

DOI: 10.18721/JPM.13207
УДК 621.384.663

ПРИБОРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ, ИЗОГНУТЫХ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ КАНАВОК НА ПОВЕРХНОСТЬ

**В.А. Маишеев, Ю.Е. Сандомирский,
М.Ю. Чесноков, Ю.А. Чесноков, А.А. Янович**

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Протвино Московской области, Российская Федерация

В статье описан интересный метод изгиба кристаллических пластин кремния с помощью нанесения механическим путем канавок на их поверхности. Метод перспективен для применения как в ускорителе U70 Института физики высоких энергий, так и в устройствах Большого адронного коллайдера (БАК). С использованием указанного метода созданы конкретные устройства: кристаллический ондулятор для пучка позитронов с энергией 3 ГэВ, короткие кристаллические дефлекторы для вывода пучка протонов с энергией 70 ГэВ из ускорителя U70, многополосковые кристаллы для коллимации пучка протонов в БАК при энергии 6500 ГэВ.

Ключевые слова: Большой адронный коллайдер, коллимация пучков, кристаллический ондулятор, многополосковые кристаллы

Ссылка при цитировании: Маишеев В.А., Сандомирский Ю.Е., Чесноков М.Ю., Чесноков Ю.А., Янович А.А. Приборы для управления пучками частиц в ускорителях на основе кристаллов, изогнутых путем нанесения канавок на поверхность // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 2. С. 89–98. DOI: 10.18721/JPM.13207

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

DEVICES FOR STEERING PARTICLE BEAMS IN THE ACCELERATORS BASED ON CRYSTALS CURVED BY SCRATCHING THE GROOVES ON THE SURFACE

**V.A. Maishev, Yu.E. Sandomirskiy,
M.Yu. Chesnokov, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich**

Institute for High Energy Physics named by A.A. Logunov
of NRC "Kurchatov Institute", Protvino of Moscow region, Russian Federation

An interesting method of bending silicon crystal plates by scratching the grooves on the surface mechanically has been presented in the paper. This method appears to have considerable promise for both the U70 accelerator at the Institute for High Energy Physics and the devices at the Large Hadron Collider (LHC). Using the method mentioned above, specific devices were made: a crystalline undulator for 3 GeV positrons, short crystalline deflectors for extraction of 70 GeV proton beam from the U70 accelerator, and multistrip crystals for collimating the 6500 GeV proton beam into the LHC.

Keywords: Large Hadron Collider, beam collimation, crystal undulator, multistrip crystal

Citation: Maishev V.A., Sandomirskiy Yu.E., Chesnokov M.Yu., Chesnokov Yu.A., Yanovich A.A., Devices for steering particle beams in the accelerators based on crystals curved by scratching the grooves on the surface, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (2) (2020) 89–98. DOI: 10.18721/JPM.13207

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Идея профессора Э.Н.Цыганова из Дубны – использовать каналирование в изогнутых кристаллах для управления пучками частиц [1] – была проверена и продвинута во многих экспериментах (см. работы [1– 3] и ссылки в них). Практическая реализация этой идеи была наиболее широко осуществлена на ускорителе У70 в Институте физики высоких энергий имени А.А. Логунова (ИФВЭ, г. Протвино Московской области), где кристаллы используют в регулярных сеансах работы для вывода и формирования пучка. Вопросы физики каналирования пучков частиц были изложены в работах [4, 5].

Данная статья посвящена одному из способов изгиба кристаллов с целью их применения в ускорителях. Следует отметить, что эффективность отклонения частиц изогнутым кристаллом (см., например, монографию [4]) определяется отношением критического угла каналирования θ_c к расходимости пучка φ и убывает экспоненциально с длиной кристалла L :

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

где характерный параметр L_d , называемый длиной деканалирования, линейно растет с энергией частиц; в кристаллах кремния для протонов с энергией 100 ГэВ он составляет 5 см.

Критический угол каналирования (угол Линдхарда) довольно мал:

$$\theta_c \approx (1/E)^{1/2} = 0,020 - 0,002 \text{ мрад}$$

для протонов с энергиями E от 100 до 10000 ГэВ соответственно.

В связи с малостью указанного угла, такой метод управления пучками не универсален, но может быть очень полезным в ряде случаев, особенно для вывода циркулирующего пучка и его деления в каналах частиц, где изогнутые кристаллы выполняют роль

миниатюрных магнитов.

