

# Управление протонным пучком и измерение его характеристик в экспериментах по высокоэффективному выводу с помощью изогнутых монокристаллов

А.А.Архипенко, А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин,  
В.Н.Гресь, Б.А.Зеленов, В.И.Котов, А.В.Минченко,  
В.Н.Терехов, Е.Ф.Троянов, Ю.А.Чесноков  
*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

## Введение

В течение 1997/98 гг. на ускорителе У-70 ИФВЭ были проведены эксперименты по высокоэффективному выводу протонного пучка с использованием изогнутых монокристаллов. Анализ накопленного экспериментального материала показал, что можно добиться существенного увеличения эффективности вывода, обеспечив режим многократного прохождения пучка через кристалл. С этой целью в ИФВЭ были проведены эксперименты с короткими изогнутыми монокристаллами длиной  $5 \div 7$  мм с углами изгиба  $1, 5 \div 1, 7$  мрад. Как сообщалось в [1],[2], нами были получены рекордные величины эффективности вывода и интенсивности вывода. Так, пиковые значения эффективности достигали  $(47 \pm 3)\%$ , а максимальная величина средней эффективности равнялась  $(42 \pm 2)\%$  для 23% забираемой ускоренной интенсивности. Максимальная величина выведенной интенсивности достигала  $6 \cdot 10^{11}$  протонов в цикле.

## 1. Схема эксперимента

Задача достижения максимальных величин эффективности вывода требовала тщательного подхода к выбору характеристик кристалла. В частности, было необходимо минимизировать угол изгиба кристалла. Однако использование кристалла, изогнутого на малые углы, делает проблему вывода пучка из ускорителя весьма сложной. Так, для ускорителя У-70 углы в 1,5 и 1,7 мрад недостаточны для прямого вывода пучка. Нами было найдено решение, позволившее использовать существующую схему медленного вывода, при этом надежно зафиксировать, что выводимый пучок является каналированным, т.е. действительно отклоненным изогнутым кристаллом.

Схема эксперимента представлена на рис.1. Особенностью схемы является расположение станции с кристаллом в прямолинейном промежутке 19 ускорителя между отклоняющими магнитами ОМ-18 и ОМ-20 системы медленного вывода. Для подведения пучка к кристаллу использовалась система локального искажения орбиты, создаваемая двумя парами блоков ускорителя, а именно 15/21 и 16/22 (так называемые “полуволновые” бампы). Такое решение объясняется двумя причинами:

- необходимостью получать достаточное смещение пучка на азимуте кристалла;
- необходимостью “удерживать” циркулирующий пучок на некотором расстоянии от септум-магнитов ОМ-18 и ОМ-20, чтобы избежать прямого взаимодействия пучка с их перегородками.

