



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2012–2
ОП, ОУ У-70

А.Г. Афонин¹, В.Т. Баранов¹, М.К. Булгаков¹, И.С. Войнов¹,
В.Б. Ганенко², В.Н. Горлов¹, И.В. Иванова¹, И.В. Кириллин²,
Д.М. Крылов¹, А.Н. Луньков¹, В.А. Майшеев¹, С.Ф. Решетников¹,
Д.А. Савин¹, Е.А. Сыщиков¹, В.И. Терехов¹, В.И. Трутень²,
Ю.А. Чесноков¹, П.Н. Чирков¹, Н.Ф. Шульга², И.А. Язынин¹

¹Государственный научный центр «Институт физики высоких энергий», Протвино,
Московская обл., 142281, Россия

²Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 61108,
Харьков, Украина

**Наблюдение и сравнительный анализ вывода/коллимации
циркулирующего пучка в ускорителе У-70 различными
кристаллографическими плоскостями изогнутого кристалла,
ориентированного вблизи оси $\langle 110 \rangle$**

Протвино 2012

Аннотация

Афонин А.Г. и др. Наблюдение и сравнительный анализ вывода/коллимации циркулирующего пучка в ускорителе У-70 различными кристаллографическими плоскостями изогнутого кристалла, ориентированного вблизи оси $\langle 110 \rangle$: Препринт ИФВЭ 2012 –2. – Протвино, 2012. – 12 с., 10 рис., 1 табл., библиогр.: 14.

В работе представлены результаты исследования вывода/коллимации пучка протонов с энергией 50 ГэВ в ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ (Протвино, Россия) изогнутым кристаллом кремния. До недавнего времени вывод (и коллимация) пучков протонов из ускорителей осуществлялись кристаллами при плоскостной ориентации (111) или (110), когда пучок двигался вдали от кристаллических осей. В данном эксперименте кристалл кремния был ориентированным таким образом, что пучок протонов входил в него вблизи оси $\langle 110 \rangle$. Данная ориентация позволила наблюдать вывод и коллимацию пучка протонов из ускорителя плоскостями $(1\bar{1}1)$, $(1\bar{1}0)$, $(1\bar{1}2)$, $(1\bar{1}3)$, $(3\bar{3}1)$, обладающими различной величиной межплоскостного электростатического потенциала. Максимальная эффективность вывода пучка достигала ~80% для плоскостей $(1\bar{1}1)$ и $(1\bar{1}0)$.

Abstract

Afonin A.G. et al. Observation and comparative analysis of a circulating beam extraction/collimation from the U-70 accelerator by various crystalline planes of the bent silicon crystal aligned near to an axis $\langle 110 \rangle$: IHEP Preprint 2012 –2. – Protvino, 2012. – p. 12, figs. 10, table 1., refs.: 14.

In paper results of research of 50 GeV proton beam extraction/collimation from the U-70 accelerator (IHEP, Protvino, Russia) by a bent silicon crystal are submitted. Until recently the extraction/collimation of proton beams from accelerators were carried out by crystals at planar orientation (111) or (110) when the particles moved far from crystal axes. In the given experiment the silicon crystal was aligned in such a manner that protons entered into it near to an axis $\langle 110 \rangle$. The given orientation of crystal has allowed to observe extraction and collimation of a proton beam from the accelerator by crystalline planes $(1\bar{1}1)$, $(1\bar{1}0)$, $(1\bar{1}2)$, $(1\bar{1}3)$, $(3\bar{3}1)$, possessing in various value of interplanar electrostatic potential. Peak efficiency of beam extraction/collimation achieved of about 80 % for planes $(1\bar{1}1)$ and $(1\bar{1}0)$.

1. Введение

До недавнего времени вывод/коллимация пучка в ускорителе осуществлялась кристаллами плоскостной ориентации (111) или (110) [1-3]. Положительные особенности кристаллов с осевой кристаллографической ориентацией связаны с тем, что осевой потенциал примерно в 5 раз выше плоскостного. Высокий осевой потенциал кристаллического поля (потенциальный барьер свыше 100 эВ в кремнии) можно использовать для отклонения пучков частиц в двух модах. В весеннем сеансе 2011 года на У-70 использовалось отражение частиц в нескольких кристаллах, ориентированных вблизи кристаллографической оси [4]. В осеннем сеансе 2011 года начаты исследования по выводу/коллимации пучка с применением моды динамического хаоса в одиночном изогнутом кристалле, предложенной академиком НАН Украины Н.Ф. Шульгой с коллегами [5,6] и экспериментально наблюдаемой в [7]. Для того чтобы правильно ориентировать кристаллографическую ось вдоль пучка частиц необходимо сначала идентифицировать эффекты от различных кристаллографических плоскостей в приосевом положении кристалла. Результаты этого первого этапа исследований отражены в настоящей работе. Эта задача имеет также самостоятельный научный интерес, поскольку в этом случае с помощью одного кристалла исследуется зависимость эффективности вывода/коллимации пучка от силы потенциала плоскостей.

