А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, С. Беллуччи, С. А. Белов, С. Бини, В. Н. Горлов, Д. Джаннини, А. Д. Ермолаев, И. В. Иванова, Д. М. Крылов, В. А. Маишеев, Д. А. Савин, Е. А. Сыщиков, В. И. Терехов, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков, П. Н. Чирков, И. А. Язынин, Исследование вывода и коллимации пучка в кольцевом ускорителе с помощью новой кристаллической техники, *Письма в ЖЭТФ*, 2010, том 92, выпуск 4, 233–237

https://www.mathnet.ru/jetpl1384

Письма в ЖЭТФ, том 92, вып. 4, с. 233 – 237 © 2010 г. 25 августа

Исследование вывода и коллимации пучка в кольцевом ускорителе с помощью новой кристаллической техники

А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, С. Беллуччи+, С. А. Белов, С. Бини+, В. Н. Горлов, Дж. Джаннини+, А. Д. Ермолаев, И. В. Иванова, Д. М. Крылов, В. А. Маишеев, Д. А. Савин, Е. А. Сыщиков, В. И. Терехов, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков, П. Н. Чирков, И. А. Языни

ГНЦ ИФВЭ, 142281 Протвино, Московская обл., Россия

+INFN-LNF, 00044 Frascaiti, Italy

Поступила в редакцию 6 июля 2010 г.

Новая кристаллическая техника – массив изогнутых полосок и отражатель веерного типа, основанный на тонких прямых пластинах, – была использована для исследования вывода и коллимации циркулирующего пучка в ускорителе при энергии 50 и 1.3 ГэВ. Показано, что новые устройства могут эффективно управлять пучком в широком интервале энергий. Для протонов с энергией 50 ГэВ была достигнута рекордная для этого метода эффективность вывода и коллимации около 90%.

Явление отклонения пучка заряженных частиц в изогнутом кристалле хорошо исследовано и успешно применяется на ускорителях для вывода и коллимации частиц при энергиях 10 ГэВ и выше (см., например [1 – 3]). Однако задача отклонения и вывода частиц с энергиями ниже 1 ГэВ представляет большой практический интерес, например для получения ультрастабильных пучков малого эмиттанса для медицинских и биологических применений. В этом случае существует серьезная проблема при создании отклоняющих устройств для низких энергий, которая связана с небольшим размером изогнутых кристаллических образцов. Эффективность отклонения частиц определяется отношением критического угла каналирования θ_c к расходимости пучка φ и убывает экспоненциально с длиной кристалла L:

$$\mathrm{Eff} \sim (\theta_c/\varphi) \times \exp(-L/L_d),$$

где характерный параметр L_d, называемый длиной деканалирования, является относительно маленьким для низкой энергии. Например, для $E = 500\,\mathrm{MeV}$ мы имеем $\theta_c = 0.24$ мрад и $L_d = 0.4$ мм. С обычным изогнутым кристаллом (приблизительно 1 мм длиной) только 10-процентная эффективность отклонения была достигнута для частиц с энергией 0.5 ГэВ [4] на выведенном пучке.

Еще большие проблемы возникают в задаче вывода циркулирующего пучка из кольцевого ускорителя, поскольку здесь требуются вдобавок значительные поперечные размеры кристалла, превышающие его длину. При этом угол изгиба кристалла должен быть больше 1 мрад, чтобы отклоненный пучок хорошо отделялся от циркулирующего. Потенциально подходящим средством в этом случае могут быть изогнутые кристаллы квазимозаичного типа [5], или тонкие плоские кристаллы [6, 7], но в обоих этих случаях необходимо увеличить угол отклонения частиц в несколько раз.

В этой статье мы предлагаем новую кристаллическую технику, которая может эффективно работать в широком интервале энергий и особенно перспективна для энергий ниже 1 ГэВ.

Первый способ базируется на использовании массива коротких изогнутых кристаллов (рис.1) субмиллиметровой длины (специальные тонкие кремниевые пластины ~ 100 мк толщиной использовались для производства таких полосок). При этом изгиб массива происходит так же, как изгиб одиночной хорошо изученной кремниевой полоски [8].

