

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.663

ВЫВОД ПУЧКА ПРОТОНОВ ВАРЬИРУЕМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗ УСКОРИТЕЛЯ У-70 С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ

© 2025 г. С. Ф. Решетников^{а, *}, А. Г. Афонин^а, Е. В. Барнов^а, А. Н. Васильев^{а, b}, В. А. Маишеев^а,
В. В. Мочалов^{а, b}, П. А. Семенов^{а, b}, Ю. А. Чесноков^а

^аИнститут физики высоких энергий имени А.А. Логанова Национального
исследовательского центра “Курчатовский институт”, Протвино, Московская обл., 142281 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: Sergey.Reshetnikov@ihep.ru

Поступила в редакцию 06.05.2024 г.

После доработки 05.06.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Представлены результаты работ по управлению интенсивности пучка протонов, выводимого из ускорителя У-70 с помощью изогнутых монокристаллов кремния. Продемонстрирована устойчивая работа вывода пучка, с помощью кристаллов, для двух экспериментов, где требовалась плавная регулировка интенсивности пучка в большом динамическом диапазоне.

Ключевые слова: ускорительная техника, системы вывода, кристаллический дефлектор, каналирование частиц в кристаллах, варьированная интенсивность

DOI: 10.56304/S2079562924060307

ВВЕДЕНИЕ

Идеи использования каналирования частиц в изогнутых кристаллах для управления пучками проверены и развиты во многих ускорительных научных центрах, в том числе в Объединенном Институте Ядерных Исследований, Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН), включая Большой адронный коллайдер, ускоритель RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории и других (см. работы [1–10]). Наиболее широкое практическое применение этот метод нашел на ускорительном комплексе У-70 НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ [11–17], в котором кристаллы регулярно используются для вывода и формирования пучков для проведения экспериментов.

Аспекты физики каналирования в кристаллах подробно описаны в работе [15]. Кратко отметим, что эффективность отклонения частиц изогнутым кристаллом определяется отношением критического угла каналирования θ_c (для энергии 50 ГэВ $\theta_c = 30$ мкрад) к расходимости пучка ϕ и убывает экспоненциально с длиной кристалла L : $\text{Eff} \sim (\theta_c/\phi)\exp(-L/L_d)$, где характерный параметр L_d , называемый длиной деканалирования, линейно растет с энергией частиц и для протонов с энергией 50 ГэВ составляет 2.5 см в слабоизогнутом кристалле.

Ведущиеся на протяжении многих лет в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ на ускорителе У-70 исследования режима вывода заряженных частиц с помощью изогнутых кристаллов кремния существенно расширили возможности его применения. Выявлен ряд положительных особенностей вывода с помощью изогнутых кристаллов, среди них малый эмиттанс выведенного пучка и высокая стабильность параметров выведенного пучка. В работе [18] продемонстрированы характеристики выведенного пучка при использовании кристалла, изогнутого на 80 мрад, а именно: небольшой размер пучка (радиус по основанию менее 5 мм, угловая расходимость менее 0.5 мрад), импульсный разброс $\Delta p/p = \pm 0.1\%$, вклад фоновых частиц (не протонов) менее 0.03%. При помощи выведенного методом каналирования пучка протонов в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ получен ряд важных результатов по исследованию спиновых эффектов сильного взаимодействия [19–21].

Для ряда экспериментов является важным получение протонного пучка с варьированной интенсивностью. В частности, для эксперимента по изучению характеристик жидко-аргоновых детекторов [22], проводившемся на канале № 8 ускорительного комплекса У-70 было необходимо обеспечить пучок с интенсивностями в диапазоне 10^6 – 10^{11} част./цикл. Медленный вывод столь малой интенсивности не может обеспечить хорошую временную



Рис. 1. Кристаллический дефлектор “О-типа” (размеры: длина 5 мм, высота 5 мм, толщина 0.7 мм, угол изгиба 2 мрад.).

структуру в силу особенностей его динамики. Для первой очереди эксперимента СПАСЧАРМ (СПиновыеАСимметрии в рождении ЧАРМония) [23] на канале 14 [24] необходимо обеспечить еще более низкие интенсивности: от 10^4 до 10^7 час./цикл.

