области. При этом изгиб получался плавный и не мешал процессу плоскостного каналирования [16].

Используя это свойство, мы разработали мультикристаллическое устройство для поворота пучка частиц ультравысокой энергии, оптимизировав параметры канавок и размеры кристаллической пластины. Схема изгиба кристалла представлена на рис. 2, а на рис. 3 показан внешний вид изготовленного устройства.

Глубокие канавки (~1 мм) треугольной формы наносятся с одной стороны толстой кремниевой пластины толщиной ~5 мм. Глубина канавок и расстояние между канавками определяют радиус изгиба кристалла и выбираются исходя из энергии протонного пучка. Как показали оптические измерения, проведенные с помощью лазерного прибора [17, с. 85], с помощью таких канавок можно создать серию идентично изогнутых, хорошо ориентированных друг относительно друга кремниевых полосок с углом изгиба ~100 мкрад.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОВОРОТА ПУЧКОВ ЧАСТИЦ

Изготовленный образец нового устройства был испытан на циркулирующем протонном пуч-

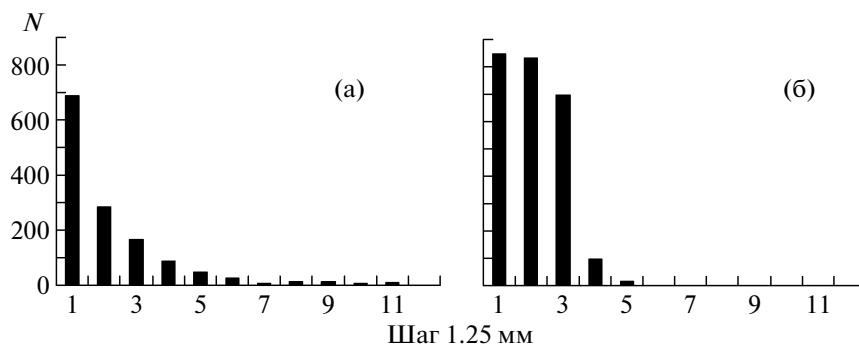


Рис. 4. Профили отклоненного протонного пучка (50 ТэВ) для разориентированного (а) и ориентированного (б) кристаллов.

ке при  $E = 50$  ТэВ на ускорителе У-70. Схема этого опыта подробно описана в [4]. Наведение циркулирующего пучка на кристалл, расположенный вблизи поглотителя, осуществлялось с помощью бамп-магнитов. Хотя условия поворота для такой энергии не являются оптимальными, наблюдался заметный поворот пучка, соответствующий теории. Эффективность поворота пучка кристаллом при этой энергии протонов составила около  $\sim 70\%$ . Результаты эксперимента иллюстрируются рис. 4 в виде профилей пучка на поглотителе ускорителя У-70 в разориентированном и ориентированном состояниях кристалла.

Расчеты показали, что созданное кристаллическое устройство можно использовать эффективно для поворота пучков частиц тэраэлектронвольтных энергий (например, на БАК). Поворот может быть проведен за счет либо кратного отражения частиц на полосках, либо захвата в режим каналирования в нескольких полосках. Результаты расчетов представлены на рис. 5. Расчет отклонения

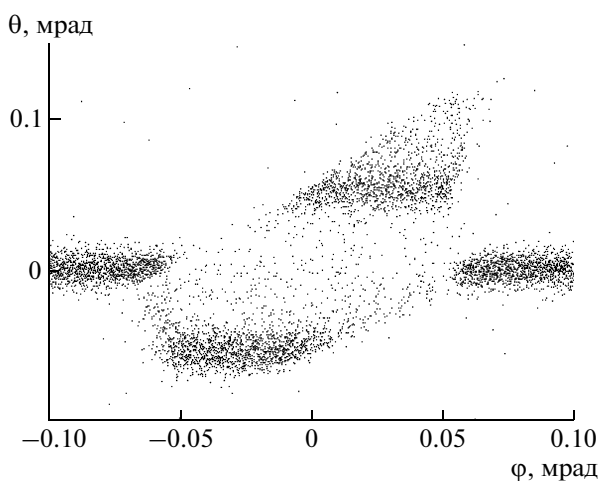


Рис. 5. Расчет отклонения частиц с энергией 1 ТэВ с помощью разработанного устройства, проведенный методом Монте-Карло.