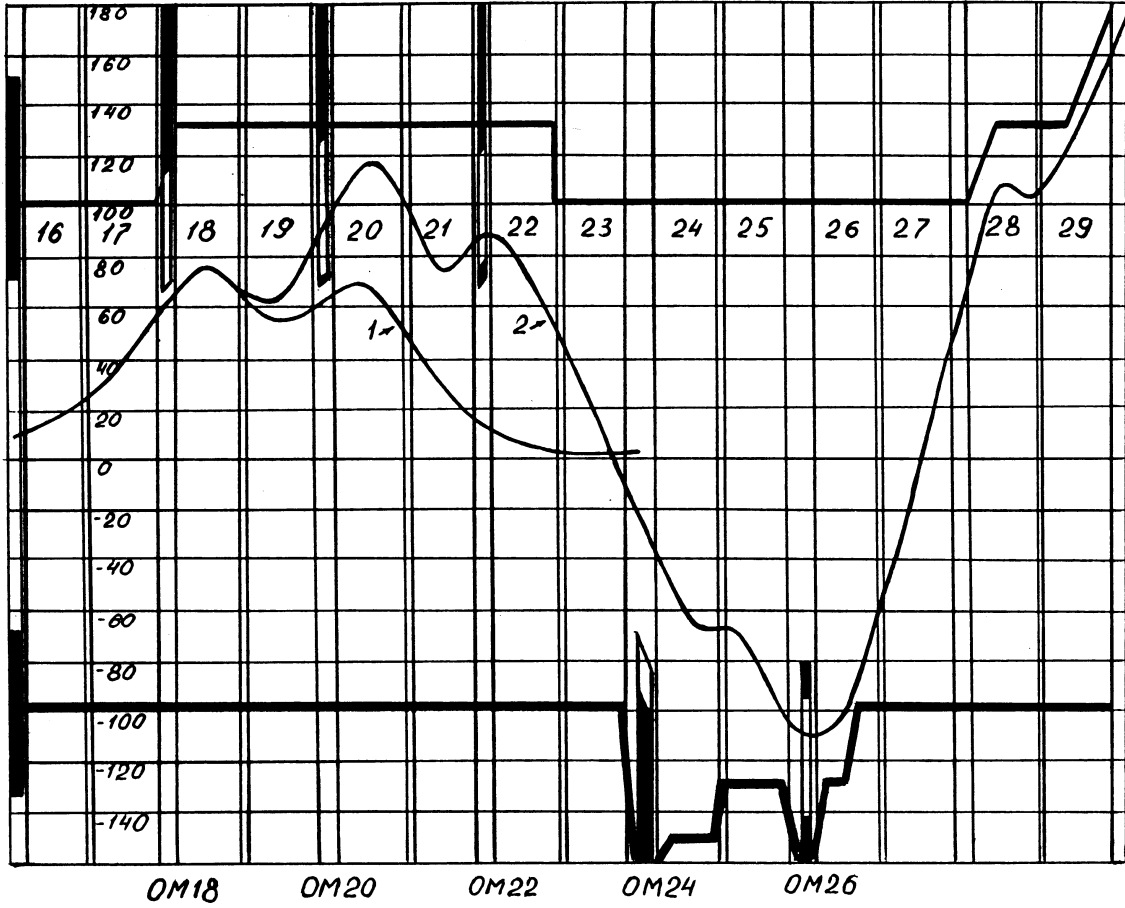


Рис. 1: Схема эксперимента: 1 — локальное искажение орбиты; 2 — трасса вывода.

Примененная нами схема локального искажения орбиты использовалась ранее [3] и оказалась удовлетворяющей нашим экспериментам. На рис.2 представлены некоторые комбинации токов для наведения на нужные координаты кристалла в пп. 19.

Для проведения экспериментов были созданы две станции для установки на них кристаллов. Они обладают дистанционными механизмами управления и обеспечивают перемещение кристалла по координате и углу с точностью установки на требуемую координату 0.1 мм и точностью углового перемещения 13.5 мкрад. Перед установкой станции на ускоритель проводились тщательные предварительные юстировки самого кристалла и станции с использованием лазерной техники. Трассировка отклоненного в апертуру септума магнита OM-20 с помощью кристалла пучка и оптимизация режимов не представляла сколько-нибудь сложной задачи и обеспечивалась штатными системами питания оборудования медленного вывода.

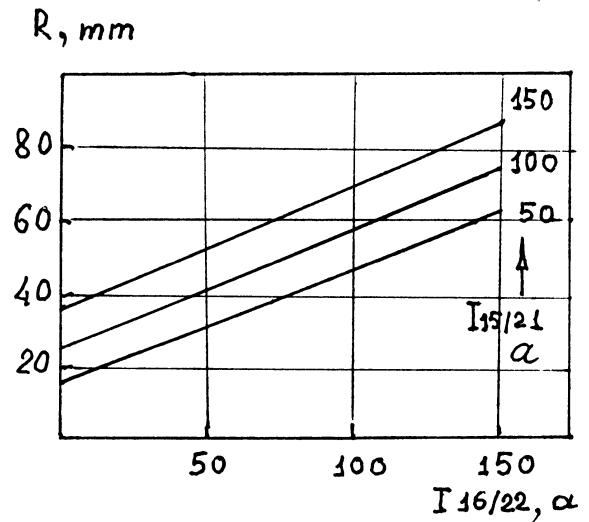


Рис. 2: Выбор режимов бампов.

## 2. Системы диагностики пучка

Принципиальной проблемой проведения экспериментов являлось детектирование пучка и измерение его характеристик. При проведении экспериментов использовался широкий набор приборов диагностики пучка, позволяющий измерять эффективность вывода с точностью около 4%. Отметим прежде всего разветвленную систему телевизионного контроля. Детекторами пучка для нее являются вводимые под пучок люминофорные экраны, расположенные как в непосредственной близости от кристалла, так и вдоль всей трассы вывода. В качестве люминофора используются как традиционный сернистый цинк, так и пластинки окиси алюминия, активированного хромом. Такие люминофоры обладают высокой чувствительностью ( $\sim 2 \cdot 10^6$  протонов/см<sup>2</sup>) и высокой радиационной стойкостью ( $1 \cdot 10^{18} \div 1 \cdot 10^{19}$  протонов/см<sup>2</sup>) [4].

На рис.3 представлены изображения циркулирующего пучка при наведении на кристалл и каналированного пучка, отклоненного в апертуру септум-магнита ОМ-20.