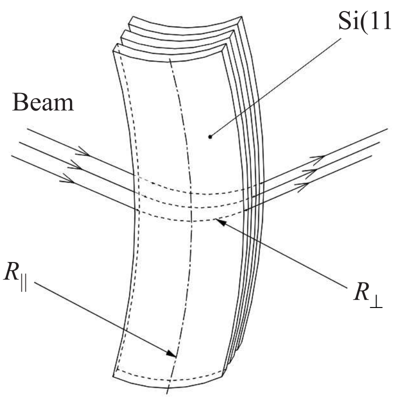

Рис.1. Массив изогнутых кремниевых полосок для поворота пучка за счет каналирования

Второй способ основан на отражении частиц на очень тонких прямых кристаллических пластинах, толщина которых равна нечетному числу полуволн

Тип кристалла	Длина по пучку, мм	Поперечный размер, мм	Угол отклонения пучка, мрад	Эффективность коллимации, %		Эффективность каналирования, %	
				50 ГэВ,	1.3 ГэВ	50 ГэВ	1.3 ГэВ
Полоска	1	0.3	1.0	91 ± 2.5	30 ± 2.5	86 ± 2.5	~ 0
Массив	0.9	7×0.2	1.1	77×2.5	40 ± 2.5	72 ± 2.5	~ 20
Веер	7×0.25	3	$\sim 7 \times 0.05$	82 ± 2.5	35 ± 2.5	70 ± 2.5	~ 5

колебаний траектории частицы при каналировании, $L = (2n+1)/2 \times \lambda$, где $\lambda = \pi d/\theta_c$, $d = 2.3\,\text{Å}$ – межплоскостное расстояние в кремнии. Это означает, например, что оптимальная длина кристалла должна быть 10 мкм для частиц с энергией 50 ГэВ. Угол отражения в одной оптимальной по длине кремниевой пластине приблизительно равен двойному критическому углу каналирования $\theta_c = (2U_o/pv)^{1/2}$, где $U_o \sim 20$ эВ – величина плоскостного канала в кремнии; p, v – импульс и скорость налетающей частицы. Для увеличения угла отклонения предусмотрено несколько ориентированных кристаллических пластин, развернутых подобно вееру (рис.2).

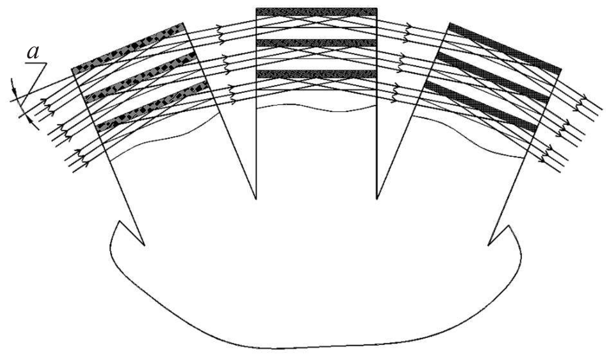

Рис.2. Веерный отражатель для поворота пучка частиц с использованием тонких прямых кристаллов. Схематично показано отражение траекторий частиц от атомных плоскостей

Для оптимального отклонения пучка в этой конструкции каждый следующий кристалл разворачивается на угол $2\theta_c$. Тогда суммарный угол поворота может достигать величины $2\theta_c \times N$, где N – количество кристаллических пластин. Если разворот веера и толщина пластин неоптимальны, происходит поворот пучка на меньший угол, и эта картина более сложна для интерпретации. На рис.3 для понимания процесса представлены расчеты для однократного прохождения пучка через веер при его разных параметрах.

Три разных устройства были подготовлены к ускорительному эксперименту: обычная кристаллическая полоска (технология описана в [8]), кристаллический массив (рис.1), и сборка веерного типа (рис.2). Параметры кристаллов представлены в таблице.

В эксперименте 3 кристалла в высоковакуумных гониометрах поочередно вводились в гало циркулирующего пучка ускорителя У-70, как показано на рис.4. Угол изгиба кристаллов достаточен, чтобы отделить в пространстве циркулирующий и отклоненный пучки. Эффект отклонения пучка за счет каналирования измерялся детектором вторичной эмиссии, расположенным на торце поглотителя в вакуумной камере ускорителя вблизи циркулирующего пучка. Детали экспериментального оборудования и параметры ускорителя описаны в [9]. Измерения проводились при двух энергиях ускоренного пучка протонов: 50 ГэВ и 1.3 ГэВ (кинетическая энергия).

