

Анализ эффективности вывода пучка протонов из ускорителя ИФВЭ с помощью изогнутого кристалла*

А.А. Асеев, М.Ю. Горин, П.Т. Пашков

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Проводится анализ эффективности вывода протонов с энергией 70 ГэВ из ускорителя ИФВЭ (У-70). Рассчитана эффективность захвата частиц в каналы кристалла для случая, когда эмиттанс ускоренного пучка значительно превышает акцептанс кристалла, что характерно для У-70. Вычислено максимальное число каналируемых частиц в зависимости от азимутального расположения кристалла в ускорителе. Проведен численный анализ динамики частиц в У-70 с учетом их взаимодействия с кристаллом. Получено удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных результатов.

1. Движение частиц в плоскостном канале

Исследовалось уравнение движения частицы в канале изогнутого монокристалла в виде (см., например, [1])

$$\begin{cases} dx/ds = y \\ dy/ds = -(1/pv)V'(x) + k, \end{cases}$$

где поперечная координата x отсчитывается от оси канала перпендикулярно большой грани монокристалла, а продольная координата s — вдоль оси канала; p и v — соответственно импульс и скорость частицы; $V(x)$ — непрерывный электрический потенциал межплоскостного пространства; k — кривизна монокристалла.

Пусть x_c — предельное значение координаты x , понимаемое в том смысле, что при $x \geq x_c$ происходит рассеяние частиц на атомах кристалла, в результате чего они покидают рассматриваемый канал. Деканализирование частиц также имеет место при переходе от прямолинейного участка к изогнутому из-за уменьшения акцептанса кристалла. Будем считать все деканализированные частицы потерянными, определяя таким образом при расчетах нижнюю границу числа каналированных в монокристалле частиц. Далее полагаем $x_c = d/2 - 2.5\rho(T)$, где d — расстояние между атомными плоскостями, образующими канал, а параметр ρ учитывает тепловые колебания атомов в кристалле. В частности, для плоскости (110) кристалла Si при комнатной температуре $\rho = 0.075\text{Å}$ [2].

Некоторые динамические характеристики монокристалла кремния с ориентацией (110) в зависимости от кривизны k представлены на рис.1. Предельное число частиц, которое можно пропустить через канал заданной кривизны, фактически пропорционально фазовому объему S , нормированному на межплоскостное расстояние d (кривая 1). Представлены также максимальный угловой полуразброс каналируемых

*Результаты, представленные в данной работе, получены при частичной поддержке Международного научного фонда и Правительства России (гранты RМК000 и RМК300).

частиц y_{max} (кривая 2), длина деканалирования изогнутого кристалла L_D^B , нормированная на L_D^S — длину деканалирования в прямом кристалле (кривая 3), а также длина волны λ линейных колебаний частиц (кривая 4), нормированная на длину волны колебания в прямом кристалле λ_0 .

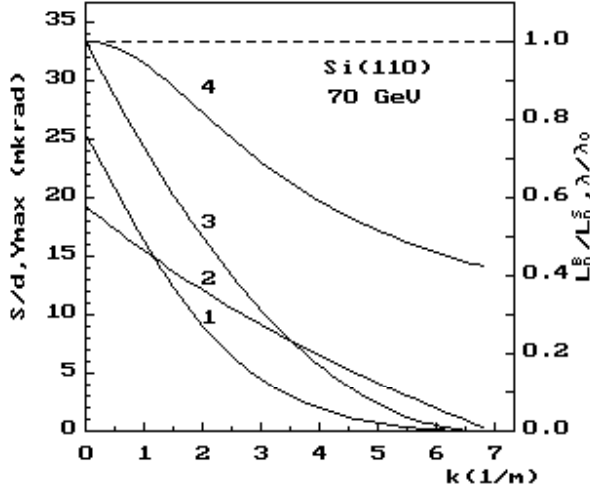


Рис. 1: Динамические характеристики монокристалла Si в зависимости от кривизны. 1 — S/d -фазовый объем; 2 — угловой полуразброс; 3 — длина деканалирования; 4 — длина волны колебания.