2. Описание ускорительного эксперимента

Опыт проводился на протонном синхротроне У-70 ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ. В опытах по выводу пучка из У-70 использовался кремниевый кристалл осевой ориентации $\langle 110 \rangle$, размерами: 2 мм по пучку и 0.5 мм поперек пучка. Угол изгиба составил 0.7 мрад. Эти параметры кристалла выбраны в соответствии с рекомендациями [8] для реализации условий динамического хаоса. Оптимизация кристалла очень важна, в противном случае наблюдается выпадение частиц в плоскостное каналирование [9,10]. Кристалл был размещен в двухосевом гониометре и установлен в кольцо У-70 (рис. 1).

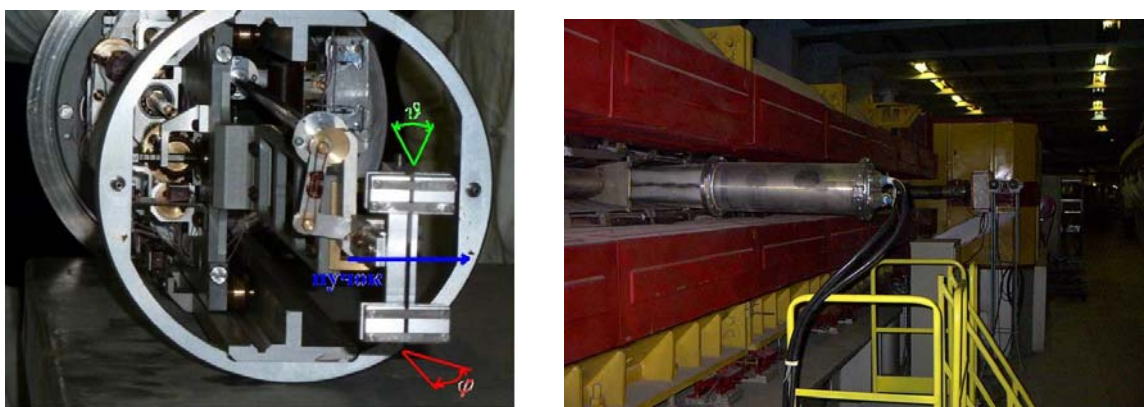


Рис. 1: Кристалл в двухосевом гониометре устанавливается в кольцо У-70.

В эксперименте изогнутый кристалл дистанционно вводился в гало циркулирующего пучка, как показано на рис. 2. Угол изгиба кристаллов достаточен, чтобы отделить в пространстве циркулирующий и отклоненный пучки. Эффект отклонения пучка за счет каналирования измерялся профилометром (детектором вторичной эмиссии), расположенным на торце поглотителя в вакуумной камере ускорителя вблизи циркулирующего пучка. Параметры ускорителя, детектора частиц, схемы изгиба кристалла и другие экспериментальные подробности описаны в [11, 12]. Основные элементы экспериментального оборудования показаны на рис. 3.

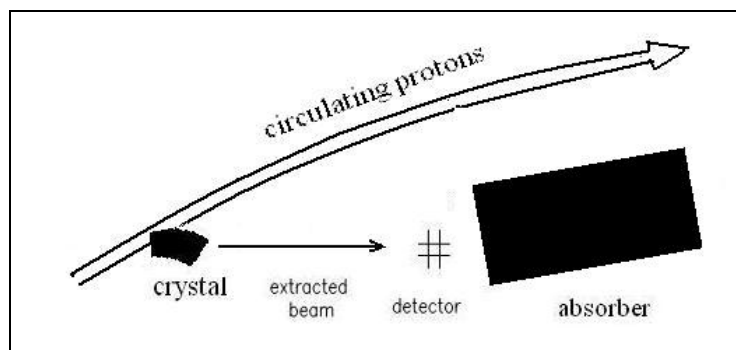


Рис. 2: Схема опыта по выводу и коллимации пучка кристаллами.

С помощью дистанционной системы управления можно менять радиальное положение, горизонтальный и вертикальный углы ориентации кристалла относительно оси циркулирующего пучка, наводимого на кристалл. Эффективность работы установленных кристаллов определяется профилометрами на поглотителе, а качество работы системы коллимации – ионизационными камерами, расположенными после поглотителя. С помощью ионизационной камеры ИК-84 вблизи мишени, можно оценить потери на ней и по минимуму потерь определить ее оптимальную угловую ориентацию. Остальные ионизационные камеры определяют радиационные поля, возникающие в самом поглотителе и ближайшем оборудовании. В проведенном опыте пучок 50 ГэВ протонов подводился к кристаллу с помощью медленно нарастающего горизонтального искажения замкнутой орбиты, возбуждаемого дополнительными обмотками дипольных магнитов (т.н. бампы).

