



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-128

P1-99-128

А.С.Артемов, В.В.Бойко*, А.Д.Коваленко, А.М.Таратин

ВОЛЬФРАМОВЫЙ ДЕФЛЕКТОР
ДЛЯ ПУЧКА НУКЛОТРОНА

*Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия

1999

1. Введение

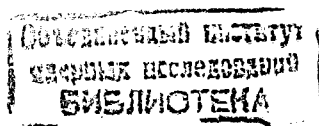
Кристаллооптика пучков заряженных частиц высоких энергий — новое, интенсивно развивающееся направление. Весьма перспективно использование кристаллических дефлекторов в системах локализации потерь на протонных и ионных коллайдерах. Для изготовления дефлекторов широко используются кристаллы кремния, лучшие из которых имеют рекордно низкое содержание дефектов структуры.

В [1] показано, что для отклонения пучка частиц на большие углы значительный выигрыш в эффективности можно получить при использовании вместо кремния кристаллов металлов с высоким порядковым номером, таких как вольфрам. Однако такие кристаллы обладают значительно худшими показателями структурного совершенства по сравнению с кристаллами кремния. В ЛВЭ ОИЯИ с 1997 года ведутся работы по подготовке к исследованиям новых кристаллических дефлекторов из вольфрама на циркулирующем пучке нуклотрона [2]. Создано и прошло первые испытания оборудование для проведения таких исследований.

В [1, 2] сделаны оценки оптимальных параметров дефлекторов из вольфрама для пучков ускоренных ядер нуклотрона. Для нуклотрона достижение оптимального изгиба требует очень тонких кристаллов — около 100 мкм, поэтому очень важна особая тщательность в изготовлении дефлекторов.

Дело в том, что угол наклона граней дефлектора к кристаллографическим плоскостям ϑ_{mis} наряду с неровностями поверхности уменьшает рабочую толщину дефлектора на величину $t_s = \vartheta_{mis}L$. Для эффективной работы дефлектора необходимо, чтобы $t_s \ll t$, то есть величина угла разориентации граней должна отвечать условию — $\vartheta_{mis} \ll t/L$. Особенно важна параллельность граней дефлектора плоскостям при использовании дефлектора для вывода пучка из ускорителя. При медленном наведении циркулирующего пучка частицы попадают на входной торец кристаллического дефлектора вблизи грани, обращенной к пучку. Большая доля частиц, попадающих в септум кристалла t_s , будет потеряна, так как, захватываясь в режим каналирования, они отклоняются укороченными поверхностными каналами на значительные углы, которые, однако, меньше чем необходимо для вывода.

В настоящей работе для пучков ускоренных ядер нуклотрона с энергией 6 ГэВ/нуклон сделаны оценки длин деканалирования в кристалле



вольфрама, содержащем дислокации, и моделированием исследовано изменение деканалирования при частично неупругом изгибе кристалла. Показано, что и с имеющимися на сегодня кристаллами вольфрама можно достичь увеличения эффективности отклонения пучка нейтрона.

2. Длина деканалирования в кристалле с дислокациями

Длина деканалирования частиц в идеальном кристалле определяется в основном многократным рассеянием на электронах кристалла. При наличии в кристалле дефектов (точечных, линейных, двухмерных, трехмерных) каналированная частица может деканалировать за счет рассеяния на них. В отличие от других типов дефектов сечение деканалирования для дислокаций растет с энергией частиц, поэтому для частиц высоких энергий именно дислокации приводят к уменьшению их длин деканалирования в кристалле.

Дислокации приводят к искривлению кристаллической решетки в непосредственной близости от ядра дислокации, поэтому частицы, испытывая действие центробежной силы в этой области, могут деканалировать в близких столкновениях с дислокациями. Для плоскостного случая сечение деканалирования в близком соударении с ядром дислокации σ_{dc} определено в [3, 4].