Размеры кристаллических пластин (вдоль пучка) варьируются от 0,1 мм до 10 см, в зависимости от величины изгиба кристалла и типа решаемых задач. Метод изгиба кристалла, который зачастую используется, основан на приложении к нему момента сил, создаваемого металлическим держателем [4, С. 85]. Для малых углов изгиба в нескольких случаях применялся метод, основанный на нанесении механическим способом канавок на поверхности кристалла.

Суть метода изгиба путем нанесения канавок

В оптике известен эффект Тваймана [6], который заключается в том, что небольшие механические повреждения поверхности создают за счет микротрещин напряжение, которое вызывает изгиб структуры вещества, причем на довольно большие расстояния. Для каналирования частиц высоких энергий важно, чтобы эти деформации были плавными. В экспериментах по отклонению частиц кристаллами, проводимых в ИФВЭ [4], были замечены интересные явления, возникающие на торце кристалла, когда траектории каналированных частиц, выходящих из кристалла, формируются особым образом при наличии микротрещин на поверхности («чувствуют» микротрещины).

Этот эффект объясняется тем, что протоны вблизи (например) царапины каналируются в деформированных слоях кристалла и огибают эти царапины. Реконструкция углов отклонения частиц показывает, что деформация кристаллографических плоскостей проникает на значительные (вплоть до нескольких сотен микрометров) глубины (рис. 1). Этот эффект был успешно использован для решения нескольких задач создания ускорений, когда изгиб кристаллов кремния создавался путем механического нанесения на их поверхности канавок с определенным периодом (с помощью алмазного резца).

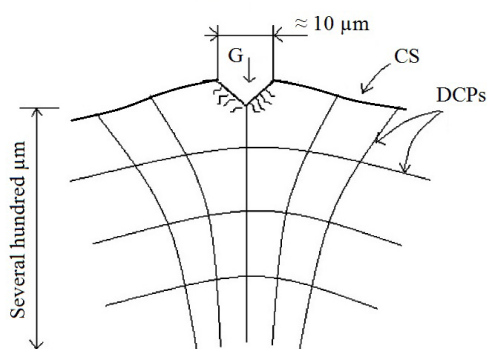


Рис. 1. Эффект деформации кристаллографических плоскостей, вызванной царапиной на поверхности кристалла:
 G— канавка, CS— поверхность кристалла, DCPs — деформированные кристаллографические плоскости

Примеры применения метода в ускорителях

В работе [7] впервые была показана возможность создания кристаллического ондулятора — периодически изогнутого кристалла — путем двустороннего нанесения механических канавок. С помощью рентгеновского дифрактометра было установлено, что достигнута амплитуда деформаций 40 \AA в 10 периодах с шагом $0,5 \text{ мм}$, что достаточно для генерации жестких фотонов. Первый эксперимент с таким ондулятором был проведен на ускорителе У70 с позитронным пучком, обладающим энергией 10 ГэВ [8]. Схема ондулятора с нанесенными канавками, разработанного в ИФВЭ, показана на рис. 2.

Период двустороннего нанесения канавок d должен быть не менее толщины кристаллической пластины h , чтобы синусоидальные деформации проникли вглубь, на всю толщину кристалла, согласно принципу Сен-Венана, известному из теории упругости [9]. Если канавки наносить с малым периодом, так что $d \ll h$, то на глубине, примерно равной d , напряжения становятся однородными, что приводит к равномерному изгибу кристалла (рис. 3,а).

При этом толщина рабочего слоя, где будет эффективное каналирование, равна $h - d$. Такой способ приготовления изогну-

того кристалла впервые был применен на кристаллической станции деления пучка с энергией 70 ГэВ в ускорителе У70 [10]. Угол изгиба кристалла длиной 16 мм и толщиной $0,5 \text{ мм}$ составил 10 мрад . Опыт работы с протонными пучками интенсивностью $10^{12} \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1})$ в течение нескольких лет (с 2009 года) показал, что кристалл сохраняет изгиб и каналирующие свойства, а также делит пучок с прежней эффективностью. На рис. 3,б показан фрагмент этого кристалла после облучения протонами (в количестве около $5 \cdot 10^{19}$).