Применение кристаллических дефлекторов с возможностью плавной регулировки наводимого на кристалл пучка и ориентации кристалла по отношению к пучку позволяет решить эту задачу. В данной работе представлены данные о выводе пучка протонов варьированной интенсивности, при выводе с помощью изогнутых кристаллов кремния.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ НА УСКОРИТЕЛЕ У-70

Кристаллические дефлекторы, используемые для вывода заряженных частиц из ускорителя У-70, делятся на два типа. Первые имеют большую длину по пучку ($L > L_d$, около 70 мм) и большой изгиб (80 мрад), они способны отклонять заряженные частицы на большие углы, при этом фокусируя их, и без дополнительных магнитооптических элементов забрасывать их каналы транспортировки выведенных пучков. Эффективность таких кристаллических дефлекторов составляет порядка 10^{-4} из-за больших потерь в результате деканализирования и низкой кратности прохождения циркулирующего пучка через кристалл.

Вторые имеют небольшие размеры (длина по пучку 5 мм, т.е. $L \ll L_d$) и малый угол изгиба (2 мрад). При работе такие дефлекторы дают небольшое начальное отклонение частиц от циркулирующего пучка, достаточное для заброса в апертуру отклоняющих магнитов, и далее выводятся в каналы транспортировки выведенных пучков. Эффективность таких кристаллических дефлекторов на У-70 достигала рекордных 85% [17].

На ускорителе У-70 была продемонстрирована работа как длинных, так и коротких кристаллических дефлекторов в режиме быстро варьированной интенсивности выводимого пучка в большом динамическом диапазоне.

Вывод пучка в направлении канала № 8 для эксперимента [22] осуществлялся с помощью кристаллического дефлектора, установленного на станции кристаллических дефлекторов, смонтированной в начале 19 блока магнита У-70. На этой станции установлен короткий по пучку кристалл с малым углом изгиба (рис. 1). Такой кристалл впервые применялся в [4].

Наведение пучка на кристалл обеспечивалось системой локального искажения орбиты У-70, работавшей в режиме обратной связи по пучку с помощью изменения тока в дополнительных корректирующих обмотках магнитов У-70 (так называемых бампов). Для реализации этого способа наведения пучка на кристалл в элементы магнитной структуры ускорителя, отстоящие друг от друга по азимуту примерно на величину, кратную половине длины волны бетатронных колебаний, вводятся возмущения магнитного поля. В результате на данном участке азимута создается локальное искажение орбиты пучка. Изменяя амплитуду возмущения согласно сигналу обратной связи, поступающего с монитора вторичных частиц, можно осуществлять равномерное наведение пучка на кристалл. Сигнал обратной связи с монитора вторичных частиц (сцинтиллятор + ФЭУ), расположенного вблизи кристаллической станции, подается на вход источника питания бамповых обмоток. Рассмотренный способ наведения протонов на кристалл обеспечивает высокую равномерность выводимой интенсивности в течение всего времени вывода (до 2 с).

Рабочее положение кристалла в радиальной плоскости соответствовало координате +65 мм от равновесной орбиты. Кристалл работал в режиме каналирования с эффективностью около 50%. При малом угле отклонения (2 мрад) пучок невозможно вывести из ускорителя, поэтому дополнительно использовались несколько септум-магнитов (специальных магнитов с тонкой токовой перегородкой). Схема вывода с помощью кристалла, установленного в 19 блоке У-70, представлена на рис. 2.

Для вывода пучка в направлении канала № 14, для эксперимента [24] использовалась кристаллическая станция, смонтированная в начале 25 блока У-70. Кристаллический дефлектор имеет размер 70 мм по пучку, угол изгиба 80 мрад (рис. 3). По сравнению с предыдущими версиями конструкции (как в [13]) данное кристаллическое устройство обеспечивает пучок малого эмиттанта не только в горизонтальной плоскости (достигаемой за счет малости критического угла каналирования), но и

