Письма в ЖЭТФ, том 99, вып. 4, с. 203 – 206 © 2014 г. 25 февраля

Сравнение эффективности отклонения пучков протонов различной энергии изогнутым кристаллом при использовании плоскостного каналирования и стохастического механизма отклонения

А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, И. В. Иванова, В. А. Маишеев, Д. А. Савин, Ю. А. Чесноков, П. Н. Чирков, В. Б. Ганенко[+], И. В. Кириллин[+1)], Н. Ф. Шульга[+], В. И. Трутень[+]*

Институт физики высоких энергий, 142281 Протвино, Россия

[+]*Харьковский физико-технический институт, 61108 Харьков, Украина*

[*]*Харьковский национальный университет им. Каразина, 61022 Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 27 января 2014 г.

Проведено сравнение эффективности поворота пучка протонов с кинетической энергией частиц 50, 15 и 1.3 ГэВ при помощи плоскостного каналирования в изогнутом кристалле кремния и при помощи стохастического механизма поворота заряженных частиц изогнутым кристаллом. Представлены результаты моделирования отклонения протонов при однократном прохождении через кристалл и результаты эксперимента по отклонению циркулирующего пучка, проведенного на ускорителе У-70 ИФВЭ (г. Протвино, Московская обл., РФ). Показано, что с уменьшением энергии эффективность стохастического механизма отклонения растет, в то время как эффективность отклонения с использованием плоскостного каналирования уменьшается.

DOI: 10.7868/S0370274X14040018

При движении быстрой заряженной частицы в кристалле под малым углом к одной из главных кристаллических осей проявляются корреляции в рассеянии частицы соседними атомами кристалла. В результате этих корреляций движение частицы в кристалле определяется в основном непрерывным потенциалом цепочек атомов кристалла, вблизи которых происходит движение. Периодичность расположения цепочек атомов в кристалле делает возможным устойчивое движение заряженной частицы в поле образованных ими кристаллических плоскостей [1]. В случае изогнутого кристалла такое устойчивое движение, называемое плоскостным каналированием, может приводить к повороту направления движения частицы [2] на углы, значительно превышающие критический угол плоскостного каналирования θ_c [1]. Если же частица входит в изогнутый кристалл под углом ψ^{in} между импульсом частицы и осью кристалла, меньшим критического угла осевого каналирования ψ_c [1], то возможно ее стохастическое отклонение. При этом частица, являясь надбарьерной по отношению к потенциальному барьеру как соседних цепочек атомов, так и соседних атомных плоскостей, рассеивается на изогнутых цепочках атомов, постепенно меняя направление своего движения, отклоняясь в направлении кривизны кристалла [3, 4].

В работе проводится сравнительный анализ эффективности двух указанных механизмов поворота пучков заряженных частиц изогнутым кристаллом с уменьшением энергии протонов от 50 до 1.3 ГэВ. Анализ проведен на основе моделирования движения заряженных частиц в изогнутом кристалле и данных, полученных в эксперименте, проведенном на ускорителе У-70 ИФВЭ (г. Протвино, Московская обл., РФ). В указанном эксперименте протоны с кинетической энергией 50, 15 и 1.3 ГэВ падали на изогнутый кристалл кремния под малым углом к кристаллической оси $\langle 110 \rangle$. Толщина кристалла составляла 2 мм. Радиус его кривизны равнялся 286 см. Плоскостью кривизны кристалла в эксперименте являлась плоскость $(\bar{1}12)$. Те же параметры кристалла и энергии частиц использовались при моделировании движения протонов в изогнутом кристалле.

Уравнения движения заряженной частицы в плоскости, ортогональной кристаллографической оси z, под малым углом к которой частица входит в кристалл, могут быть записаны в виде [5]

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x}{dt^2} = -\dfrac{c^2}{E}\dfrac{d}{dx}U(x,y) - \dfrac{c^2}{R}, \\ \dfrac{d^2y}{dt^2} = -\dfrac{c^2}{E}\dfrac{d}{dy}U(x,y), \end{cases} \qquad (1)$$

[1)] e-mail: igor.kirillin@gmail.com

где E – энергия частицы, $U(x,y)$ – потенциал цепочек атомов кристалла, параллельных оси z, c – скорость света в вакууме, R – радиус кривизны кристалла. Уравнения (1) соответствуют случаю, когда изгиб кристалла происходит в направлении увеличения координаты x.

Моделирование, результаты которого представлены в данной работе, состояло в решении системы уравнений (1) с учетом некогерентного рассеяния частиц на тепловых колебаниях атомов кристалла и его электронной подсистеме (учет указанных некогерентных эффектов проводился так же, как в [6], применительно к условиям рассматриваемого эксперимента). При этом в качестве оси z была выбрана ось $\langle 110 \rangle$, за ось y принималась ось, ортогональная плоскости кривизны $(\bar{1}12)$, а ось x совпадала с осью, ортогональной плоскости $(1\bar{1}1)$.