Сначала были проведены измерения при энергии протонов 50 ГэВ. Рис.5 иллюстрирует позитивный эффект применения кристаллов, когда они используется как первичный элемент системы, касающийся пучка (пучок подводился к кристаллу с помощью медленно нарастающего бамп-магнита). Показаны профили пучка в 23 м за кристаллом на входе в поглотитель в четырех случаях. В первом случае (a) кристалл выведен из пучка, пучок касается стенки поглотителя и рассеивается на ней, как на аморфной мишени. Как и ожидалось, пик пучка находится на краю детектора, находящемся примерно в миллиметре от стенки поглотителя (циркулирующий пучок проходит с левой стороны детектора на рисунке).

Второй, третий и четвертый случаи (b)–(d) соответствуют ориентированным кристаллам: одиночная полоска, кремниевый массив, сборка пластин веерного типа. Во всех этих случаях кристаллы каналируют большую часть частиц в глубь поглотителя. Глубокий заброс частиц улучшает коллимацию пучка, или может быть использован для вывода циркулирующих частиц из ускорителя.

Для определения эффективности коллимации была проведена калибровка детектора с помощью кикер-магнита. На рис.6 показаны суммы сигналов детектора, когда пучок отклонялся разными кристаллами в сравнении с эффектом однооборотного заброса пучка на детектор быстрым кикер-магнитом (при этом весь пучок размером 6 мм попадает в аперту-

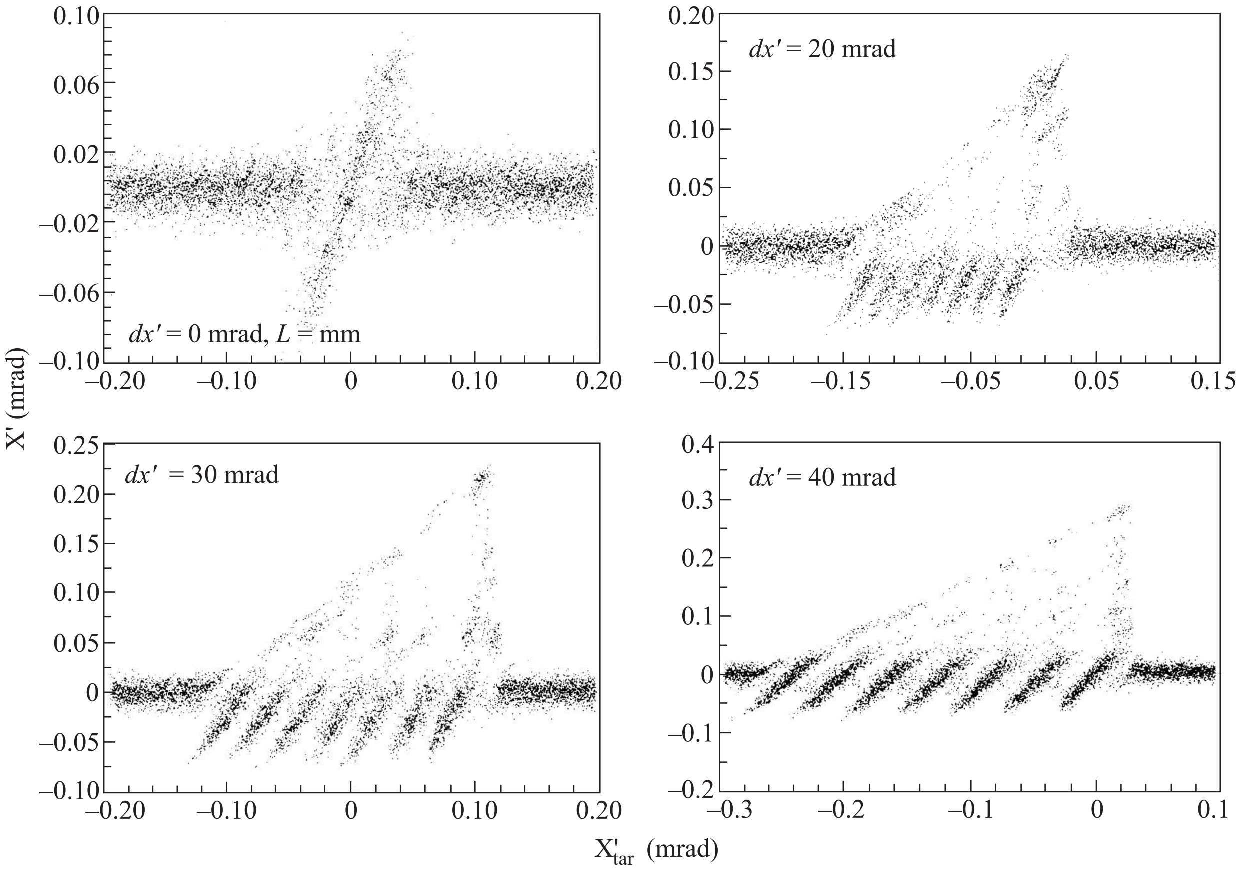

Рис.3. Распределение протонов с энергией 50 ГэВ по углам после прохождения кристаллического веера из семи пластин в зависимости от его угловой ориентации к пучку. Параметр dx' означает разворот соседних пластин веера в микрорадианах