В качестве $V(x)$ при расчете кривых рис.1 взят потенциал Мольера в виде [1]

$$V = A \sum_{i=1}^3 (a_i/b_i G) \cdot \exp(-b_i G) [\cosh(b_i G X) - 1], \quad (1)$$

где $X = 2x/d$; $G = d/a_T$ ($a_T = 0.195 \text{ \AA}$ — расстояние экранирования Томаса-Ферми); $a_i = (0.2; 1.1; 0.7)$; $b_i = (3.0; 0.6; 0.15)$; $A = Z_1 Z_2 e^2 n d$ (Z_1, Z_2 — атомные номера каналируемых частиц и материала кристалла соответственно; e — заряд электрона; n — поверхностная плотность атомов каналирующих плоскостей кристалла).

Взаимодействие кристалла с ускоренным пучком в У-70 исследовалось с помощью ЭВМ, для чего на основе метода “макрочастиц” был составлен соответствующий алгоритм. Кристалл представлялся на фазовой плоскости (x, x') прямоугольником, ограниченным прямыми линиями $|x - x_0| = (\Delta x)_{cr}$ и $|x' - x'_0| = \varphi_c$, где $(\Delta x)_{cr}$ — толщина кристалла, φ_c — критический угол каналирования, а (x_0, x'_0) — координаты центра тяжести изображающего кристалл прямоугольника. В исходном положении они полагались равными: $x_0 = x_m, |x'_0| \leq x'_m$ (x'_m — максимальное значение радиального углового разброса частиц для выбранного азимута ускорителя). В процессе расчетов угловая ориентация кристалла x'_0 фиксировалась для каждого варианта, а положение центра кристалла изменялось так, чтобы наведение пучка было равномерным. Частицы, не попавшие в аксептанс кристалла (в прямоугольник с площадью, равной $2(\Delta x)_{cr} \cdot \varphi_c$), считались потерянными. Эффективность каналирования частиц определялась по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{cr} \cdot \varepsilon_B, \quad (2)$$

где ε_{cr} — коэффициент, учитывающий уменьшение эффективности каналирования за счет физических процессов внутри кристалла; ε_B — коэффициент, численно равный суммарному “весу” частиц, попавших в аксептанс кристалла. Коэффициент ε_{cr} дается выражением

$$\varepsilon_{cr} = (S/2d\varphi) \cdot \exp(-L/L_D^B), \quad (3)$$

где L — длина кристалла. Мы использовали значения длин деканализации из работы [3]: $L_D^S = 5.4$ см для кристалла с ориентацией (111), и $L_D^S = 4.4$ см для ориентации (110).

Как показывают расчеты, при медленном прохождении пучка через кристалл эффективность каналирования ε зависит от угла x'_0 кристалла. Если поместить кристалл в прямолинейном промежутке У-70 ($\beta = 27$ м, $\alpha = 1.7$, $x_m = 7.35$ мм) и учесть, что радиальный эмиттанс пучка 2π мм·мрад, а коэффициент $\varepsilon_{cr} = 2.27 \cdot 10^{-2}$, то увидим, что максимум эффективности каналирования составляет 0.36% и достигается при $x'_0 \approx 0.35x'_m$.

Исследовались варианты размещения кристалла в местах экстремумов β -функции, где фазовые эллипсы, описывающие бетатронные колебания частиц, располагаются в главных осях. Оказалось, что в таких случаях практически все частицы пучка могут попадать в аксептанс кристалла, если положить $x'_0 = 0$, что соответствует максимальной эффективности каналирования частиц $\varepsilon_{max} \sim 2\%$. При этом, однако, диапазон допустимых угловых ориентаций кристалла оказывается чрезвычайно узким. Так, например, при изменении x'_0 относительно значения $x'_0 = 0$ на величину $|\Delta(x'_0)| \sim \varphi_c$ эффективность каналирования частиц уменьшается значительно, поэтому ширину углового диапазона кристалла можно полагать в таких случаях равной $2\varphi_c$.