частиц с энергией 1 ТэВ проведен методом Монте-Карло по программе SCRAPER [18]. На рис. 5 точками обозначена плотность частиц,  $\varphi$  — угол вращения кристалла относительно направления пучка,  $\theta$  — угол отклонения налетающих частиц. В зоне углов ( $-0.05$  мрад  $< \varphi < 0$  мрад) наблюдается отклонение на угол  $\theta = 60$  мкрад за счет отражения на 8 полосках. В зоне углов ( $0$  мрад  $< \varphi < 0.05$  мрад) пучок отклоняется за счет каналирования примерно на такой же угол, но в противоположном направлении. Наибольшая эффективность поворота пучка, свыше 90%, достигается в зоне углов отражения, и около 80% частиц отклоняется в зоне углов каналирования.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано устройство для отклонения пучков частиц высокой энергии. Серия изогнутых кремниевых полосок создается поперечными канавками, нанесенными на поверхности толстой пластины. Взаимная ориентация этих изогнутых полосок очень высока, благодаря чему такое устройство может быть использовано в системе коллимации БАК для увеличения его светимости.

Работа поддержана Дирекцией ИФВЭ, а также Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 12-02-91532).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afonin A.G., Biryukov V.M., Gavriluskin V.A. et al. // JETP Lett. 1998. V. 67. P. 781.
2. Afonin A.G., Arkhipenko A.A., Baranov V.I. et al. // Phys. Lett. 1998. V. B435. P. 240.
3. Afonin A.G., Baranov V.I., Biryukov V.M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 094802.
4. Afonin A.G., Baranov V.I., Biryukov V.M. et al. // Phys. Part. Nucl. 2005. V. 36. P. 21.
5. Scandale W., Arduini G., Assmann R. et al. // Phys. Lett. 2010. V. B692. P. 78.

6. Mokhov N.V., Annala G.E., Apyan A. et al. // Proc. of Particle Accelerator Conference (PAC 09). Vancouver, BC, Canada. 2009. P. 1836.
7. Ivanov Y.M., Petrunin A.A., Skorobogatov V.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 144801.
8. Scandale W., Still D., Carnera A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 154801.
9. Taratin A.M., Vorobiev S.A. // Phys. Lett. 1987. V. A119. P. 425.
10. Maisheev V.A. // Phys. Rev. ST Accel.Beams. 2007. V. 10. P. 084701.
11. Afonin A.G., Baranov V.T., Gorlov V.N. et al. // Atomic Energy. 2009. V. 106. P. 409.
12. Scandale W., Vomiero A., Bagli E. et al. // Phys. Lett. 2010. V. B688. P. 284.
13. Yazynin I.A., Maisheev V.A., Chesnokov Yu.A. // Nuovo Cim. 2011. V. C034. № 4. P. 389.
14. Assmann R., Redaelli S., Previtali V., Yazynin I. // Proc. of PAC-2009. Vancouver, Canada. 2009. P. 1820.
15. Lambropoulos J.C., Xu S., Fang T., Golini D. // Appl. Opt. 1996. V. 35. Issue 28. P. 5704; <http://dx.doi.org/10.1364/AO.35.005704>
16. Baranov V.I., Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A. et al. // Proc. of PAC-95. Dallas, USA. 1995. P. 1949.
17. Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I. Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators. Berlin: Springer, 1997.
18. Degtyarev I.I., Liashenko O.A., Yazynin I.A. // Proc. of EPAC-2000. Vienna, Austria. 2000. P. 2506.