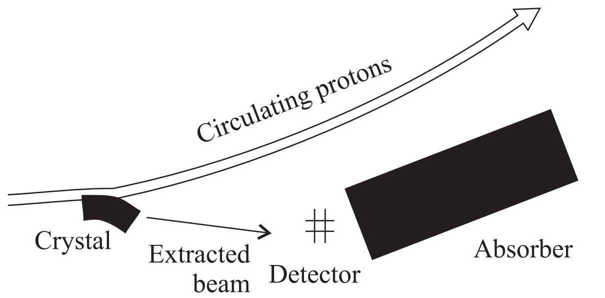

Рис.4. Схема опыта по выводу и коллимации пучка кристаллами

ру детектора). Измеренные эффективности коллимации для трех упомянутых кристаллов равны 91, 77 и 82%. Количество частиц в каналированном пике соответственно равно 86, 72 и 70%. То есть все кристаллы хорошо отклоняли пучок 50 ГэВ. Полученные данные согласуются с результатами компьютерного моделирования с использованием программы SCRAPER [10], учитывающей многооборотный характер движения частиц в реальной структуре ускорителя и многократное взаимодействие их с кристаллом.

При энергии пучка 1.3 ГэВ результаты эффективности значительно ниже (см. таблицу). Наилучший результат, каналированный пик 20%, продемонстрировал массив из семи тонких кристаллов. Большая потеря эффективности объясняется неоптимальностью наведения пучка бампом. При низкой энергии из-за большого размера пучка, около 50 мм, происходит дрейф угла наведения, что должно устраниться при наведении пучка высокочастотным шумом (эта работа запланирована). На рис.7 показан профиль пучка 1.3 ГэВ, отклоненный кристаллическим массивом. Фракция каналированного пика выделена толстой линией (каналированный пик хорошо отделен от циркулирующего пучка и примерно соответствует эффективности возможного вывода частиц за пределы ускорителя).

Таким образом, показано, что созданные кристаллические устройства могут работать в широком диапазоне энергии и имеют перспективы для организации низкоэнергетичных медицинских пучков на