Начальные условия к уравнению (1) определяют режим движения заряженной частицы в изогнутом кристалле. Введем для удобства угловые координаты θ_x и θ_y, равные, соответственно, отношениям компонент скорости частицы v_x и v_y к значению ее скорости. В таких координатах условие, необходимое для реализации начальных условий, при которых возможно стохастическое отклонение частицы, выглядит следующим образом: $\sqrt{{\theta_x^{in}}^2 + {\theta_y^{in}}^2} < \psi_c^2$, где индекс "$in$" означает величины при влете в кристалл. Соответственно для плоскостного каналирования заряженных частиц необходимо выполнение условий $\theta_y^{in} \gg \psi_c$, $\theta_x^{in} < \theta_c$, где θ_c — критический угол плоскостного каналирования, который примерно в два раза меньше критического угла осевого каналирования.

На рис. 1 показаны результаты моделирования зависимости эффективности поворота пучка протонов с энергиями 50 ГэВ изогнутым кристаллом от начального угла θ_y^{in} между средним импульсом частиц и плоскостью кривизны кристалла. Эффективность отклонения η при моделировании оценивалась как отношение числа частиц, отклоненных от первоначального направления движения в направлении изгиба кристалла на угол, превышающий половину угла изгиба кристалла (700 мкрад), к общему числу частиц. Угол θ_x^{in} между импульсом частиц и плоскостью $(1\bar{1}1)$ при моделировании равнялся нулю. Большие по сравнению с критическим углом осевого каналирования (64.2 мкрад для протонов с энергиями 50 ГэВ) значения θ_y^{in} в рассматриваемом случае соответствуют плоскостному каналированию протонов в изогнутом кристалле. Стохастическому механизму поворота соответствует область θ_y^{in} от 0 до ψ_c.

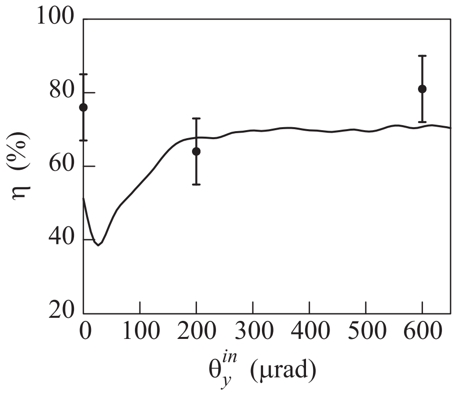

Рис. 1. Зависимость эффективности поворота пучка протонов с энергиями 50 ГэВ изогнутым кристаллом от начального угла между средним импульсом частиц и плоскостью кривизны кристалла (непрерывная кривая). Точки – результаты эксперимента

Из рисунка видно, что при кинетической энергии 50 ГэВ эффективность плоскостного каналирования несколько выше эффективности стохастического отклонения. При этом область начальных угловых координат θ_y^{in}, при которых реализуется первый механизм, значительно больше. Также можно заметить провал в области θ_y^{in} порядка ψ_c. Этот провал в эффективности отклонения возникает из-за того, что для частиц с $\theta_y^{in} \gtrsim \psi_c$ механизм стохастического отклонения не реализуется, т.к. не выполнено необходимое условие $\sqrt{{\theta_x^{in}}^2 + {\theta_y^{in}}^2} < \psi_c^2$, а механизм плоскостного каналирования приводит к отклонению значительной части частиц только при $\theta_y^{in} \gg \psi_c$.

На рис. 2 представлены результаты такого же моделирования, как и в предыдущем случае, для пучка

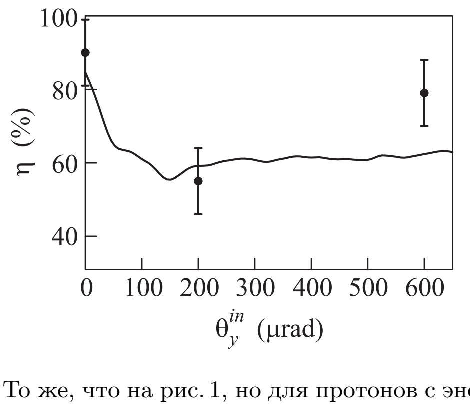

Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для протонов с энергией 15 ГэВ

протонов с энергиями 15 ГэВ. Угол θ_x^{in} между средним импульсом частиц и плоскостью $(1\bar{1}1)$ при моделировании по-прежнему равнялся нулю. Для протонов с кинетической энергией 15 ГэВ критический угол осевого каналирования составляет 115 мкрад. Из рисунка видно, что при кинетической энергии 15 ГэВ эффективность стохастического отклонения значительно превосходит эффективность плоскостного каналирования в отличие от случая протонов с энергиями 50 ГэВ. Связано это с тем, что при уменьшении кинетической энергии частиц возрастает интенсивность некогерентного рассеяния на тепловых колебаниях атомов и электронной подсистеме кристалла. Плоскостное каналирование есть финитное движение между кристаллическими плоскостями атомов. Некогерентное рассеяние может привести к росту энергии поперечного движения частиц. Это, в свою очередь, может привести к переходу частиц в надбарьерное по отношению к кристаллическим плоскостям состояние и, следовательно, к выходу из режима отклонения. В стохастическом же отклонении принимают участие надбарьерные частицы. Поэтому данный механизм более устойчив к увеличению поперечной энергии частиц. Кроме того, критический угол осевого каналирования примерно в два раза выше плоскостного, что также увеличивает устойчивость стохастического отклонения по отношению к увеличению интенсивности некогерентного рассеяния в сравнении с плоскостным каналированием. Также следует отметить, что на рис. 2 мы снова наблюдаем провал в эффективности отклонения при θ_y^{in} порядка ψ_c.