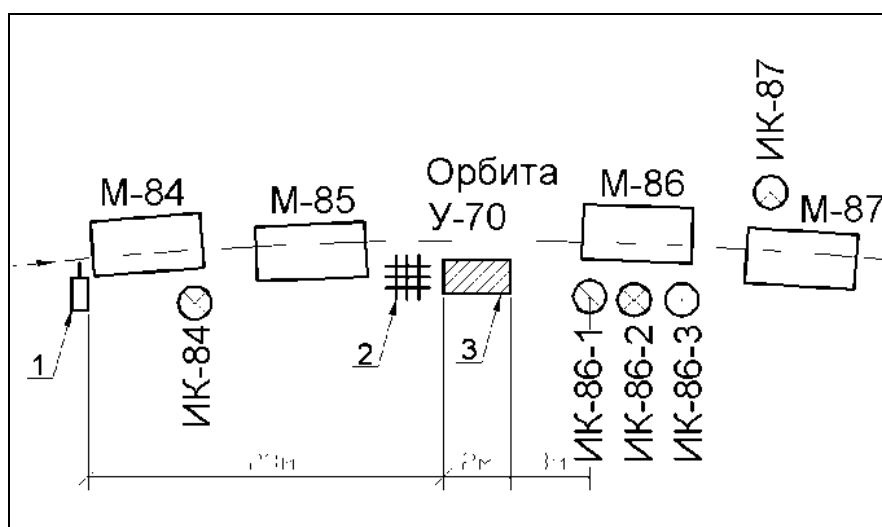
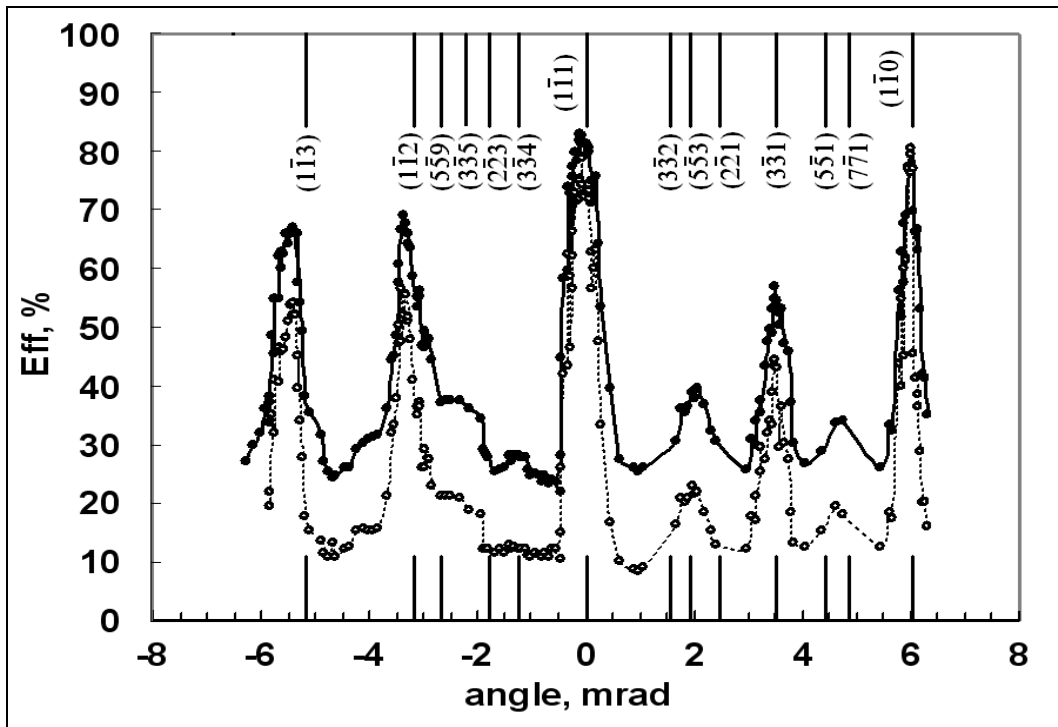
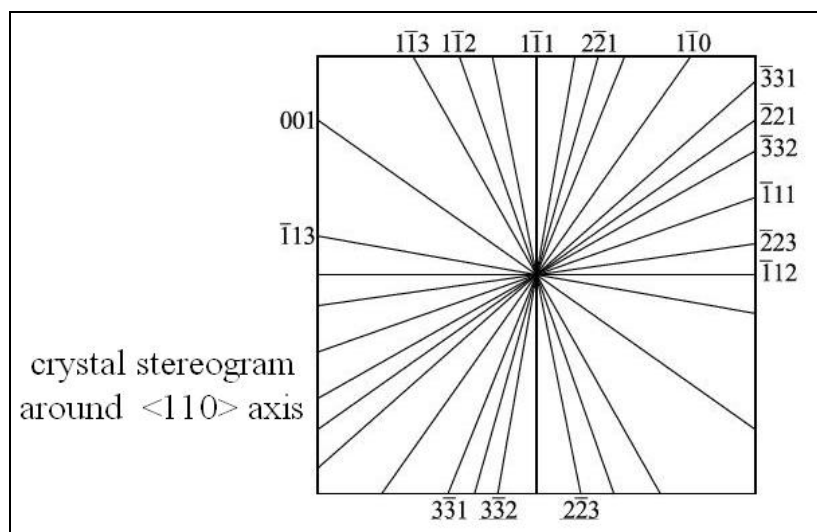


Рис. 3: Расположение станции с кристаллом и устройств диагностики пучка вблизи поглотителя. 1 – станция с кристаллом, 2 - профилометр, 3 - поглотитель, ИК - ионизационные камеры, М - магнитные блоки ускорителя.