Следует отметить, что метод изгиба кристаллов путем нанесения канавок на их поверхности применим и для создания кристаллических полосок, изогнутых на малые углы (около 50 мкрад), оптимальных для энергий на уровне тераэлектронвольт. Такие кристаллы были проверены на пучке протонов с энергией 400 ГэВ в ускорителе суперпротонного синхротрона (СПС) в Европейском совете ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария), в режиме отклонения частиц за счет объемного отражения [11].

На рис. 4,б приведена фотография кристалла, приготовленного для этого эксперимента сотрудниками ИФВЭ, а на рис. 4,а — схема его работы в режиме кратного отражения частиц. Глубокие канавки с шероховатой поверхностью, выполненные треугольной фрезой с крупной алмазной крошкой, создают необходимый изгиб образовавшихся полосок на полированной грани толстой кремниевой пластины. В эксперименте, поставленном в работе [11], пучок отклонялся на угол 50 мкрад и соответствовал расчетному значению с эффективностью около 90% .

На Курчатовском источнике синхротронного излучения («КИСИ-Курчатов», НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва) с помощью параллельного рентгеновского пучка были проведены исследования изгиба отдельных полосок и их взаимной ориентации [12]. Анализ полученных результатов показал, что эта конструкция, т.е. серия изогнутых полосок, образованная между крупными канавками на толстой пластине,

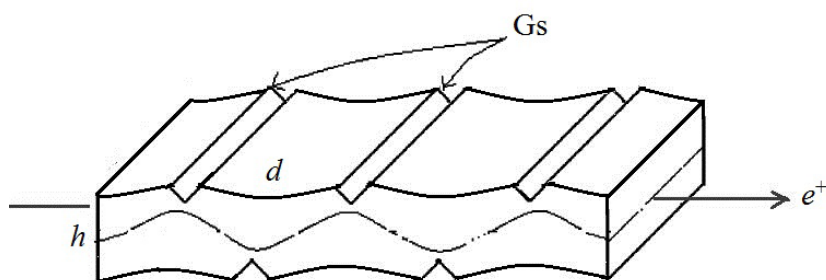


Рис. 2. Схематическое изображение кристаллического ондулятора:
Gs – канавки, d – период нанесения канавок, h – толщина кристаллической пластины, e^+ – пучок позитронов.
Синусоидой показаны изогнутые кристаллографические плоскости в толщине кристалла

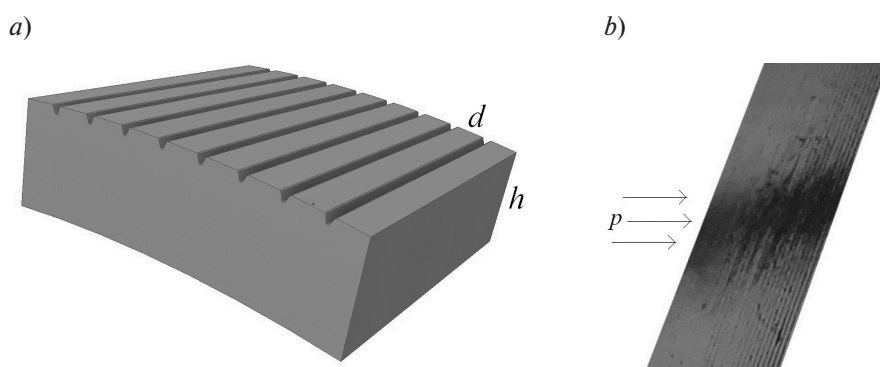


Рис. 3. Схематическое изображение изогнутой пластины кристаллического кремния:
 a – равномерный изгиб получен с помощью частого нанесения канавок на поверхности;
 b – фрагмент пластины в зоне взаимодействия с пучком протонов p