В относительно далеких столкновениях с дислокацией частица изменяет свою поперечную энергию медленно. Используя коэффициенты диффузии по поперечной энергии в далеких столкновениях частиц с краевыми и винтовыми дислокациями [5] и соответствующие длины деканалирования S_{dm} [6], определим сечения деканалирования в таких столкновениях согласно $S_{dm} = 1/(\sigma_{dm}n_d)$:

$$\sigma_{dm}^e = \frac{\mu_{0,1}^2 b^2}{2 d_p \vartheta_c}, \quad \sigma_{dm}^s = \frac{\mu_{1,1}^2 \pi b}{192 \vartheta_c}. \quad (1)$$

Полное сечение деканалирования в близких и далеких столкновениях для краевой и винтовой дислокаций

$$\sigma_d^e = \sigma_{dc}^e + \sigma_{dm}^e, \quad \sigma_d^s = \sigma_{dc}^s + \sigma_{dm}^s. \quad (2)$$

Полагая содержание в кристалле равного количества дислокаций каждого типа $n_d^e = n_d^s = 0,5n_d$, где n_d — общая плотность дислокаций,

можно определить среднее сечение деканалирования на дислокациях $\sigma_d = 0,5(\sigma_d^e + \sigma_d^s)$.

Для дейтронов с энергией 6 ГэВ/нуклон при каналировании в (110) каналах вольфрама среднее сечение в близких и далеких столкновениях с дислокациями, вектор Бюргера которых равен $d_p = 2,238 \text{ \AA}$, где d_p — межплоскостное расстояние, составляет $\sigma_d = 3,4 \text{ мкм}$. Определяя соответствующую среднюю длину деканалирования на дислокациях S_d , для результирующей длины деканалирования частиц S в кристалле с дислокациями имеем

$$1/S = 1/S^0 + 1/S_d, \quad (3)$$

где S^0 — длина деканалирования в совершенном кристалле [1]. На рис.1 показана зависимость длины деканалирования дейтронов с энергией 6 ГэВ/нуклон от плотности дислокаций в кристалле вольфрама. Длина деканалирования уменьшается вдвое по сравнению с идеальным кристаллом при плотности дислокаций $n_d = 2,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. Это значит, что для такого кристалла при длине, равной S^0 , эффективность отклонения уменьшится в 2 раза относительно идеального, оставаясь, однако, в несколько раз выше, чем с кристаллом кремния. Кристаллы вольфрама с плотностью дислокаций около указанной величины могут быть получены. Таким образом, при энергии ускоренных ядер, достижимой на

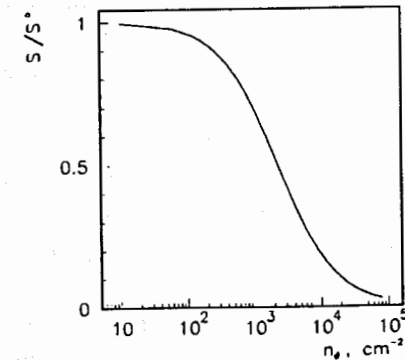


Рис.1. Зависимость длины деканалирования дейтронов с энергией 6 ГэВ на нуклон в кристалле вольфрама, ориентированном вдоль (110) плоскостей, от плотности дислокаций. $S^0 = 1,3 \text{ см}$ — длина деканалирования в совершенном кристалле, определяемая многократным рассеянием на электронах

нейтронном, и существующие кристаллы вольфрама могут обеспечить

увеличение эффективности отклонения на большие углы в несколько раз по сравнению с кремниевыми дефлекторами.

3. Длина деканалирования при частично неупругом изгибе кристалла

Вольфрам — пластичный материал, и возможен его изгиб с радиусом, меньше упругого $R < R_{el}$, сопровождающийся возникновением дислокаций.