После настройки наведения пучка начиналась процедура дистанционной ориентации кристалла. Изначально кристалл был установлен в нескольких миллирадианах от кристаллографической оси $\langle 110 \rangle$ с помощью лазерного прибора. Затем на пучке варьировался горизонтальный угол гониометра и находились эффекты отклонения пучка от различных плоскостей кристалла (рис. 4а). Идентификация плоскостей (рис. 4б) была проведена с помощью анализа, описанного в следующем разделе статьи.



а)



б)

Рис. 4: а) Эффективность вывода (коллимации) ускоренного пучка кристаллом в зависимости от горизонтального угла вращения гониометра. Верхняя кривая – полный эффект отклонения за счет каналирования и рассеяния, нижняя кривая – вклад только каналирования.

б) Stereogramma наиболее сильных плоскостей вокруг оси $\langle 110 \rangle$ монокристалла кремния.

Эффективность вывода (коллимации) для условий нашего эксперимента определяется как отношение полного числа протонов, зарегистрированных профилометром, к числу ускоренных в У-70 протонов (измеряемым с помощью трансформаторов тока). Для определения эффективности коллимации была проведена калибровка профилометра с помощью быстрого кикер-магнита. На рис. 5 показаны суммы сигналов с этого детектора, когда пучок отклонялся разными кристаллографическими плоскостями в сравнении с эффектом однооборотного заброса пучка на детектор быстрым кикер-магнитом (при этом весь пучок размером 6 мм попадает в апертуру детектора). Измеренные эффективности коллимации/вывода для сильных плоскостей $(1\bar{1}1)$ и $(1\bar{1}0)$ составили $83\pm 3\%$ и $80\pm 3\%$ соответственно.

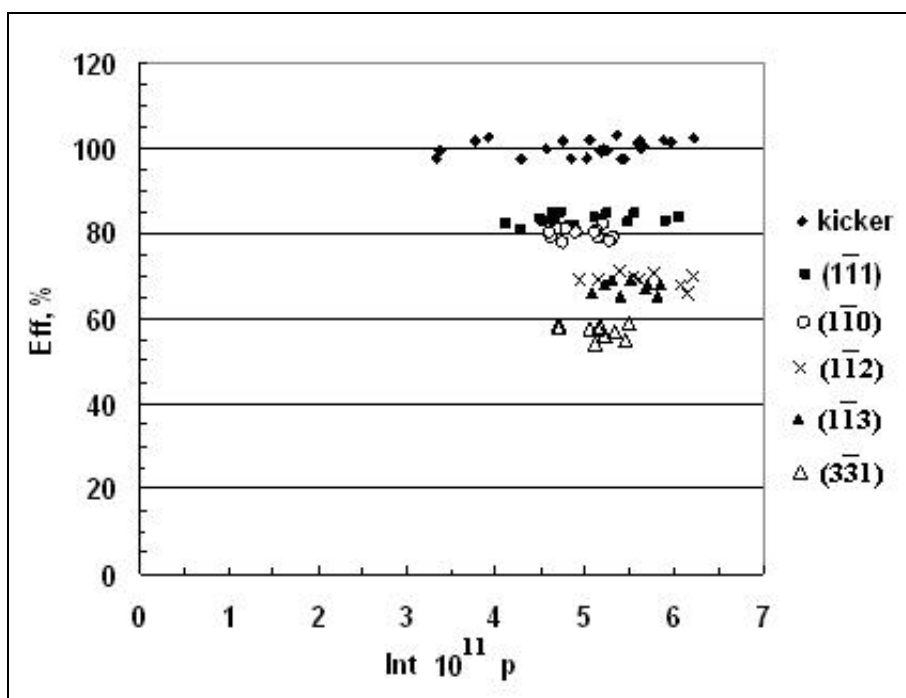


Рис. 5: Сравнение суммы сигналов профилометра при работе разных кристаллографических плоскостей с эффектом заброса пучка кикер-магнитом.

Характерные профили отклоненного пучка (горизонтальный и вертикальный) на торце поглотителя показаны на рис. 6.

На этом первый этап исследований был завершен. Полученные данные позволяют сравнить эффект от разных плоскостей, обладающих различной величиной электростатического поля. В следующем сеансе с помощью вертикального и горизонтального движения будет завершена осевая ориентация кристалла, позволяющая выполнить условия [8].