Так как в большинстве случаев при выводе частиц из У-70 с изогнутым монокристаллом взаимодействовала лишь небольшая часть ($\leq 10\%$) интенсивности ускоренного пучка протонов, была исследована динамика эффективности каналирования при движении кристалла внутрь пучка. При этом существенное значение имеет учет разброса частиц в пучке по импульсам. Результаты такого расчета представлены на рис.2. Относительная величина разброса частиц по импульсам в пучке $\Delta p/p_0$ принималась равной 0.1%, а кристалл располагался в прямолинейном промежутке У-70. Видно, что при сбросе на кристалл части интенсивности пучка эффективность каналирования ε существенным образом зависит от угловой ориентации кристалла x'_0 . Например при $N/N_0 = 0.1$, величина эффективности каналирования может изменяться в пределах от нуля до 0.18%.

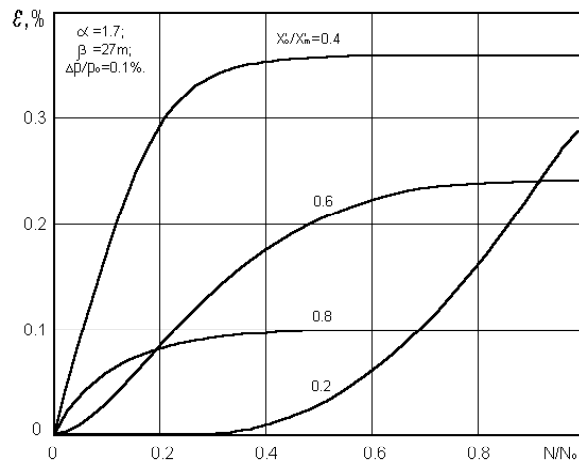


Рис. 2: Зависимость эффективности каналирования от числа частиц, сброшенных на кристалл в процессе наведения.

2. Сравнение с экспериментальными данными

Интересно сравнить данные эффективности каналирования частиц, получающиеся с помощью описанной в данной работе методики, с экспериментальными результатами, полученными в разных режимах при выводе частиц из У-70 с помощью изогнутого монокристалла Si (см., например, [4,5]).

2.1. Вывод частиц при наведении пучка на монокристалл

Как показано на рис.2, эффективность каналирования изменяется в широких пределах при изменении угловой ориентации кристалла x'_0 . Сравнить расчетные и экспериментальные данные можно, зная зависимость $x'_0(t)$, которая определяется динамикой орбиты частиц в месте установки кристалла. Анализ показал, что в нашем случае x'_0 меняется за время вывода на ~ 1 мрад, что почти в 2 раза превышает величину углового разброса частиц в пучке x'_m . Этот эффект приводит к значительному снижению эффективности каналирования по сравнению со случаем $x'_0 \approx const$.

Зависимости эффективности каналирования ϵ от числа частиц N , брошенных на кристалл, для случая, когда x'_0 кристалла растет за время вывода пучка от начального значения $x'_0(0)$ до $x'_0(0) + \Delta x'_0$, где $\Delta x'_0 = 1$ мрад, приведены на рис.3. Параметры пучка и кристалла, а также азимутальное расположение последнего те же, что и при расчете данных, представленных на рис.2.

Из рис. 3 видно, что при сбросе на кристалл всей интенсивности эффективность вывода существенно уменьшается с ростом параметра x'_0 . С другой стороны, при сбросе на кристалл небольшой части пучка эффективность каналирования возрастает при увеличении начального значения угла x'_0 . Так как начальная ориентация кристалла при экспериментах на У-70 подбиралась из условия получения оптимальной эффективности вывода при сбросе на кристалл $\leq 10\%$ от исходной интенсивности пучка, то вариант, реализованный на У-70, по-видимому, соответствует случаю кривой 3 рис.3, максимальная расчетная эффективность вывода для которого составляет $\sim 1.9 \cdot 10^{-4}$. Это близко к достигнутому в экспериментах на У-70 значению эффективности вывода частиц при таком способе, равному $\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$.