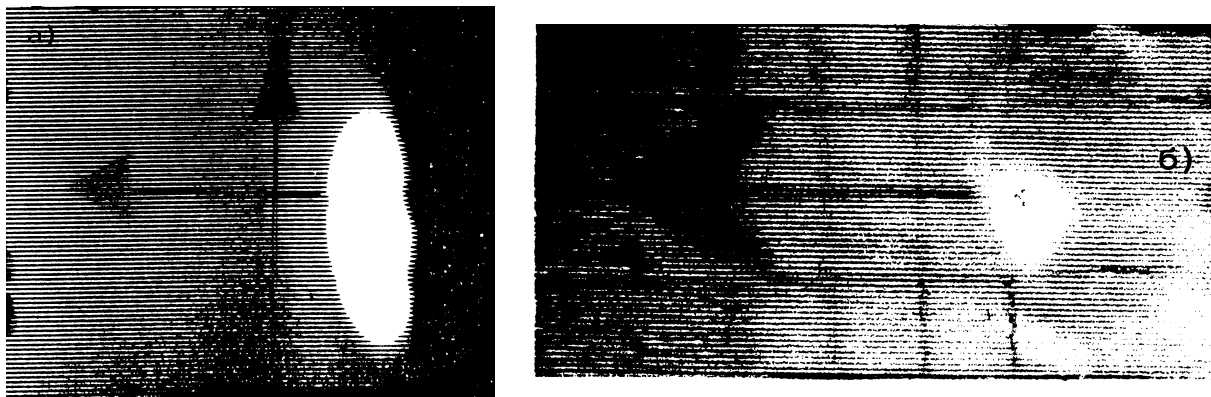


Рис. 3: Изображения пучка: а — подведенного к монокристаллу; б — каналированного пучка.

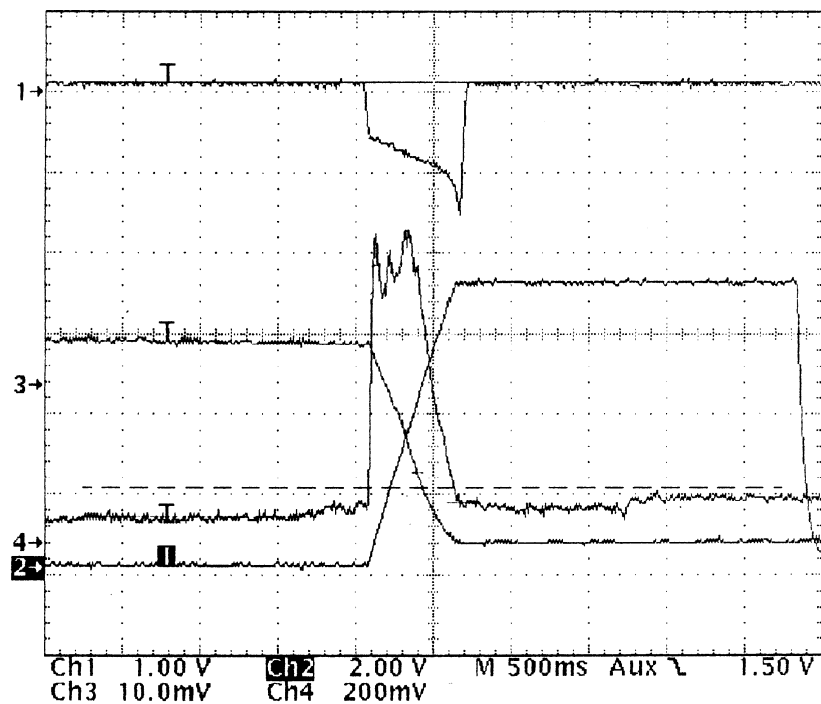


Рис. 4: Характерные процессы эксперимента: 1 — ток бампа; 2 — сигнал интегратора; 3 — интенсивность ускоренного пучка; 4 — интенсивность каналированного пучка.

Для контроля взаимодействия пучка с элементами трассы вывода использовалась комплексная система измерения потерь на основе ФЭУ [5], а также ионизационные камеры. Измерение выведенной интенсивности в процессе экспериментов осуществлялось с помощью специальной камеры вторичной эмиссии, расположенной непосредственно в вакуумной камере ускорителя в районе выходного окна. Особенности этого прибора являются широкий диапазон измерения интенсивности выводимого пучка и малое количество вещества на пути пучка ( $1 \cdot 10^8 \div 1.5 \cdot 10^{13}$  протонов и  $10 \text{ мг/см}^2$ ). Описание камеры можно найти в [6]. Для одновременного наблюдения и измерения совокупности сигналов мы использовали цифровые осциллографы ТЕКТРОНИХ. Одна из типичных картинок экрана осциллографа, на которой зафиксированы характерные процессы эксперимента, представлена на рис.4.