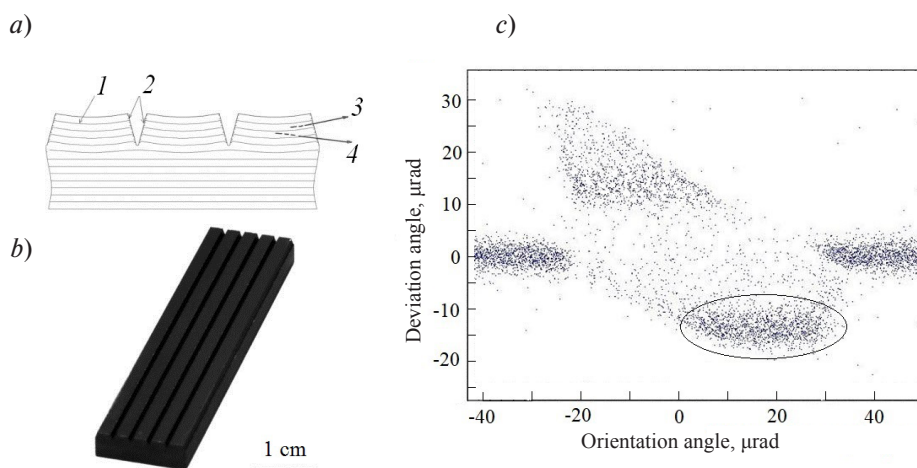


Рис. 4. Изогнутый многополосковый толстый кристалл кремния с нанесенными периодическими канавками на поверхности:
 a – схема его работы в режиме кратного отражения частиц; b – его фотография; c – результат расчета эффективного отклонения протонов с энергией 6,5 ТэВ за счет кратного отражения в изогнутых полосках (расчет выполнен методом Монте-Карло по программе СКРЕПЕР). На рис. 4, a показаны изогнутые кристаллографические плоскости (1); угловые канавки (2); треки частиц, отклоненных вследствие каналирования (3) икратно отраженных изогнутыми плоскостями (4); на рис. 4, c овалом показана зона отражения



настолько хорошо взаимно ориентирована, что подходит для коллимации пучка протонов на Большом адронном коллайдере (БАК, ЦЕРН) и даже в планируемом ускорителе на Будущем циклическом коллайдере (БЦК, ЦЕРН) на энергию 50 ТэВ, с помощью кратного отражения частиц. При этом параметры кристаллического прибора можно легко адаптировать к такой энергии путем вариации размеров канавок и расстояния между ними.

На рис. 4,с показан результат расчета зависимости углов отклонения частиц пучка с энергией 6,5 ТэВ от ориентации кристаллической пластины в виде двумерной плотности, обозначенной точками. Расчет был выполнен методом Монте-Карло по нашей программе СКРЕПЕР [14]. Можно видеть, что по краям пучка (справа и слева) частицы не отклоняются, так как не попадают в створ углов изгиба кристаллических полосок. В зоне отражения, отмеченной на рисунке, практически весь пучок смещается вниз на угол 15 мкрад, соответствующий кратному отражению на пяти кристаллических полосках. Расчетная эффективность отклонения пучка, согласно проведенным оценкам, составляет свыше 92%.

Новшества на ускорителе У70 с использованием предложенного метода изгиба кристаллов

Оптимизация вывода пучка из ускорителя.

Вывод пучка короткими кристаллами кремния используется на ускорителе У70 с 1998 года [13]. Новый метод изгиба позволит увеличить эффективность указанного вывода за счет уменьшения длины кристаллов, при сохранении нужного угла изгиба, так как нанесенные на поверхности канавки увеличивают кривизну кристалла. Кроме того, если канавки наносить неравномерно, можно добиться изгиба со спадающей кривизной. При этом уменьшается деканализация частиц по длине кристалла, что также уменьшит потери частиц [14].

Нами подготовлены несколько экземпляров кристаллов, изогнутых с помощью

поверхностных канавок, в том числе с неравномерной насечкой (рис. 5). Проведена оптическая проверка изгиба с помощью лазерного устройства (эта методика описана в работе [4]). На вставках рис. 5 показаны графики распределений функции угла изгиба вдоль длины кристаллов. Видно, что равномерная насечка приводит к равномерному изгибу, неравномерная насечка дает спадающую кривизну. На рис. 5,а также показано, что идентичные кристаллы уложены в стопку для увеличения поперечного размера кристаллического дефлектора пучка с целью дополнительного увеличения эффективности его работы.

На рис. 6 показана схема вывода пучка улучшенными кристаллами. Она поясняет, как эффективность вывода пучка можно увеличить за счет снижения доли деканализированных частиц. На вставке рис. 6 показано угловое распределение частиц, отклоненных кристаллом с постоянной (кривая 1) и со спадающей (кривая 2) кривизной, рассчитанное методом Монте-Карло по нашей программе СКРЕПЕР [14]. Видно, что эффект спадающей кривизны уменьшает долю деканализированных частиц в несколько раз. Эксперименты по улучшению кристаллического вывода на У70 планируются сразу после завершения модернизации ускорителя. На кристаллической станции СКД19 используется кристалл длиной 5 мм и углом изгиба 2 мрад. Приготовленные кристаллы (см. рис. 5) позволят уменьшить их длину до 3 мм, что увеличит эффективность вывода с 70 до 85%.