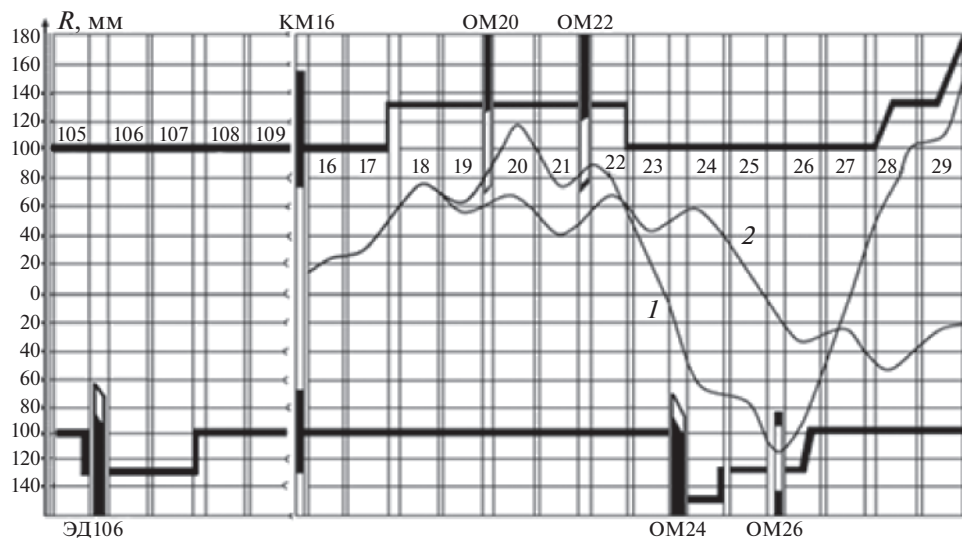


Рис. 2. Схема вывода в режиме медленного вывода с помощью изогнутого кристалла. 1 – Трасса пучка в режиме медленного вывода с помощью кристалла; 2 – форма локального искажения орбиты; ЭД106 – электростатический дефлектор; КМ16 – кикер-магнит; ОМ20, ОМ22, ОМ24, ОМ26 – септум-магниты; 16–29, 105–109 – номера блоков магнита У-70.

в вертикальной плоскости благодаря малому вертикальному размеру кристаллической пластины.

Рабочая координата кристалла составляла 45 мм от равновесной орбиты. Наведение пучка на кристалл обеспечивалось комбинацией двух бампов. Бамп 20/26 работал в режиме обратной связи по пучку, сигнал обратной связи поступал от монитора обратной связи (ФЭУ-93), расположенного вблизи магнитного блока № 25 У-70. Бамп 23/29 работал в режиме “подставки” с фиксированным током. Задачей такого бампа является подведение циркулирующего пучка близко к поверхности кристалла до начала вывода. Такая схема формирования локального искажения орбиты обеспечивает необходимое отклонение пучка в районе блока № 25 и не создает “узких” мест в других точках азимута ускорителя. Кристаллический дефлектор работал в режиме каналирования с эффективностью порядка 10^{-4} . Выведенный пучок забрасывался напрямую в апертуру канала № 14 для эксперимента СПАСЧАРМ.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫВОДА ПУЧКОВ ВАРЬИРУЕМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В эксперименте [22], проводившимся при выводе пучка в направлении канала № 8, было важно добиться не просто большого диапазона по выводимой интенсивности на исследуемый детектор, но и обеспечить быстрое изменение интенсивности пучка.

Для быстрого изменения интенсивности выводимого пучка менялось высокое напряжение

на мониторе пучка (ФЭУ-93), сигнал с которого заведен в канал обратной связи системы управления бампа 16/22 (цифры в этом обозначении бампа соответствуют номерам магнитных блоков У-70). При этом другие параметры бампа, а именно: ток опоры, максимальный ток бампа и коэффициент обратной связи оставались фиксированными.

На рис. 4 представлена зависимость интенсивности выведенного пучка от высокого напряжения в фотоэлектронном умножителе монитора обратной связи.

Для быстрого изменения интенсивности выводимого пучка использовалась также расстройка угла ориентации кристалла (рис. 5), которая осуществлялась с помощью гониометрического устройства, работающего в условиях вакуума

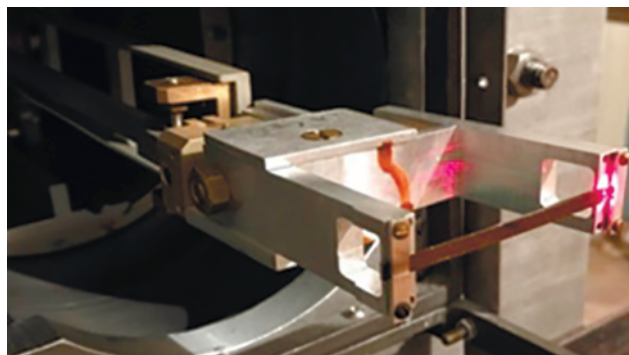


Рис. 3. Кристаллический дефлектор на кристаллической станции в 25 блоке У-70.

