

Исследования режима интенсивного вывода пучка протонов изогнутым кристаллом при одновременной работе с внутренними мишенями на ускорителе У-70 ИФВЭ

А.Г. Афонин, В.М. Бирюков, Н.А. Галяев, В.Н. Гресь, В.Н. Запольский, Б.А. Зеленов,
В.И. Котов, В.А. Маишеев, В.А. Медведев, А.В. Минченко, В.И. Терехов,
Е.Ф. Троянов, Ю.С. Федотов, Ю.А. Чесноков
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Ю.М. Иванов

ПИАФ, Санкт-Петербург, Россия

В. Скандале

ЦЕРН, Швейцария, Женева

Введение. Ведущиеся на протяжении ряда лет в ИФВЭ исследования вывода пучка протонов с помощью изогнутых кристаллов кремния [1–5] существенно расширили возможности его применения для постановки физических экспериментов. Был осуществлен многооборотный вывод с помощью коротких О-образных кристаллов длиной по пучку 3–5 мм и углами изгиба 0.5 – 2.3 мрад. Получена максимальная эффективность вывода $\sim 65\%$ при использовании кристаллов длиной 3 мм с углом изгиба 0.9 мрад. Для кристалла длиной 5 мм и углом изгиба ~ 1.7 мрад эффективность вывода составляла $\sim 42\%$. Интенсивность выведенного пучка достигала 6×10^{11} протонов в цикле. Эти результаты обеспечили реализацию новых режимов вывода, повышающих эффективность использования ускорителя.

1. Описание режима. Основой для создания нового режима явилась схема вывода протонного пучка из У-70, использовавшаяся ранее для методических исследований [1–4]. Кристалл кремния длиной 5 мм и углом изгиба 1.7 мрад размещался в прямолинейном промежутке №19 ускорителя перед цепочкой отклоняющих магнитов системы медленного вывода. Часть наведенного на кристалл пучка захватывалась в процессе каналирования и, получив в кристалле угол 1.7 мрад, перебрасывалась через перегородку первого септум-магнита. Такая схема вывода дала возможность реализовать наведение пучка на кристалл и его вывод одновременно с работой двух внутренних мишеней. Одной из проблем было создание необходимого локального искажения орбиты, обеспечившего наведение пучка на кристалл в пп 19 (он устанавливался на координату ~ 65 мм от равновесной орбиты) и на внутренние мишени 24- и 27-го блоков. Координаты внутренних мишеней были равны соответственно +35 и -35 мм.

На рис. 1 изображены форма локального искажения орбиты (кривая 1) для одновременной работы кристалла и внутренних мишеней, а также трасса выводимого пучка протонов (кривая 2). Здесь схематически изображен участок периметра ускорителя У-70, на котором расположена часть оборудования вывода и в конце которого происходит вывод пучка из кольцевой камеры. Горизонтальный ряд цифр представляет собой последовательность боков электромагнита У-70 в принятой нумерации. Всего кольцевой электромагнит состоит из 120 блоков. Нижние обозначения (ОМ-18, ОМ-20, ОМ-22, ОМ-24, ОМ-26) указывают на отклоняющие септум-магниты систем вывода, которые располагаются в свободных прямолинейных промежутках перед соответствующим магнитным блоком. Вертикальный ряд чисел обозначает расстояние от равновесной орбиты в миллиметрах. Само положение равновесной орбиты принято за ноль.

Наведение пучка на кристалл и внутренние мишени, а также поддержание равномерности сброса обеспечивались тремя штатными системами обратной связи на основе ФЭУ. Конфигурация системы локального искажения орбиты включала в себя три пары блоков У-70, работающих с обратной связью по пучку, и две пары блоков, работающих в режиме постоянного

тока. Контроль за величиной сбросов пучка на кристалл и мишени обеспечивался соответствующими интегральными мониторами. Контроль за параметрами выводимого протонного пучка осуществлялся с помощью комплексной системы диагностики пучка [1, 2], которая была дополнена новыми средствами непрерывного контроля за высокими напряжениями на ФЭУ мониторов обратной связи и интегральных мониторов, а также за показаниями интегральных мониторов.