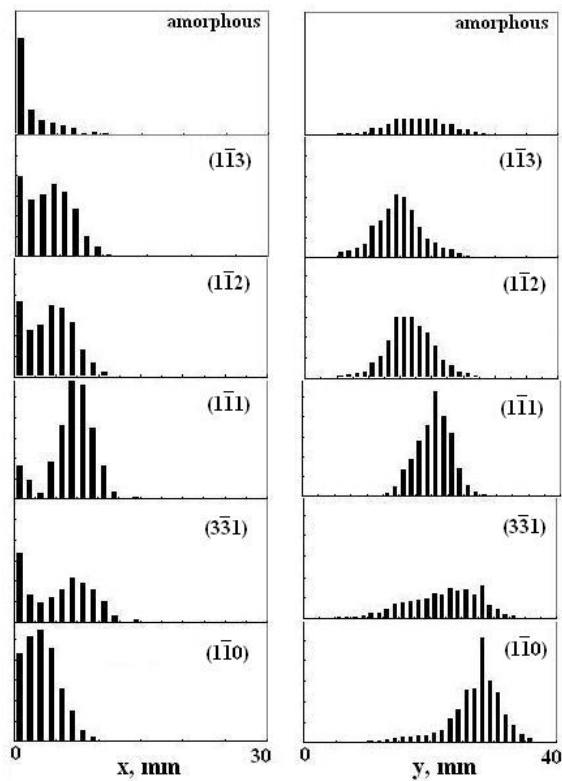


Рис. 6: Профили пучка для разных углов гониометра (согласно рис. 4а), соответствующих действию различных плоскостей кристалла.

3. Сравнительный анализ действия различных кристаллографических плоскостей

В эксперименте была измерена эффективность коллимации 50 ГэВ протонного пучка как функция горизонтального угла гониометра (при фиксированном значении вертикального угла). Результаты этих измерений представлены на рис. 4а, где видно достаточно сложное поведение измеряемой величины. Такое поведение можно понять, если предположить, что наблюдающиеся пики на рисунке обязаны своим происхождением каналированию частиц в наклонных плоскостях (согласно рис. 4б). Чтобы идентифицировать эти плоскости рассмотрим движение протона в монокристалле (направление его движения определим вектором, см. рис. 7). Направление движения определяется в прямоугольной системе координат полярным углом θ и азимутальным углом α .

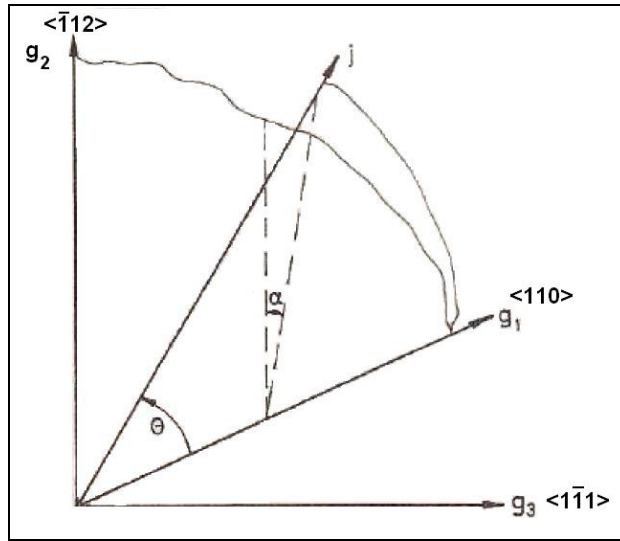


Рис. 7: Движение протона в системе определяемой кристаллографическими осями монокристалла.

В эксперименте ось g_1 была направлена по $\langle 110 \rangle$ кристаллографической оси ось g_2 – по $\langle \bar{1}12 \rangle$ и ось g_3 – по $\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$ оси. В идеальном случае горизонтальная ось гониометра совмещается (параллельна) с осью g_2 , а вертикальная ось с осью g_3 . Тогда получаем соотношение для горизонтального и вертикального углов вращения гониометра

$$\theta_h = \theta \sin(\alpha) \quad \theta_v = \theta \cos(\alpha) .$$

Теперь рассмотрим плоскость определяемую векторами g_2 и g_3 . Нетрудно видеть, что в монокристалле существуют плоскости, которые перпендикулярны плоскости (g_2, g_3) . Очевидно, что проекции этих плоскостей на плоскость (g_2, g_3) представляют прямые линии с единой точкой пересечения. Именно эти плоскости могут быть использованы для получения режима каналирования частиц и последующего поворота пучка. Рассмотрим одну из этих плоскостей. Пусть угол между прямой и осью g_2 равен β . Тогда кристалл будет ориентирован для каналирования в этой плоскости если

$$\frac{\theta_h}{\theta_v} = \text{tg}(\beta) . \quad (1)$$

Зная угол θ_h в нашем эксперименте, скажем для плоскости $(1\bar{1}0)$, можно найти угол θ_v .

Экспериментальные данные показывают наличие двух примерно равных по максимальной эффективности пиков. Можно предположить, что пик при нулевом угле обусловлен каналированием в $(1\bar{1}1)$ плоскости, а пик при угле равном 6 мрад – в $(1\bar{1}0)$ плоскости. Отсюда, зная, что $\beta_{1\bar{1}0} = 0.615479$ радиан, мы находим, что

$$\theta_v = \frac{\theta_h}{\text{tg}(\beta)} = \frac{0.006}{\text{tg}(0.615479)} \approx 0.0085 . \quad (2)$$

Теперь можно рассчитать положения остальных сильных плоскостей и сравнить с измерениями других пиков эффективности. Сравнение расчетов с экспериментом показывает не очень хорошее согласие.