Моделированием рассмотрено влияние генерируемых при изгибе кристалла дислокаций на деканалирование частиц. Полагалось, что они образуют дислокационные стенки, разделяющие упруго изогнутые области кристалла. Введем коэффициент пластичности изгиба кристалла $\kappa = \Delta\alpha/\alpha$, определяющий долю угла изгиба $\Delta\alpha$ за счет образования дислокационных стенок. При одинаковом расстоянии между ними, то есть одинаковой длине упруго изогнутых участков L , угол мозаичности $\vartheta_m = \kappa\alpha L/S_{cr}$, где S_{cr} — длина кристалла. Упруго изогнутые участки обеспечивают угол изгиба $(1 - \kappa)\alpha$ при радиусе изгиба $R = R_o/(1 - \kappa)$, где $R_o = S_{cr}/\alpha$ — радиус равномерного изгиба кристалла.

Рассматривалось прохождение дейтронов с энергией 6 ГэВ/нуклон через кристалл вольфрама, длиной $S_{cr} = 1$ см с углом изгиба 100 мрад. В этом случае $R_o = 10$ см и упругий изгиб кристалла возможен при толщине $t \leq 100$ мкм. Моделирование прохождения в равномерно изогнутом кристалле дает для длины деканалирования дейтронов величину $S_b^o = 11,37$ мм.

На рис.2 представлена рассчитанная зависимость длины деканалирования дейтронов при частично неупругом изгибе кристалла с $\kappa = 0,1$ (1) и $0,2$ (2) от расстояния, разделяющего генерируемые изгибом дислокационные стенки. Увеличение расстояния означает пропорциональное увеличение угла мозаичности, что приводит к росту потерь каналированной фракции пучка при пересечении дислокационных стенок и уменьшению длины деканалирования. Когда расстояние между дислокационными стенками достаточно мало, так что угол мозаичности много меньше критического угла каналирования $\vartheta_m < 0,1\vartheta_c$, длина деканалирования отличается незначительно от случая с упругим изгибом. В противном случае, когда $\vartheta_m > 0,1\vartheta_c$, наблюдается резкое уменьшение длины деканалирования.

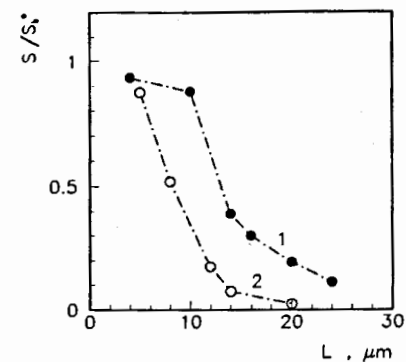


Рис.2. Зависимость длины деканалирования дейтронов с энергией 6 ГэВ/нуклон в кристалле вольфрама, изогнутом вдоль (110) плоскостей, от расстояния между дислокационными стенками L . Изгиб частично неупругий, коэффициент пластичности изгиба $\kappa = 0,1$ (1), $0,2$ (2)

Таким образом, результаты моделирования показывают, что и за пределами области упругого изгиба кристалла вольфрама, обладающего пластичностью, возможна эффективная работа его в качестве дефлектора, если коэффициент пластичности изгиба невелик, а образующиеся дислокационные стенки распределены равномерно, так что угол мозаичности много меньше критического угла каналирования. Однако возможность неупругих деформаций предъявляет высокие требования к контролю за структурой кристаллов вольфрама в процессе изготовления дефлекторов.

Работа поддержана грантом МНТЦ N 437 и грантом РФФИ N 96-02-18133А.

Литература

- [1] Kovalenko A.D., Mikhailov V.A., Taratin A.M., Voiko V.V., Kozlov S.I., Tsyganov E.N. JINR Rapid Communications, 4[72]-95, p.9-18, Dubna 1995.
- [2] Артемов А.С. и др. — Сообщение ОИЯИ Р9-98-174, Дубна, 1998.
- [3] Kudo H. Phys.Rev. B18 (1978) 5995.

- [4] Feldman L.C., Mayer J.W., Picraux S.T. Materials analysis by ion channeling. — Academic Press, NY 1982.
- [5] Кумахов М.А., Ширмер Г. Атомные столкновения в кристаллах. — М.: Атомиздат, 1980.
- [6] Бавижев М.Д., Бирюков В.М. Препринт ИФВЭ 90-184, Протвино 1990; Birjukov V. Phys.Rev.E, v.52, p.2045, 1995.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1999 года.