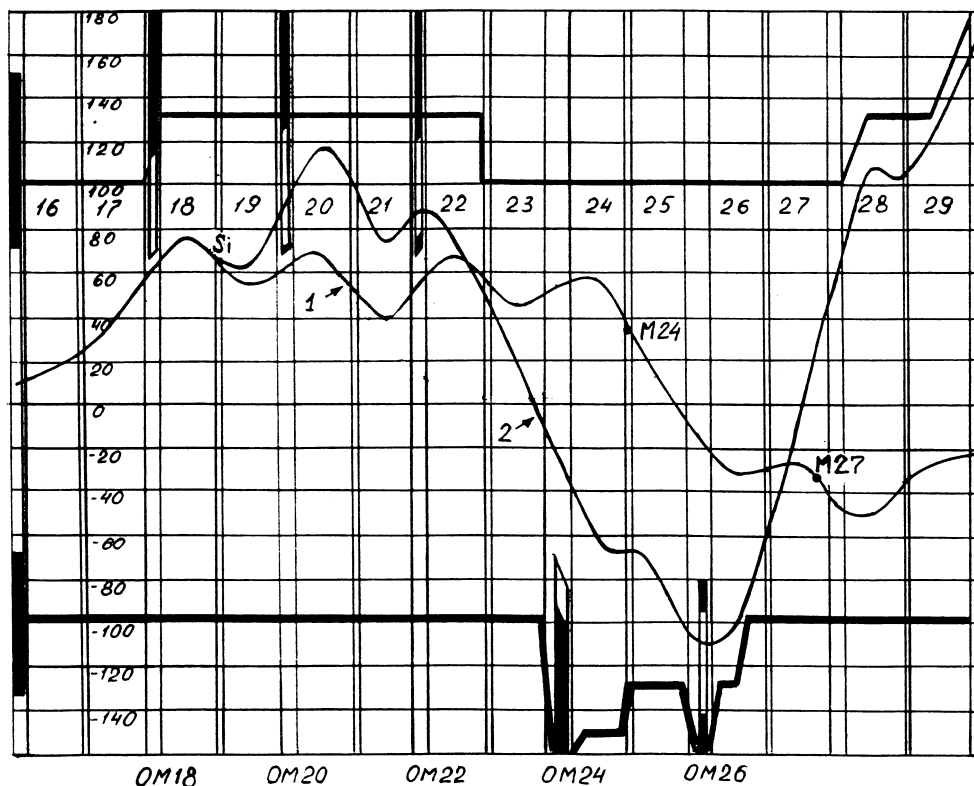


Рис. 1: Схема вывода пучка: 1 — локальное искажение орбиты в режиме одновременной работы кристалла и внутренних мишеней; 2 — трасса выводимого протонного пучка.

Эффективность использования выведенного пучка протонов экспериментальной установкой во многом зависит от стабильности поддержания положения пучка на внешней мишени и стабильности его размеров. Как показывает эксперимент, в нашем случае основными причинами, определяющими эти параметры, являются изменения в цикле токов всех систем, обеспечивающих наведение пучка на кристалл и внутренние мишени, и нестабильность этих токов от цикла к циклу. Экспериментально показано, что в стабильном режиме работы ускорителя регулярные изменения токов всех систем наведения приводят к почти двукратному увеличению размеров пучка на внешней мишени и смещению центра тяжести пучка в процессе вывода. Этот эффект может быть существенно уменьшен за счет программирования изменения токов в септум-магнитах в течение цикла. Эта методика успешно используется для устранения подобного эффекта при медленном резонансном выводе [6].

Увеличив перед вторым сеансом угол изгиба кристалла с ~ 1.7 до ~ 2.3 мрад, нам удалось отодвинуть кристалл от септум-магнитов OM-18 и OM-20 и уменьшить потери рассеянного пучка на септумах. Увеличение угла изгиба кристалла с ~ 1.7 мрад до ~ 2.3 мрад дало возможность также увеличить зазор между перегородкой OM-20 и заброшенным в апертуру каналированным пучком. Во время проведения двух сеансов был набран большой объем информации, позволивший сделать ряд выводов, касающихся характеристик работы У-70 и режима работы кристалла (см. табл. 1).

Таблица 1: Основные параметры режима.