Испытание кристаллического ондулятора на пучке позитронов с энергией 3 ГэВ.

Энергия фотонов, генерируемых в ондуляторе, пропорциональна квадрату Лоренц-фактора частицы γ и обратно пропорциональна периоду ондулятора L . В обычном электромагнитном ондуляторе период достигает нескольких сантиметров. Таким образом, фотоны с энергией в несколько кэВ достигают в электронном ускорителе энергии около 1 ГэВ в пучке. Поэтому кристаллический ондулятор с периодом субмиллиметрового ди-

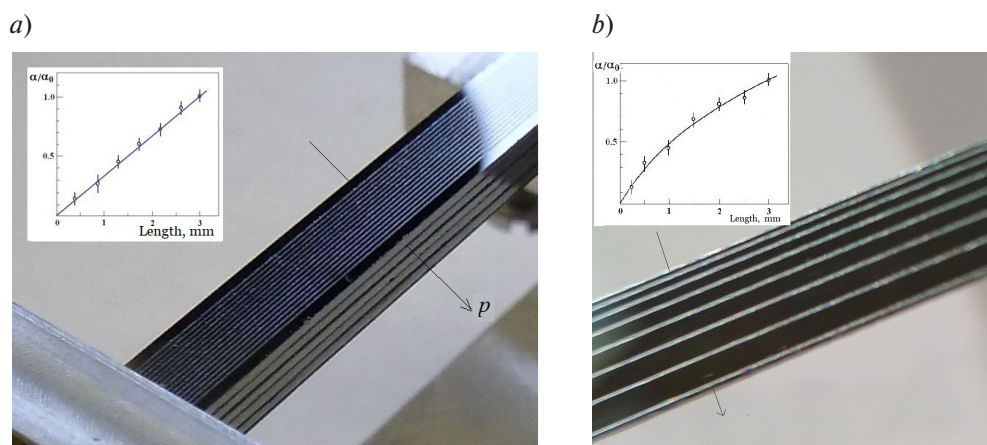


Рис. 5. Внешний вид кристаллов кремния с равномерным (а) и неравномерным (b) нанесением канавок; на вставках показаны графики распределения функции угла изгиба вдоль длины кристаллов

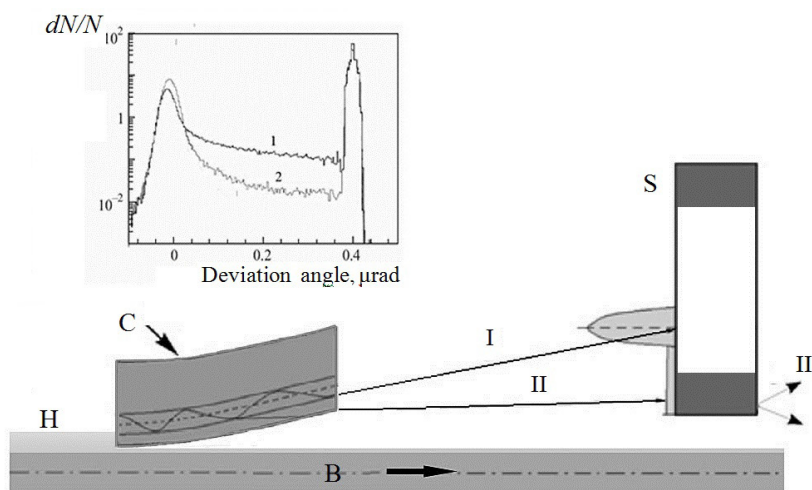


Рис. 6. Схема вывода пучка кристаллом (С): I – пик каналированных частиц, которые эффективно выведены; II – фракция деканализованных частиц; III – потери на септуме (S); Н, В – гало и пучок соответственно.

На вставке показаны угловые распределения частиц, отклоненных кристаллом с постоянной (кривая 1) и со спадающей (кривая 2) кривизной; рассчитаны методом Монте-Карло по нашей программе СКРЕПЕР [14]

апазона привлекает пристальное внимание исследователей, для того чтобы увеличить энергию фотонов.