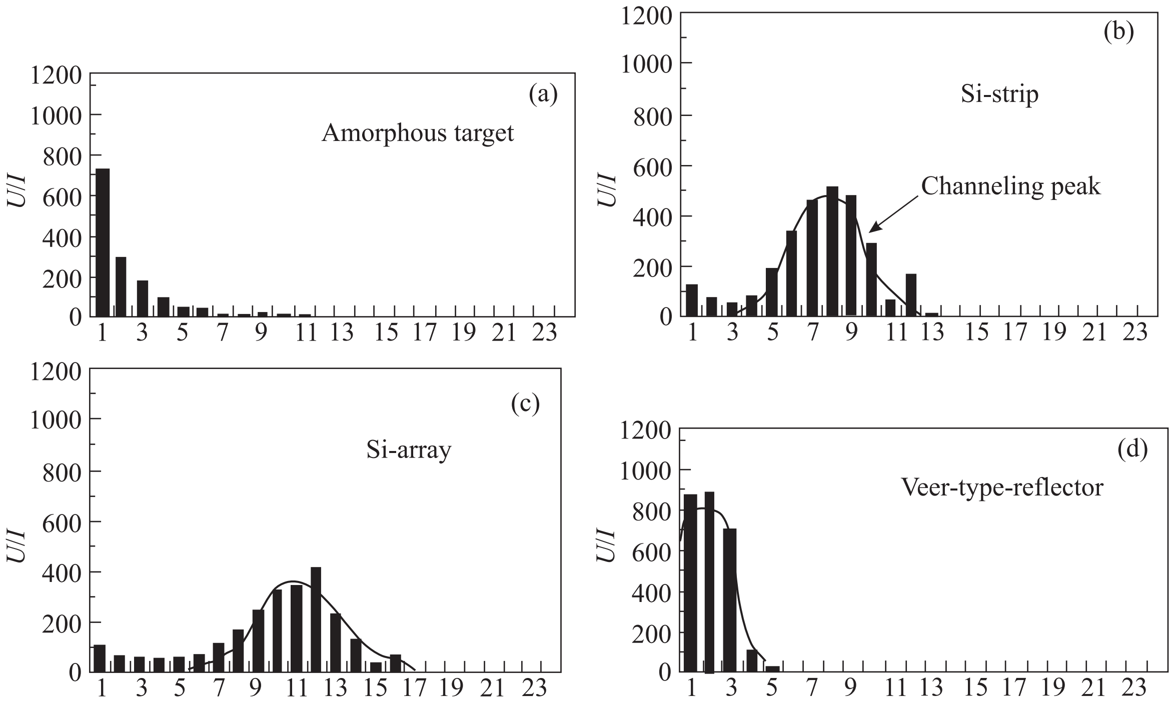

Рис.5. Профили пучка на входе в поглотитель в разных случаях. Шаг 1.25 мм

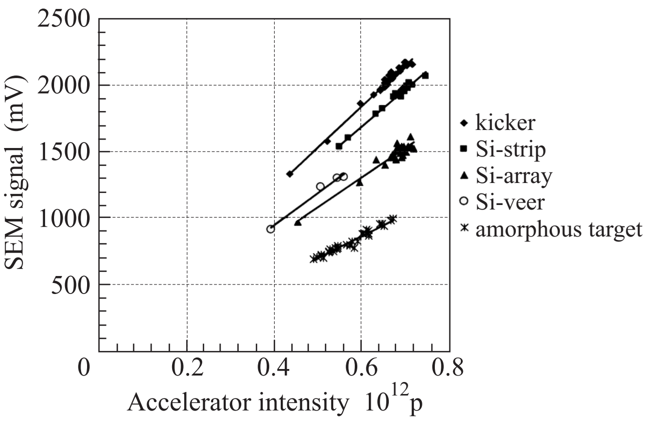

Рис.6. Сравнение суммы сигналов профилометра при работе разных кристаллов с эффектом заброса пучка кикер-магнитом

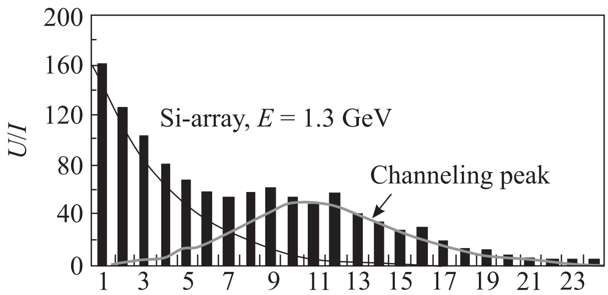

Рис.7. Профиль пучка на поглотителе для протонов с энергией 1.3 ГэВ, отклоненных кристаллическим массивом

У-70. Для оптимизации кристаллических устройств для низких энергий планируются опыты в тестовой зоне лаборатории ЛНФ, где имеется доступный пучок частиц с энергиями 50–700 МэВ [4].

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом (контракт # Н.4е.45.03.09, 1047), грантом Российского фонда фундаментальных исследований # 08-02-01453-а, а также грантом # 09-02-92431-КЭ_а совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований – Консорциум EINSTEIN (Италия).

1. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators*, Springer: Berlin, 1997.
2. W. Scandale, D. Still, A. Carnera et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
3. N. V. Mokhov, G. Annala, A. Apyan et al., FERMILAB-CONF-09-173-APC, Apr 2009. 4pp. Presented at Particle Accelerator Conference (PAC 09), Vancouver, BC, Canada, 4-8 May 2009.
4. S. Bellucci, S. Balasubramanian, A. Grilli et al., Nucl. Instrum. Meth. B **252**, 3 (2006).
5. Yu. M. Ivanov, A. A. Petrunin, and V. V. Skorobogatov, JETP Letters **81**, 99 (2005).

6. A. Taratin, E. Tsyganov, M. Bavizhev et al., SSCL 545 (1991).
7. S. Strokov, T. Takahashi, I. Endo et al., Nucl. Instrum. Meth. B **252**, 16 (2006).
8. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 094802 (2001).
9. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov et al., Phys. Part. Nucl. **36**, 21 (2005).
10. I. I. Degtyarev, O. A. Liashenko, and I. A Yazynin, Applications of Coupled SCRAPER-RTS & T Code in Radiation Therapy, Proc. of EPAC 2000, Vienna, Austria, p.2506–2508.