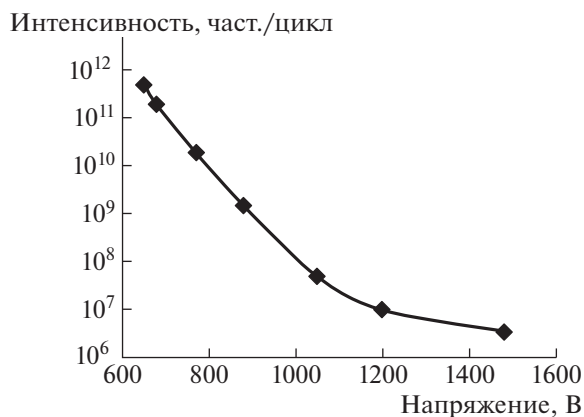


Рис. 4. Интенсивность выведенного в канал № 8 пучка в зависимости от напряжения монитора обратной связи.

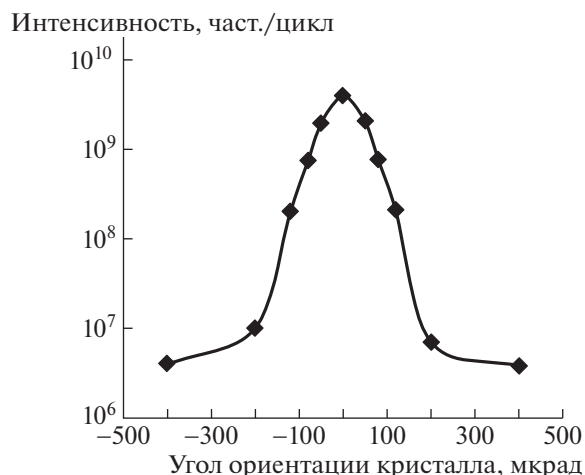


Рис. 5. Интенсивность выведенного в канал № 8 пучка в зависимости от угла ориентации кристалла.

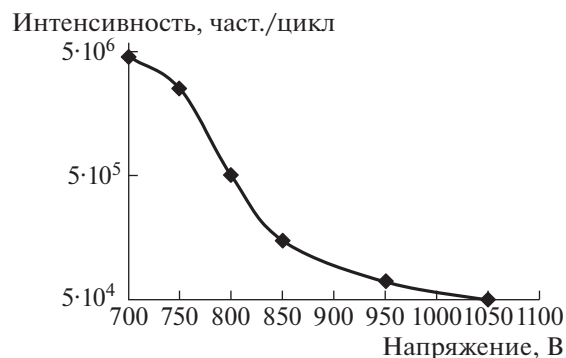


Рис. 6. Интенсивность выведенного в канал № 14 пучка в зависимости от напряжения монитора обратной связи.

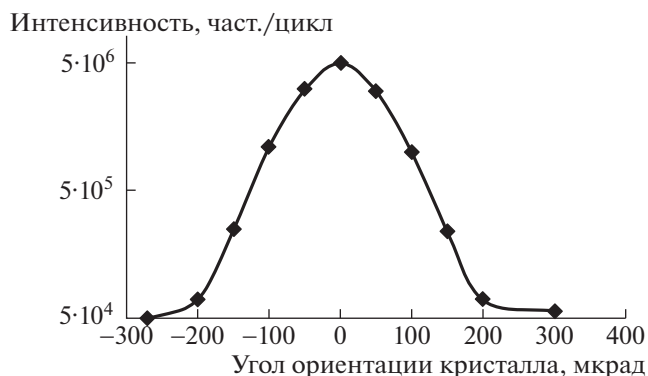


Рис. 7. Интенсивность выведенного в канал № 14 пучка в зависимости от угла ориентации кристалла.