	2-й сеанс 1999 г.	1-й сеанс 2000 г.
Средняя интенсивность ускоренного пучка, прот./цикл	3.0×10^{12}	2.5×10^{12}
Средняя использованная интенсивность, прот./цикл	2.8×10^{12}	2.2×10^{12}
Угол изгиба кристалла, мрад	1.7	2.3
Средняя выведенная интенсивность, прот./цикл	3.0×10^{11}	4.5×10^{11}

При сохранении режимов работы внутренних мишеней удалось снизить интенсивность ускоренного пучка до $\sim 2.5 \times 10^{12}$ прот./цикл, подняв при этом интенсивность выведенного протонного пучка до $(4.5-5.0) \times 10^{11}$ протонов в цикл. Измеренная эффективность вывода находилась на уровне $\sim (45 \pm 5)\%$. Экспериментальная установка, для которой был реализован новый режим, занимается исследованием распадов K^\pm -мезонов. Поскольку выходы K^+ -мезонов существенно выше, чем K^- -мезонов, то при смене режимов необходимо пропорционально уменьшать интенсивность выведенного протонного пучка. Для обеспечения такого изменения выводимой интенсивности использовалась методика изменения рабочего напряжения на ФЭУ, который отвечал за наведение на кристалл.

На рис. 2 представлены зависимости различных параметров режима от напряжения на ФЭУ. Из этого рисунка отчетливо видно, что имеется хорошее соответствие между изменением интенсивности вторичных частиц на экспериментальной установке (I_{23}) и показаниями интегрального монитора (S_{19}), контролирующего величину сброса пучка протонов на кристалл. При этом показания интегральных мониторов, контролирующих наведение на внутренние мишени, практически не менялись. Заметим, что потребление интенсивности ускоренного протонного пучка при работе с K^+ мезонами было значительно ниже ($1.1 \times 10^{12} - 1.2 \times 10^{12}$) прот./цикл, чем при работе с K^- мезонами и в основном определялось работой внутренних мишеней (рис. 2).

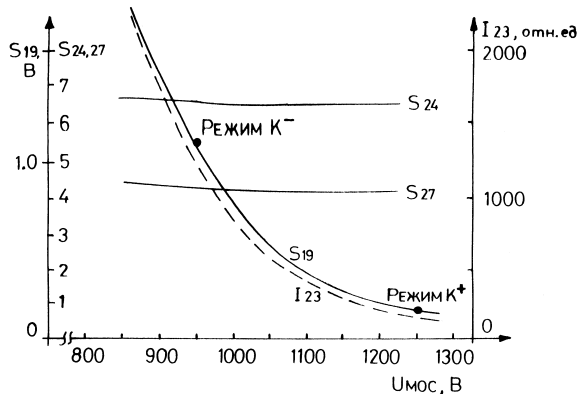


Рис. 2: Зависимость параметров одновременно (параллельного) режима от напряжения ФЭУ, обеспечивающего наведение на кристалл.

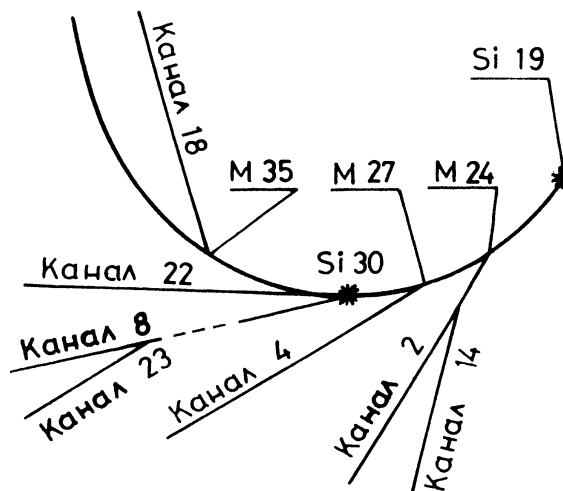


Рис. 3: Схема вывода пучков из У-70 с использованием изогнутых кристаллов.

После получения стабильного режима работы на трассу выведенного пучка в прямолинейном промежутке № 30 ускорителя вводился еще один, изогнутый на угол 9 мрад, кристалл, отклоняющий малую долю выведенного пучка ($\sim 10^7$ протонов в цикл) на еще одну экспериментальную установку, размещенную на канале № 22. В результате введения такого режима удалось увеличить количество одновременно работающих экспериментальных установок на плоской части магнитного цикла (рис. 3) до 5. Как известно, одним из важнейших параметров выводимых пучков является временная структура. В предложенном режиме временная структура устраивала все одновременно работающие экспериментальные установки. Осциллограммы токов соответствующих мониторов представлены на рис. 4. Эффективное время вывода при такой работе достигало 98%.