Первые данные по излучению с помощью кристаллического ондулятора были получены на пучке позитронов с энергией 10 ГэВ в ИФВЭ [8]. Однако большинство ускорителей электронов, где могут использоваться кристаллические ондуляторы, работает при энергии ниже 6 ГэВ. Нами подготовлены новые образцы кристаллических ондулято-

ров (рис. 7,а), оптимизированных для более низких энергий позитронов, которые можно достичь на действующих ускорителях электронов. Первые опыты предполагается провести в ИФВЭ на установке «Кристалл» при энергии позитронов 3 ГэВ. При достигнутых параметрах, а именно – периоде 0,4 мм, амплитуде 50 Å, числе периодов 9, мы планируем получить ондуляторный пик фотонов примерно 0,23 МэВ. Результаты расчета спектра фотонов, выполненные по

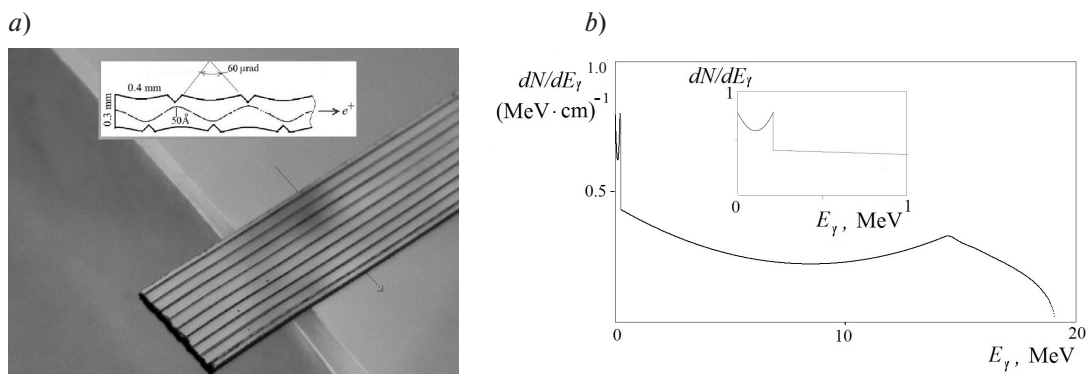


Рис. 7. Кристаллический ондулятор на пучке позитронов с энергией 3 ГэВ: *a* – его фотография и схематическое изображение его сечения (на вставке); *b* – расчетный спектр фотонов, полученных с помощью ондулятора, и ондуляторный пик в области 0,23 МэВ (на вставке)

программе [15], представлены на рис. 7, *b*. Эта программа реализует алгоритм расчета ондуляторного излучения в кристалле с учетом довольно интенсивного излучения при каналировании позитронов, предложенный в работе [16]. Ондуляторный пик в области 0,23 МэВ подробно показан на вставке рис. 7, *b*. Фоновое излучение до 20 МэВ обусловлено каналированием.

Заключение

В данной статье описан интересный метод изгиба кристаллических пластин путем нанесения механическим способом канавок на их поверхности. Такой метод уже применялся для решения ряда задач управления

потоками частиц, но еще важнее его развитие для новых, обозначенных здесь задач. С помощью метода нанесения канавок созданы конкретные устройства: кристаллический ондулятор для позитронов 3 ГэВ, короткие кристаллические дефлекторы для вывода пучка протонов с энергией 70 ГэВ из ускорителя У70, многополосковые кристаллы для коллимации пучка протонов в Большом адронном коллайдере при энергии 6500 ГэВ. Последние перспективны для решения глобальной задачи коллимации пучка на будущих мультитэВ коллайдерах.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 20-02-00045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Elishev A.F., Filatova N.A., Golovatyuk V.M., et al.** Steering of charged particle trajectories by a bent crystal // *Physics Letters. B*. 1979. Vol. 88. No. 3–4. Pp. 387–391.
2. **Shiltsev V.** Experience with crystals at Fermilab accelerators // *International Journal of Modern Physics. A*. 2019. Vol. 34. P. 1943007.
3. **Scandale W., Taratin A.M.** Channeling and volume reflection of high-energy charged particles in short bent crystals. Crystal assisted collimation of the accelerator beam halo // *Physics Reports*. 2019. Vol. 815. 25 June. Pp. 1–107.
4. **Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I.** Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin, Germany: Springer, 1997. 219 p.
5. **Chesnokov Yu.A., Afonin A.G., Baranov V.T., et al.** Modern success in channeling study and applications at the U-70 accelerator of IHEP // *Nuovo Cimento. C*. 2011. Vol. 034. No. 4. Pp. 407–415.
6. **Lambropoulos J.C., Xu S., Fang T., Golini D.** Twyman effect mechanics in grinding and microgrinding // *Applied Optics*. 1996. Vol. 35. No. 28. Pp. 5704–5713.
7. **Bellucci S., Bini S., Biryukov V.M., et al.** Experimental study for the feasibility of a crystalline undulator // *Physical Review Letters*.