ускорителя. Интенсивность выведенного кристаллом пучка измерялась аппаратурой экспериментальной установки. Для малых нагрузок использовались сцинтилляционные счетчики в счетном режиме, при высокой интенсивности применялись черенковские счетчики, работающие в аналоговом режиме [22].

Исследование спиновых эффектов [23] на экспериментальной установке СПАСЧАРМ [25] требует возможность варьировать интенсивность пучка на мишени установки в зависимости от условий набора. Для набора физических данных при длительности вывода около 3 с необходимо обеспечить максимальную (до $5 \cdot 10^6$ прот./цикл), в то время как при короткой длительности вывода (0.2–0.3 с) и настройке детекторов интенсивность более $5 \cdot 10^4$ прот./цикл может привести к ухудшению характеристик детекторов и наложению событий. Таким образом, требуется обеспечить стабильность и возможность варьировать интенсив-

ность пучка на два порядка. Дополнительной трудностью обеспечить контроль за качеством и положением пучка является его низкая для диагностического оборудования интенсивность.

Для оперативного изменения интенсивности выводимого пучка в заданном диапазоне ($5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^6$) част./цикл, менялось напряжение на мониторе пучка, сигнал с которого заведен в канал обратной связи системы управления бампа 20/26.

На рис. 6 показана зависимость выводимой интенсивности от высокого напряжения на фотоэлектронном умножителе монитора обратной связи.

Для быстрого изменения интенсивности выводимого пучка использовалась также расстройка угла ориентации кристалла (рис. 7).

Окончательным результатом, позволяющим оценить качество вывода пучка, являются его характеристики на мишени экспериментальной установки. Для определения интенсивности и профиля пучка использовался специально разработан-

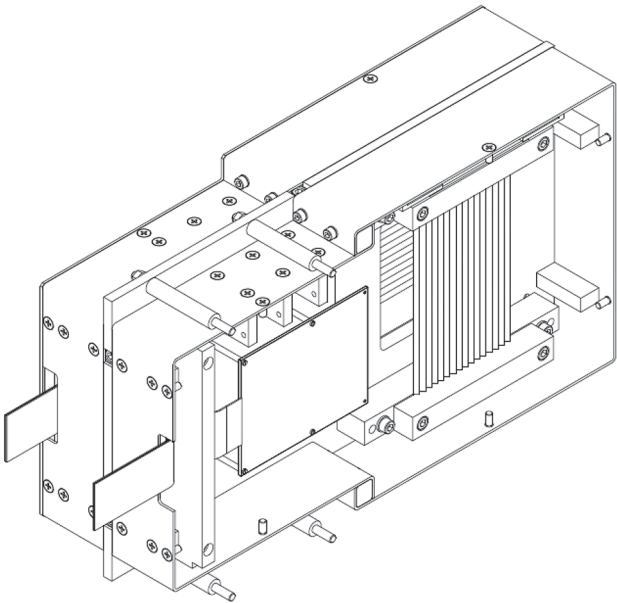


Рис. 8. Схема механической конструкции профилометра.