Ситуацию можно скорректировать, если учесть что гониометрические оси могут не совпадать с осями g_2 и g_3 кристалла, а именно развернуты на некоторый небольшой угол γ (см. рис. 8). В этом случае горизонтальный и вертикальный углы гониометра θ_x, θ_y не совпадают с углами θ_h, θ_v . Для небольшой величины γ вместо соотношения (2) можно использовать соотношение

$$\theta_x = \frac{\theta_y \sin(\beta)}{\cos(\beta - \gamma)} \quad (3)$$

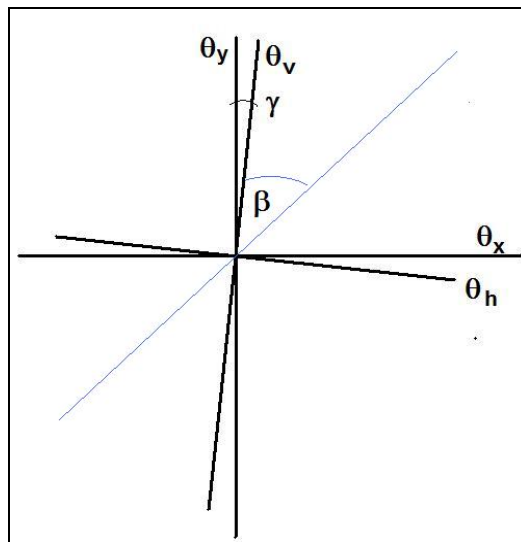


Рис. 8: Азимутальный сдвиг между системами координат гониометра и кристалла. Синяя линия иллюстрирует плоскость с углом β .

Здесь два неизвестных параметра $\theta_y \approx \theta_v$ и γ . В качестве первого приближения для θ_y можно взять найденное выше значение. Таким способом получается неплохое описание пиков, если $\theta_v = 0.0088$, $\gamma = 0.06$. Рис. 4 иллюстрирует соответствие между рассчитанным и измеренным положением пиков эффективности. Для соответствия также были рассчитаны плоскостные потенциалы различных плоскостей. Расчеты сделаны для потенциалов, рассчитанных согласно работе [13] для атомных форм факторов, полученных из рентгеновских измерений. Плоскости с потенциальным барьером менее ~ 0.5 эВ были исключены из рассмотрения и не представлены на рисунке. Результаты расчетов представлены в таблице.

Таблица 1. Характеристики кристаллографических плоскостей.

<i>plane</i>	β	θ_x	θ_h	U, eV	$\frac{\varphi_x(klm)}{\varphi(111)}$	$\frac{\varphi_y(klm)}{\varphi(111)}$
(1 $\bar{1}$ 4)	-.61548	-6.510E-03	-6.223E-03	3.15	0.667	-0.471
(1 $\bar{1}$ 3)	-.51480	-5.162E-03	-4.978E-03	9.16	0.758	-0.429
(1 $\bar{1}$ 2)	-.33983	-3.184E-03	-3.111E-03	8.52	0.889	-0.314
(5 $\bar{5}$ 9)	-.28937	-2.673E-03	-2.620E-03	1.15	0.917	-0.273
(3 $\bar{3}$ 5)	-.25167	-2.232E-03	-2.263E-03	3.16	0.938	-0.241
(2 $\bar{2}$ 3)	-.19934	-1.803E-03	-1.778E-03	0.57	0.961	-0.194
(3 $\bar{3}$ 4)	-.14049	-1.257E-03	-1.245E-03	1.57	0.980	-0.139
(1 $\bar{1}$ 1)	0	0	0	22.55	1.	0.
(3 $\bar{3}$ 2)	.17496	1.542E-03	1.556E-03	2.57	0.970	0.174
(5 $\bar{5}$ 3)	.21423	1.893E-03	1.915E-03	2.49	0.955	0.208
(2 $\bar{2}$ 1)	.27564	2.452E-03	2.489E-03	0.70	0.926	0.262
(3 $\bar{3}$ 1)	.38400	3.478E-03	3.556E-03	5.82	0.860	0.347
(5 $\bar{5}$ 1)	.47499	4.398E-03	4.525E-03	2.79	0.791	0.407
(7 $\bar{7}$ 1)	.51480	4.823E-03	4.978E-03	1.16	0.758	0.429
(1 $\bar{1}$ 0)	.61548	5.980E-03	6.223E-03	21.37	0.667	0.471

В таблице θ_h рассчитаны по формуле (2) при $\theta_v = 0.0088$.