2003. Vol. 90. No. 3. P. 034801.

8. **Баранов В.Т., Беллуччи С., Бирюков В.М. и др.** Первые результаты исследования излучения позитронов в кристаллическом ондуляторе // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2005. Т. 82. № 9. С. 638–641.

9. **Тимошенко С.П., Гудьер Дж.** Теория упругости. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1979. 560 с.

10. **Архипенко А.А., Афонин А.Г., Баранов В.Т. и др.** Деление пучка протонов с энергией 50 ГэВ слабозвмущающим изогнутым кристаллом // Приборы и техника эксперимента. 2009. №2. С. 5–8.

11. **Scandale W., Arduini G., Butcher M., et al.** Deflection of high energy protons by multiple volume reflections in a modified multi-strip silicon deflector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B. 2014. Vol. 338. 1 November. Pp. 108–111.

12. **Калоян А.А., Тихомиров С.А., Подурец К.М., Маишеев В.А., Сандомирский Ю.Е., Чесноков Ю.А.** Исследование кристалличе-

ского прибора для отклонения протонного пучка с помощью дифракции синхротронного излучения // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 3. С. 370–373.

13. **Афонин А.Г., Маишеев В.А., Троянов Е.Ф. и др.** Вывод протонного пучка из ускорителя ИФВЭ с помощью коротких кристаллов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2005. Т. 36. № 1. С. 43–99.

14. **Язынин И.А., Маишеев В.А., Чесноков Ю.А.** Использование кристалла со спадающей кривизной для увеличения эффективности вывода пучка из ускорителя // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2011. Т. 94. № 3. С. 267–270.

15. **Маишеев В.А.** Программа для расчета ондуляторного спектра фотонов. <http://phpc01.ihep.su/~laba/chesn/Simulation%20of%20photon%20spectrum%20in%20undulator/>.

16. **Bellucci S., Maishev V.A.** Calculations of intensity of radiation in crystal undulator // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B. 2006. Vol. 252. No. 2. Pp. 339–346.

Статья поступила в редакцию 26.03.2020, принята к публикации 21.04.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАИШЕЕВ Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики высоких энергий имени А.А. Логанова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино Московской обл., Российская Федерация.

142281, Российская Федерация, г. Протвино Московской обл., пл. Науки, 1
maishev@ihep.ru

САНДОМИРСКИЙ Юрий Евгеньевич – инженер-технолог Института физики высоких энергий имени А.А. Логанова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино Московской обл., Российская Федерация.

142281, Российская Федерация, г. Протвино Московской обл., пл. Науки, 1
Yury.Sandomirskiy@ihep.ru

ЧЕСНОКОВ Михаил Юрьевич – инженер-исследователь Института физики высоких энергий имени А.А. Логанова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино Московской обл., Российская Федерация.

142281, Российская Федерация, г. Протвино Московской обл., пл. Науки, 1
Michail.Chesnokov@ihep.ru

ЧЕШНОКОВ Юрий Андреевич — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики высоких энергий имени А.А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино Московской обл., Российская Федерация.

142281, Российская Федерация, г. Протвино Московской обл., пл. Науки, 1
chesnokov@ihep.ru

ЯНОВИЧ Андрей Антонович — научный сотрудник Института физики высоких энергий имени А.А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино Московской обл., Российская Федерация.