### 3. Система наведения

Для обеспечения режима равномерного наведения пучка на кристалл нами использовались две методики. Первая из них заключалась в использовании режима программирования во времени тока в одной из пар блоков системы локального искажения орбиты. Вторая основывалась на использовании монитора обратной связи.

Монитор представляет из себя фотоумножитель типа ФЭУ-93 со сцинтилятором. Он располагается после кристалла на расстоянии около 10 м от него на уровне орбиты. Сигнал с монитора через катодный повторитель подается на источник питания системы локального искажения орбиты, находящийся на расстоянии около 400 м от монитора, а также на пульт систем вывода для контроля и измерений. Величина сигнала с монитора выбрана в районе 30 В и определяется величиной высокого напряжения ФЭУ, которая меняется в диапазоне  $700 \div 1000 \text{ В}$ , и величиной отбираемой интенсивности пучка.

Для измерения относительной интенсивности пучка, наводимого на кристалл, используется аналогичный монитор, сигнал с которого подается на интегратор и измеряется в выбранном интервале времени. В процессе эксперимента интенсивность ускоренного пучка изменялась от  $1.0 \cdot 10^{12}$  до  $3.0 \cdot 10^{12}$  прот./цикл, и наводимая на кристалл интенсивность менялась во всем диапазоне. На рис.5 представлен график зависимости наводимой на кристалл интенсивности от величины высокого напряжения на ФЭУ.

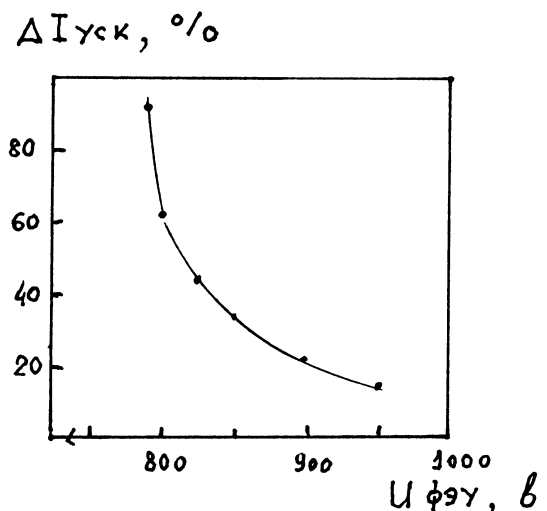


Рис. 5: Зависимость сбрасываемой на кристалл интенсивности от напряжения на ФЭУ.

### 4. Некоторые экспериментальные результаты

Одним из основных критериев наличия канализованного пучка является ориентационная кривая, т.е. зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла. В процессе экспериментов кристалл вводился на рабочую координату. Затем система обратной связи настраивалась на определенный уровень интенсивности наводимого на разориентированный кристалл пучка. Далее проводилась процедура ориентации кристалла.

Рис.6 показывает, как меняется доля забираемой интенсивности от угла ориентации кристалла при сохранении сигнала монитора обратной связи. Из этого эксперимента можно достаточно надежно оценить эффективность вывода, которая оказалась равной  $\sim 36\%$

$((I_{max} - I_{min})/I_{max})$ . Прямое измерение выведенной интенсивности дает величину 32%. Несколько более высокий уровень эффективности, полученный таким образом, объясняется тем, что часть пучка все же теряется в результате деканализирования.

$I_{\text{пучк}}, \text{отн. ед.}$

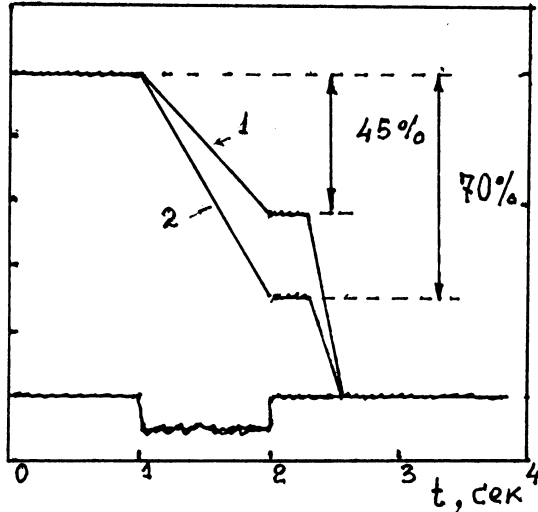


Рис. 6: Зависимость отбираемой интенсивности от ориентации кристалла: 1 — кристалл разориентирован; 2 — кристалл ориентирован.