Из рис. 4а видно достаточно хорошее соответствие между рассчитанным положением пиков и найденным в эксперименте. Небольшое расхождение в принципе может быть объяснено погрешностями калибровки гониометра. Отметим, что плоскости (1 $\bar{1}$ 3), (1 $\bar{1}$ 2), (3 $\bar{3}$ 4), (1 $\bar{1}$ 1), (3 $\bar{3}$ 1), (1 $\bar{1}$ 0) дают поодиночке (без вклада других плоскостей) пики эффективности. Тогда как другие оставшиеся пики есть результат совместного действия двух или трех соседних (и достаточно близких) плоскостей. Также интересно, что слабые плоскости заметны на ориентационной кривой. Так плоскость (3 $\bar{3}$ 4) с потенциальным барьером 1.57 эВ вполне заметна.

Поворот пучка наклонными плоскостями (т.е. плоскостями с β , не равным нулю) иллюстрируется рис. 9. Видно, что радиус изгиба для плоскости (klm) равен

$$R_{(klm)} = R_{(1\bar{1}1)} / \cos(\beta),$$

где $R_{(1\bar{1}1)}$ - радиус изгиба плоскости (1 $\bar{1}$ 1), причем угол поворота этой плоскостью определяется из соотношения $\varphi_{(1\bar{1}1)} = d / R_{(1\bar{1}1)}$, где d - толщина кристалла.

Это означает, что полный угол поворота наклонной плоскостью равен

$$\varphi_{(klm)} = \varphi_{(1\bar{1}1)} \cos(\beta).$$

Поворот происходит по горизонтали и вертикали с соответствующими углами поворота

$$\varphi_{x(klm)} = \varphi_{(1\bar{1}1)} \cos^2(\beta), \quad \varphi_{y(klm)} = \varphi_{(1\bar{1}1)} \cos(\beta) \sin(\beta) \quad (\text{см. также таблицу}).$$

Отсюда следует, что по горизонтали пучок отклоняется в одну сторону, в то время по вертикали пучок может отклоняться вверх и вниз в зависимости от знака угла β .

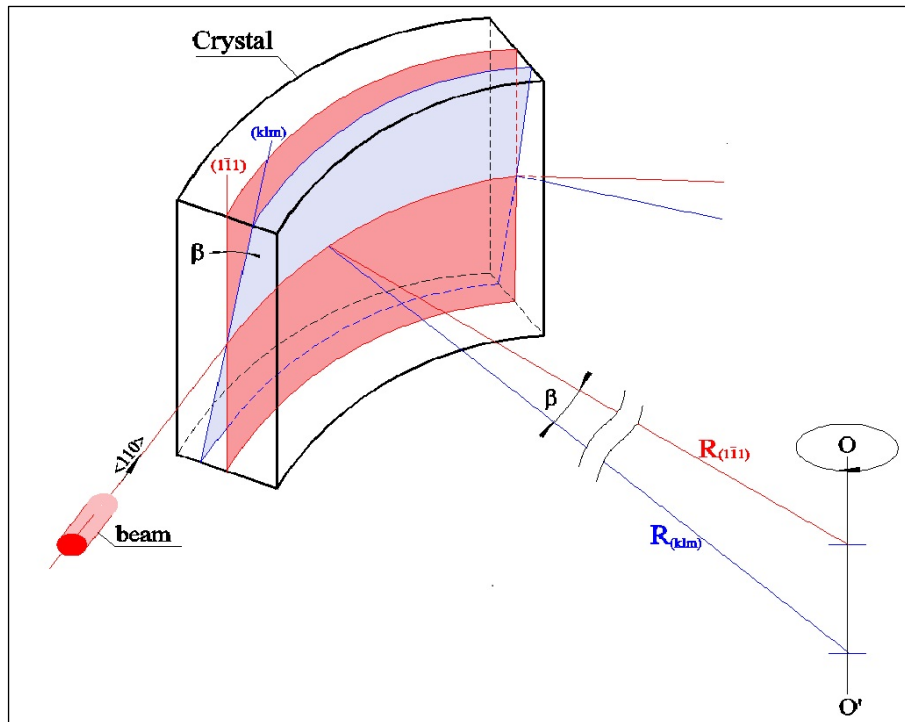


Рис. 9: Поворот пучка наклонными плоскостями (kln).

В эксперименте $\varphi_{(1\bar{1}1)} \approx 0.7$ мрад и $d = 2$ мм. Следовательно, $R_{(1\bar{1}1)} \approx 286$ см. Расстояние от кристалла до детектора было ≈ 20 м. Однако для расчета отклонения пучка надо учесть влияние на него градиентного магнитного поля ускорителя. Рис. 6 иллюстрирует отклонение пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях разными кристаллографическими плоскостями. Видно, что отклонение может быть как вверх, так и вниз.