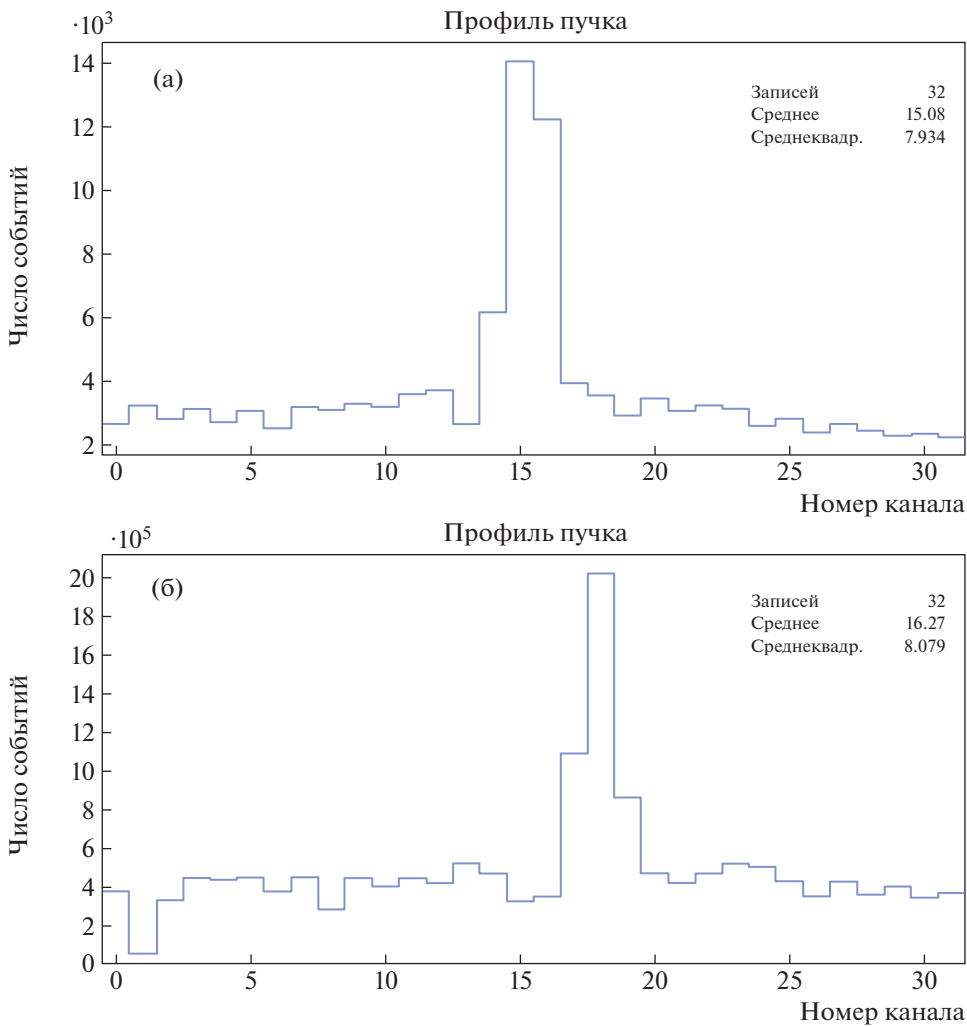


Рис. 9. Профили пучка по оси X в канале № 14 при различной интенсивности выведенного пучка (а) $5 \cdot 10^4$ частиц; (б) $2.5 \cdot 10^6$ частиц.

ный детектор-профилометр пучка, размещенный на торце мишени эксперимента и работающий в интегральном режиме. На рис. 8 показан чертеж механической конструкции профилометра.

Размер каждой сцинтилляционной палочки был выбран по размеру регистрирующего элемента — кремниевому фото умножителю (размер фотодетектора $3.4 \times 3.4 \text{ мм}^2$). Два соседних элемента плотно прижаты друг к другу специальными элементами.

К каждой из плат подключены 32 канала, по которым поступают LVDS-сигналы от усилителей дискриминаторов одной из плоскостей профилометра. Для организации интерфейса к фотодетекторам в схеме использован ПЛИС Xilinx серии Spartan6 XC6SLX16. Ресурсы данного ПЛИС позволяют легко организовать 32 счетчика глубины до 32-х бит для эффективной регистрации сигналов с фотодетектора с интенсивностью пучка до 10^7 частиц за сброс.

На рис. 9 показаны профили пучка на мишени экспериментальной установки СПАСЧАРМ при разной интенсивности пучка. Видно, что форма профиля и положение пучка слабо меняются во всем динамическом диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность устойчивого вывода пучков для двух экспериментов, в которых требовалась плавная регулировка интенсивности в большом динамическом диапазоне.

Разработанные методы позволяют варьировать интенсивность пучка в больших пределах без изменения других параметров пучка, наводимого на кристалл. Для кристалла с малым углом изгиба (2 мрад) интенсивность пучка можно варьировать в пределах почти пяти порядков. Достигнут диапазон интенсивности в интервале от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^{11}$ прот./цикл. Это позволило провести исследование характеристик жидко-аргонового детектора.

Для кристалла с большим (около 80 мрад) углом изгиба интенсивность пучка можно уменьшить с $4 \cdot 10^6$ до менее $2 \cdot 10^4$ част./цикл ускорителя, что позволяет проводить экспериментальные исследования спиновых эффектов на установке СПАСЧАРМ при различных условиях проведения набора данных.