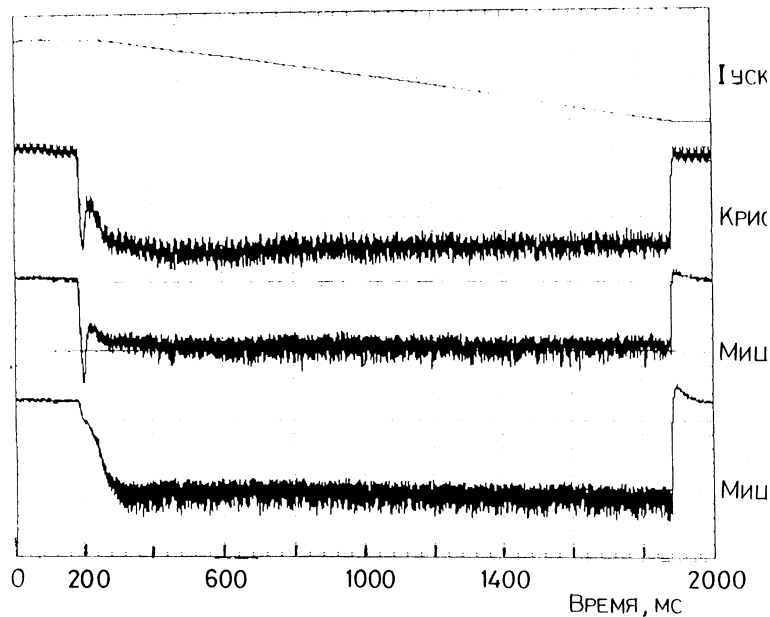


Рис. 4: Осциллограммы токов мониторов, обеспечивающих наведение на кристалл и внутренние мишени (24 и 27).

Заключение. Разработанная схема одновременного вывода протонов с помощью изогнутого кристалла и внутренних мишеней обеспечила вывод пучка протонов в диапазоне от 1.0×10^{10} до 6.0×10^{11} протонов за цикл с эффективностью $\sim 45\%$. К настоящему времени в таком режиме проведены два физических сеанса на установке комплекса меченых нейтрино общей продолжительностью свыше 1200 часов. В каждом из этих сеансов на кристаллы сброшено до 1.0×10^{20} протонов/см². При этом не зафиксировано ухудшения каналирующих свойств кристалла.

Характеристики пучка удовлетворяют физиков-экспериментаторов по совокупности параметров — интенсивности, длительности, качеству пучка. Тем не менее, ведутся дальнейшие работы по усовершенствованию режима. Они связаны с модернизацией систем локального искажения орбиты, внедрением новых приборов диагностики пучка, использованием современных средств автоматического управления. Продолжаются работы по дальнейшей оптимизации параметров кристаллов. Они направлены на дальнейшее уменьшение длины рабочей части кристалла. Здесь исследуются новые технологии изготовления кристаллов, такие как выращивание изогнутых кристаллов [7] и создание новой методики изгиба коротких кристаллов, выполненных в виде полосок.

Список литературы

- [1] А.Г. Афонин, В.М. Бирюков, В.А. Гаврилушкин и др. Письма в ЖЭТФ, 1998, т. 67, вып. 10, с. 741.
- [2] А.Г. Афонин, В.М. Бирюков, В.А. Гаврилушкин и др. Письма в ЖЭТФ, 1998, т. 67, вып. 10, с. 741.
- [3] A.G. Afonin, A.A. Arkhipenko, V.I. Varanov et al. Phys. Lett. B 435, p. 240, 1998.
- [4] А.А. Архипенко, А.Г. Афонин, В.М. Бирюков и др. ПТЭ №1, с.16, 2000.
- [5] V.I. Kotov, A.G. Afonin, V.M. Biryukov et al. Proceed. of EPAC, 2000.
- [6] А.Г. Афонин, А.В. Максимов, С.В. Соколов. – Труды XV Совещания по ускорителям, Протвино, 1996. т. 2, с. 301.
- [7] M.V.H. Breese. NIM B 132, p. 540, 1997.