Эффективность вывода зависит от многих факторов [14], таких как параметры кристалла, характеристики протонного пучка на мишени, условия наведения этого пучка и других. В данном эксперименте все эти параметры были фиксированы и изменялся только горизонтальный угол ориентации кристаллического дефлектора, что и позволило наблюдать вывод пучка с помощью наклонных плоскостей. Это также позволило сравнить эффективности вывода для разных плоскостей в примерно одинаковых условиях. При однократном прохождении протонного пучка через кристаллический дефлектор вероятность захвата частиц в режим каналирования примерно пропорциональна угловому акцептансу плоскости (углу каналирования, который пропорционален квадратному корню из потенциала (при достаточно больших радиусах изгиба)). Однако в условиях циркулирующего в ускорителе протонного пучка полное

число выведенных частиц определяется кратностью прохождения протонного пучка через дефлектор. Причем следует иметь ввиду, что в результате взаимодействия, главным образом из за многократного рассеяния, при каждом прохождении пучка через мишень происходит изменение геометрических характеристик протонного пучка (детальные расчеты этого процесса будут сделаны в отдельной работе). Поэтому линейная зависимость эффективности вывода от квадратного корня из потенциала не является очевидной. Тем не менее, результаты данного эксперимента приближенно описываются такой зависимостью (см. рис. 10).

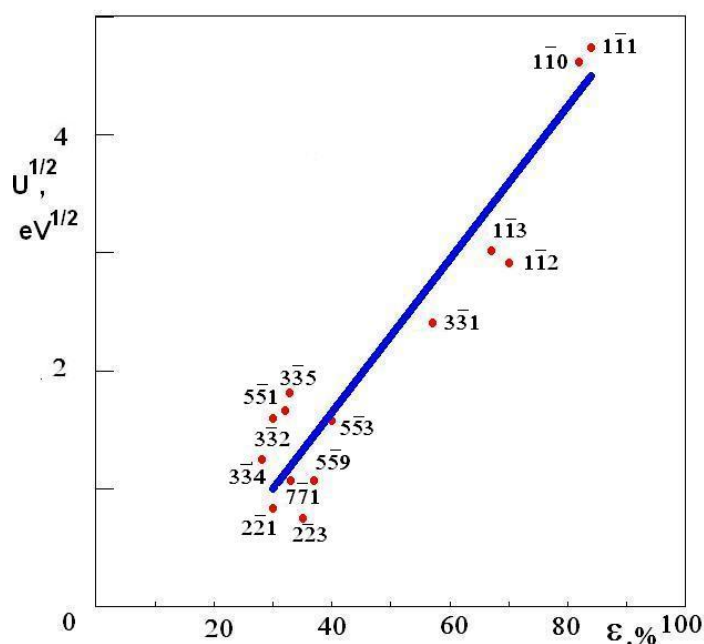


Рис. 10: Линейная аппроксимация экспериментальных результатов.
 Ось ординат – корень из потенциального барьера,
 ось абсцисс – эффективность вывода.

При потенциале равном нулю эффективность вывода равна примерно 15 %, что соответствует выводу аморфной мишенью.

4. Заключение

В эксперименте была измерена эффективность коллимации/вывода 50 ГэВ протонного пучка как функция горизонтального угла гониометра (при фиксированном значении вертикального угла вблизи оси). Это позволило сравнить эффект от разных плоскостей, обладающих различной величиной электростатического поля. Получены данные для плоскостей $(1\bar{1}1)$, $(1\bar{1}0)$, $(1\bar{1}2)$, $(1\bar{1}3)$, $(3\bar{3}1)$ и других.

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом (контракт № Н.4е.45.90.11, 1080), а также российским (проект № 11-02-90415) и украинским (проект №Ф40.2/092) фондами фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] A. G. Afonin et al, Phys.Rev.Lett.87:094802, 2001.
- [2] N.V.Mokhov et al, Int.J.Mod.Phys.A25:S98-105, 2010.
- [3] W.Scandale et al, Phys.Lett.B692:78-82, 2010.
- [4] A.G. Afonin et al, JETP Lett.93:187-190, 2011.
- [5] A.A. Greenenko, N.F. Shul'ga, JETP Lett.54:524-528, 1991.
- [6] N.F. Shul'ga, A.A. Greenenko, Phys.Lett.B353:373-377, 1995.
- [7] W. Scandale et al, Phys.Rev.Lett.101:164801, 2008.
- [8] N.F. Shul'ga et al, Nuovo Cimento, 34C, N4, 425, 2011.
- [9] J.F. Bak et al, Nucl.Phys. B242, 1, 1984.
- [10] A. Baurichter et al, Nucl.Instrum.Meth.B119:172-180, 1996.
- [11] A.G.Afonin et al, Phys.Part.Nucl.36:21-50, 2005.
- [12] A.G.Afonin et al, Instrum.Exp.Tech.54:1-7, 2011.
- [13] E. Bagli, V. Guidi and V.A. Maishev, Phys. Rev. E 81, 026708 (2010).
- [14] I.A. Yazynin, V.A. Maishev, Yu.A. Chesnokov, Instrum.Exp.Tech.54:632-638, 2011.

Рукопись поступила 20 февраля 2012 г.

А.Г. Афонин и др.

Наблюдение и сравнительный анализ вывода/коллимации циркулирующего пучка в ускорителе У-70 различными кристаллографическими плоскостями изогнутого кристалла, ориентированного вблизи оси $\langle 110 \rangle$.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 06.03.2012. Формат $60 \times 84/16$. Офсетная печать.

Печ.л. 1. Уч.– изд.л. 1,34. Тираж 80. Заказ 31. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