Следует отметить, что установленный радиационный предел для кристаллов на циркулирующем пучке составляет $\approx 10^{20}$ прот./см² [16]. Это соответствует нескольким месяцам непрерывной работы без замены для короткого кристалла и несколькими годами работы для длинного кристалла.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа по организации вывода на установку СПАСЧАРМ на канале 14, включая изготовление профилометра пучка, выполнена в “Курчатовский институт”-ИФВЭ, при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 22-12-00164).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Tsyganov E.N.* // Estimates of Cooling and Bending Processes for Charged Particle Penetration through a Mono Crystal. 1976. Fermilab, Batavia. Preprint TM-682, TM-684.
2. *Elishev A.F. et al.* // Phys. Lett. B. 1979. V. 88. P. 387.
3. *Avdeichikov V.V., Buldakovskii V.N., Buchkiv A.V., et al.* Accelerated Beam Extraction by Means of a Bent Single Crystal at the JINR Synchrophasotron. 1986. Fermilab. Tech. Rep. FN-0429.
4. *Scandale W., Afonin A.G., Chesnokov Y.A., et al.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2002. V. 37. P. 2230004.
5. *Filler III R.P., Dress A., Gassner D., et al.* // Phys. Rev. ST. Accel. Beams. 2006. V. 9 (1). P. 013501.
6. *Mokhov N.V., Annala G.E., Apyan A., et al.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2010. V. 25. P. 172.
7. *Scandale W., Arduini G., Assman R., et al.* // Phys. Lett. B. 2010. V. 692. P. 78.
8. *Scandale W., Arduini G., Butcher M., et al.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 758. P. 129.
9. *Scandale W., Taratin A.M.* // Phys. Rep. 2019. V. 815. P. 1.
10. *Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M., et al.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 094802.
11. *Biryukov V.M., Kotov V.I., Chesnokov Y.A.* // Phys. Usp. 1994. V. 37 (10). P. 937–960.
12. *Biryukov V.M., Chesnokov Y.A., Kotov V.I.* Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators. 1997. Berlin: Springer.
13. *Aseev A.A., Bavizhev M.D., Ludmirsky E.A., et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1991. V. 309. P. 1.
14. *Афонин А.Г., Бирюков В.М., Гаврилушкин В.А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67 (10). С. 741–745.
15. *Афонин А.Г., Баранов В.Т., Бирюков В.М. и др.* // Физика элемент. част. и атом. ядра. 2005. Т. 36 (1). С. 42–99.
16. *Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., et al.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2018. V. 33. P. 23.
17. *Kotov V.I., Afonin A.G., Biryukov V.M., et al.* // Phys. At. Nucl. 2005. V. 68. P. 1025.
18. *Mochalov V.V. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2010. V. 53. P. 621.
19. *Vasilev A.N. et al.* // Phys. At. Nucl. 2004. V. 67. P. 1487.
20. *Vasilev A.N. et al.* // Phys. At. Nucl. 2005. V. 68. P. 1790.
21. *Abramov V.V. et al.* // Phys. At. Nucl. 2014. V. 77. P. 595.
22. *Glatte A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2012. V. 669. P. 47.
23. *Abramov V.V. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54 (1). P. 69.
24. *Abramov V.V. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012096.
25. *Semenov P.A.* // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 86 (5). P. 817.

Extraction of a Proton Beam of a Variable Intensity From the U-70 Accelerator Using Bent Crystals

S. F. Reshetnikov^{1, *}, A. G. Afonin¹, E. V. Barnov¹, A. N. Vasiliev^{1, 2}, V. A. Maisheev¹,
V. V. Mochalov^{1, 2}, P. A. Semenov^{1, 2}, and Yu. A. Chesnokov¹

¹ Logunov Institute of High Energy Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: Sergey.Reshetnikov@ihep.ru

Received May 6, 2024; revised June 5, 2024; accepted June 10, 2024

Abstract—The results on the extraction of a proton beam of a varying intensity from the U-70 accelerator using bent silicon single crystals are presented. Stable beam extraction using crystals has been demonstrated for two experiments where smooth adjustment of the beam intensity over a large dynamic range has been required.

Keywords: accelerator machinery, ejection systems, crystal deflector, particle channeling in crystals, variable intensity