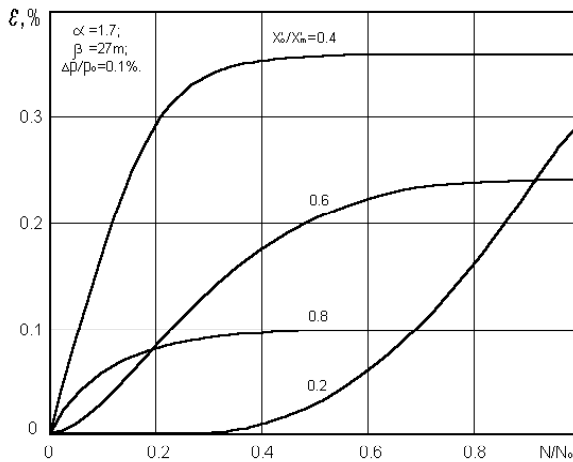


Рис. 3: Зависимость эффективности вывода от числа взаимодействующих частиц с учетом изменения орбиты частиц в месте расположения кристалла: 1 — $x'_0(0) = 0$; 2 — $x'_0(0) = 0.2$ мрад; 3 — $x'_0(0) = 0.4$ мрад.

2.2. Вывод при рассеянии пучка тонкой мишенью

Значительно более высокая эффективность вывода частиц по сравнению с рассмотренным случаем получается, если для наведения пучка на кристалл используется предварительная раскачка бетатронных колебаний частиц с помощью тонких мишеней [5]. При таком способе амплитуды колебаний отбираемых частиц в месте установки кристалла сохраняются в течение всего времени вывода и, как следствие, сохраняется оптимальное значение ориентации кристалла x'_0 . Здесь просматривается аналогия с вариантом установки кристалла в местах экстремумов β -функции, обсуждавшимся ранее, за исключением того, что в данном случае оптимальное значение x'_0 не равно нулю, а определяется значением амплитуды бетатронных колебаний частиц, взаимодействующих с кристаллом. Так же, как и в том случае, максимальная эффективность вывода достигает значения ε_{max} и составляет $\approx 2\%$.

Оказывается, это очень близко к фактическому значению эффективности вывода из У-70, соответствующему данному режиму. Прокомментируем сказанное следующим образом: так как целью оценок, приведенных в [5], было получение скорее порядка величины эффективности вывода протонов изогнутым монокристаллом, а не ее истинного значения, то величина $\sim 0.7\%$ оказалась заниженной. Причина заключается в следующем. При одновременной работе нескольких мишеней и длительности взаимодействия с ними пучка $\Delta t \geq 1$ с доля неупругих ядерных взаимодействий первичных протонов в мишенях составляет $\sim 70\%$ [6]. Остальные частицы, испытывая упругое ядерное, многократное кулоновское рассеяния и ионизационные потери энергии, увеличивают амплитуды своих колебаний вплоть до потерь на стенках вакуумной камеры. Именно эти частицы, интенсивность которых составляет $\sim 30\%$ от первоначальной, и должны учитываться при оценке эффективности вывода пучка с помощью кристалла в данном случае. Таким образом, возвращаясь к работе [5], следует взять плотность частиц на кристалле не $1.5 \cdot 10^9$ частиц, а $\sim 5 \cdot 10^8$, т.е. примерно в 3 раза меньше. Соответственно значение эффективности вывода будет $\sim 2.1\%$. Это хорошо согласуется с полученными выше значениями ожидаемой эффективности вывода в режиме предварительного рассеяния пучка тонкой мишенью.

Заключение

Новая программа, описывающая динамику протонов, захваченных в режим каналирования изогнутым монокристаллом, оказалась полезной. Эффективность вывода протонного пучка с энергией 70 ГэВ, полученная с помощью математического моделирования разных режимов ускорителя ИФВЭ, оказалась в хорошем согласии с данными экспериментов. Определено более точное значение эффективности при выводе пучка кристаллом на установку ПРОЗА с использованием тонкой мишени-рассеивателя. Оно оказалось $\sim 2\%$. Мы считаем, что значение эффективности вывода порядка нескольких процентов является максимальным, если эмиттанс пучка значительно превосходит аксептанс кристалла, что соответствует случаю У-70.

Список литературы

- [1] Ellison J.A. // Nucl. Phys. B206 (1982) 609.
- [2] Forster J.S. et al. // Phys. B318 (1982) 301.
- [3] Бирюков В.М. и др. // УФН 164 N10 (1994) 1017.
- [4] Asseev A.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A330 (1993) 39.
- [5] Asseev A.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A324 (1993) 31.
- [6] Адо Ю.М. и др. — Препринт ИФВЭ 85-23, Серпухов, 1985.