На рис. 3 представлены результаты моделирования зависимости эффективности поворота пучка

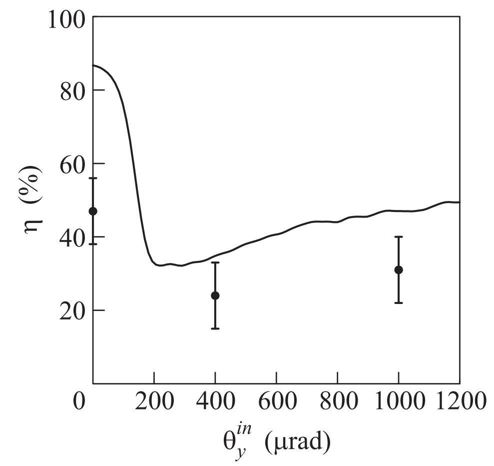

Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для протонов с энергией 1.3 ГэВ

протонов с энергиями 1.3 ГэВ изогнутым кристаллом от начального угла θ_y^{in} между средним импульсом частиц и плоскостью кривизны кристалла. Угол θ_x^{in} по-прежнему равен нулю. Для протонов с кинетической энергией 1.3 ГэВ критический угол осевого каналирования составляет 337.4 мкрад. Из рисунка видно, что в рассматриваемом случае эффективность стохастического механизма поворота близка к 90 %, в то время как плоскостное каналирование позволяет повернуть около половины частиц пучка. Кроме того, с уменьшением энергии протонов область начальных угловых координат, при которых реализуется стохастический механизм отклонения, растет, что связано с ростом критического угла осевого каналирования.

Результаты эксперимента по измерению эффективности отклонения циркулирующего пучка протонов с энергиями 50, 15 и 1.3 ГэВ, проведенного в ИФВЭ на ускорителе У-70, представлены на рис. 1, 2 и 3 точками. Условия эксперимента на циркулирующем пучке представляли собой многопараметрическую систему. Схема опыта и методы измерений описаны в [7]. Данные эксперимента находятся в качественном соответствии с результатами моделирования. Однако количественное соответствие достигается не во всех точках. Прежде всего это связано с тем, что при моделировании рассматривалось однократное прохождение протонов через кристалл. Эксперимент же был проведен на циркулирующем пучке, что означает многооборотный вывод частиц. Частицы циркулирующего пучка, медленно подводимого к кристаллу бамп-магнитом, при первом соударении с кристаллом попадают в так называемый неэффективный аморфный слой (толщиной в несколько микрон). Это приводит к увеличению некогерентного рассеяния. Кроме того, на процессе отклонения пучка кристаллом сказывается дрейф угла падения частиц при изменении тока бамп-магнита, который тем больше, чем ниже энергия пучка в ускорителе. Строгий расчет процесса прохождения пучка через кристалл с учетом многооборотного движения в ускорителе и подробные экспериментальные данные будут опубликованы позднее. Показанные точками на рис. 1, 2 и 3 результаты эксперимента на качественном уровне демонстрируют преимущество стохастического механизма отклонения пучка перед плоскостным каналированием в изогнутом кристалле при понижении энергии частиц до 1.3 ГэВ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект # 13-02-90434) и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект # Ф53.2/107).

---

1. Й. Линдхард, УФН **99**, 249 (1969).

2. E. N. Tsyganov, Preprint Fermilab TM-682, TM-684 (1976).
3. А. А. Гриненко, Н. Ф. Шульга, Письма в ЖЭТФ **54**, 520 (1991).
4. А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шульга, В. И. Трутень, А. А. Гриненко, В. В. Сыщенко, УФН **165**, 1165 (1995).
5. А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шульга, *Электродинамика высоких энергий в веществе*, Наука, М. (1993).
6. N. F. Shul'ga, I. V. Kirillin, and V. I. Truten', Phys. Lett. B **702**, 100 (2011).
7. A. G. Afonin, V. T. Baranov, M. K. Bulgakov, Yu. A. Chesnokov, P. N. Chirkov, V. N. Gorlov, I. V. Ivanova, D. M. Krylov, A. N. Lun'kov, V. A. Maisheev, S. F. Reshetnikov, D. A. Savin, E. A. Syshchikov, V. I. Terekhov, I. S. Voinov, I. A. Yazynin, V. B. Ganenko, I. V. Kirillin, N. F. Shul'ga, and V. I. Truten', Phys. Rev. STAB **15**, 081001 (2012).