Одним из важных параметров выведенного пучка является его поперечный размер. Измерение размеров осуществлялось как визуально (экраны), так и с помощью системы профилометров [7]. На рис.7 представлен профиль каналированного пучка, зарегистрированный в апертуре последнего септум-магнита (шп. 26). Из сравнения этого рисунка и изображения пучка, отклоненного в первый септум-магнит (рис.2), видно, что при прохождении участка ускорителя от ОМ-20 до ОМ-26 происходит увеличение радиального размера пучка. Это происходит из-за действия меняющегося в процессе вывода магнитного поля блока № 22 ускорителя, который является компенсирующим блоком бампа 16/22. Определенный вклад в увеличение размера вносит также поле блока № 20, так как трасса вывода проходит в области значительных нелинейностей магнитного поля.

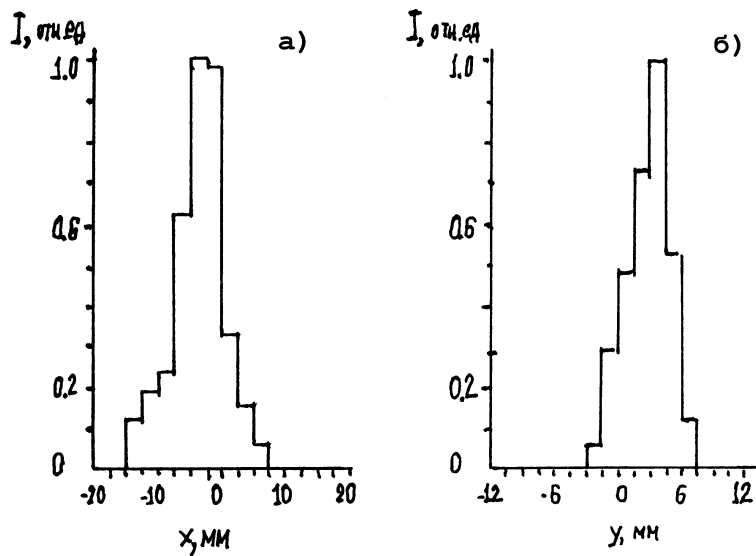


Рис. 7: Профили каналированного пучка: а — горизонтальный; в — вертикальный.

Отметим, что эффективность вывода снижается по мере роста отбираемой интенсивности. Одной из причин этого является значительное изменение угла наведения пучка на кристалл в режиме обратной связи, что приводит к рассогласованию между ориентацией кристалла и углом наведения пучка. На осциллограмме (рис.4) видно, что при сохранении постоянства сигнала наведения пучка (луч 2) сигнал выведенной интенсивности спадает во второй части сброса (луч 4) одновременно с резким ростом тока бампа (луч 1), что и является следствием значительного изменения угла падения на кристалл.

### Заключение

Проведенные в последнее время в ИФВЭ эксперименты по высокоэффективному выводу пучка протонов с помощью изогнутых монокристаллов не только явились убедительным подтверждением предложенных физических моделей, но имеют прямое практическое значение для ускорительного комплекса. Так, с помощью кристалла легко обеспечивается трудно достижимый иными способами диапазон интенсивности выведенных пучков  $1 \cdot 10^{10} \div 1 \cdot 10^{11}$  протонов/цикл, представляющий интерес для физических установок, например для комплекса меченых нейтрино. При этом может быть обеспечена максимально возможная длительность вывода и одновременная работа 1-2 внутренних мишеней.

### Список литературы

- [1] А.Г.Афонин и др. *Письма в ЖТЭФ*, т.67, вып.10. 1998.
- [2] A.G.Afonin et al. *Preprint IHEP 98-34*. Protvino, 1998.
- [3] А.Г.Афонин, В.И.Дианов. *Труды XII совещания по ускорителям*. Москва, 1990.
- [4] С.Д.Боровков и др. *Препринт ИФВЭ 90-34*. Протвино, 1990.
- [5] А.Г.Афонин, Б.А.Зеленов, В.Ф.Сухомлинов. *Труды XV совещания по ускорителям*. Протвино, 1996.
- [6] A.G.Afonin, V.N.Gres, V.I.Terehov. *EPAC-98*. Stockholm, 1998.
- [7] А.Г.Афонин, В.П.Гоцев, В.Н.Горлов и др. *Труды XV совещания по ускорителям*. Протвино, 1996.