142281, Российская Федерация, г. Протвино Московской обл., пл. Науки, 1
yanovich@ihep.ru

REFERENCES

1. **Elishev A.F., Filatova N.A., Golovatyuk V.M., et al.**, Steering of charged particle trajectories by a bent crystal, *Physics Letters. B.* 88 (3–4) (1979) 387–391.
2. **Shiltsev V.**, Experience with crystals at Fermilab accelerators, *International Journal of Modern Physics. A.* 34 (2019) 1943007.
3. **Scandale W., Taratin A.M.**, Channeling and volume reflection of high-energy charged particles in short bent crystals. Crystal assisted collimation of the accelerator beam halo, *Physics Reports.* 815 (25 June) (2019) 1–107.
4. **Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I.**, Crystal channeling and its application at high-energy accelerators, Springer, Berlin, Germany, 1997.
5. **Chesnokov Yu.A., Afonin A.G., Baranov V.T., et al.**, Modern success in channeling study and applications at the U-70 accelerator of IHEP, *Nuovo Cimento, C.* 034 (4) (2011) 407–415.
6. **Lambropoulos J.C., Xu S., Fang T., Golini D.**, Twyman effect mechanics in grinding and microgrinding, *Applied Optics.* 35 (28) (1996) 5704–5713.
7. **Bellucci S., Bini S., Biryukov V.M., et al.**, Experimental study for the feasibility of a crystalline undulator, *Physical Review Letters.* 90 (3) (2003) 034801.
8. **Baranov V.T., Bellucci S., Biryukov V.M., et al.**, First results of investigation of radiation from positrons in a crystalline undulator, *JETP Letters.* 82 (9) (2005) 562–564.
9. **Timoshenko S.P., Goodier J.N.**, Theory of elasticity, McGraw-Hill, New-York, 1951.
10. **Arkhipenko A.A., Afonin A.G., Baranov V.T., et al.**, Splitting of a 50-GeV proton beam by a slightly disturbing bent crystal, *Instruments and Experimental Techniques.* 52 (1 May) (2009) 155–158.
11. **Scandale W., Arduini G., Butcher M., et al.**, Deflection of high energy protons by multiple volume reflections in a modified multi-strip silicon deflector, *Nucl. Instrum. Meth. B.* 338 (1 November) (2014) 108–111.
12. **Kaloyan A.A., Tikhomirov S.A., Podurets K.M., et al.**, Study of the crystal device for deflecting high-energy proton beams using synchrotron radiation diffraction, *Crystallography Reports.* 62 (3) (2017) 370–373.
13. **Afonin A.G., Maishev V.A., Troyanov E.F., et al.**, Proton beam extraction from the IHEP accelerator using short silicon crystals, *Phys. Part. Nucl.* 36 (1) (2005) 21–54.
14. **Yazynin I.A., Maishev V.A., Chesnokov Yu.A.**, Use of a bent crystal with a decreasing curvature to increase the efficiency of the extraction and collimation of a beam in an accelerator, *JETP Letters.* 94 (3) (2011) 248–250.
15. **Maishev V.A.**, Programma dlya rascheta ondulyatornogo spektra fotonov [Programm for calculation of undulator photon spectra] <http://phpc01.ihep.su/~laba/chesn/Simulation%20of%20photon%20spectrum%20in%20undulator/>.
16. **Bellucci S., Maishev V.A.**, Calculations of intensity of radiation in crystal undulator, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B.* 252 (2) (2006) 339–346.

Received 26.03.2020, accepted 21.04.2020.

THE AUTHORS

MAISHEEV Vladimir A.

Institute for High Energy Physics named by A.A.Logunov of NRC «Kurchatov Institute»
1, Nauki Sq., Protvino of Moscow Reg., 142281, Russian Federation
maisheev@ihep.ru

SANDOMIRSKIY Yury E.

Institute for High Energy Physics named by A.A.Logunov of NRC «Kurchatov Institute»
1, Nauki Sq., Protvino of Moscow Reg., 142281, Russian Federation
Yury.Sandomirskiy@ihep.ru

CHESNOKOV Mikhail Yu.

Institute for High Energy Physics named by A.A.Logunov of NRC «Kurchatov Institute»
1, Nauki Sq., Protvino of Moscow Reg., 142281, Russian Federation
Michail.Chesnokov@ihep.ru

CHESNOKOV Yury A.

Institute for High Energy Physics named by A.A.Logunov of NRC «Kurchatov Institute»
1, Nauki Sq., Protvino of Moscow Reg., 142281, Russian Federation
chesnokov@ihep.ru

YANOVICH Andrey A.

Institute for High Energy Physics named by A.A.Logunov of NRC «Kurchatov Institute»
1, Nauki Sq., Protvino of Moscow Reg., 142281, Russian Federation
yanovich@ihep.ru