

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3581/82

2/III-82

P14-82-325

В.Н.Бугров, С.А.Карамян

РАДИАЦИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ
МОНОКРИСТАЛЛА GaP ИОНАМИ ^{31}P И ^{40}Ar

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1982

Эффекты теней и каналирования при взаимодействии заряженных частиц с монокристаллами дают большие и разнообразные возможности для исследования радиационного повреждения монокристаллической структуры^{1/}. Ценность этих методов состоит, в частности, в том, что они чувствительны непосредственно к местоположению атомов в решетке монокристалла. Поэтому получаемая информация связана прямо со степенью упорядоченности монокристалла, от которой зависят все другие физические свойства монокристаллического твердого тела.

При исследовании повреждения кристаллических материалов под действием заряженных частиц выявлены такие феномены, как радиационное распухание, аморфизация, блистеринг, радиационно-стимулированная диффузия дефектов и др. Однако механизм возникновения дефектов, количественные характеристики повреждения, зависимость его степени от энергии и массы бомбардирующих частиц еще остаются предметом интенсивного исследования.

В данной работе с помощью эффекта теней изучено повреждение монокристалла фосфида галлия под действием ионов ³¹P с энергией 31 МэВ и ⁴⁰Ar - 24 МэВ. Ставится задача дополнить полученные ранее данные^{2,3/} по взаимодействию тяжелых ионов с монокристаллами в диапазоне энергии 0,6-8,0 МэВ/нуклон с целью получения сведений о зависимости повреждения от массы и энергии иона и от типа монокристалла.

Толстая монокристаллическая мишень фосфида галлия облучалась при комнатной температуре коллимированным пучком ионов имевшим диаметр 1 мм. Использовался выведенный пучок циклотрона У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. При мощности до $\sim 10^{10}$ ионов с^{-1} нагрев пучком облучаемого объема /и средний, и импульсный/ не превышал нескольких градусов согласно оценке. Пучок направлялся под углом $\approx 4-5^\circ$ к кристаллографической плоскости (110) монокристалла, при этом две его оси $\langle 111 \rangle$ были ориентированы под углами около 59° и 130° , а ось $\langle 110 \rangle$ - под углом $\approx 95^\circ$ по отношению к пучку. Указанные индексы Миллера относятся к гранецентрированной кубической решетке, образной атомами Ga. Упругорассеянные ионы фиксировались в процессе облучения пластиковыми трековыми детекторами, расположенными в диапазоне углов рассеяния от 45° до 135° . Таким образом получались теневые картины в угловом распределении упругорассеянных ионов, соответствующие определенному интервалу плотности дозы ионов. Просмотр детектора позволял определить профиль теневого минимума, его глубину и угловую ширину.

Путем облучения отдельных участков монокристалла разными интегральными потоками ионов, а также длительного облучения одного и того же участка монокристалла с последовательной заменой детекторов удавалось проследить зависимость глубины теневого минимума χ от плотности дозы облучения I . Используемые в эксперименте монокристаллы являлись фрагментами одной и той же, единым образом обработанной монокристаллической пластины, имевшей одинаковые свойства по всей площади. В процессе экспериментальной работы выявились следующие изменения, происходящие с облучаемой поверхностью под действием пучка: 1/ образование тонкой углеродной пленки /даже при применении сорбционного насоса для получения вакуума в камере/, 2/ возможное изменение неровности поверхности под действием облучения, 3/ увеличение коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии. Последнее можно объяснить появлением на поверхности микрообразований, слабо связанных с матрицей, которые нагреваются пучком и являются источниками термоэлектронной эмиссии. Эти изменения состояния поверхности, вероятно, затрагивают тонкий слой по сравнению с пробегом регистрируемых частиц, т.к. они не мешают наблюдению достаточно яркой теневой картины.

Определение числа ионов, попавших на мишень, производилось на основе измеренного количества рассеянных ионов в направлении, не совпадающем с кристаллографическим выделенным направлением. Расчетным путем находился выход рассеянных ионов для толстой мишени^{3/}. Для области углов рассеяния $< 90^\circ$ в общем число регистрируемых частиц дают вклад, кроме рассеянных ионов, также ядра отдачи Ga и P. Выход ядер отдачи в случае толстой мишени вычислялся следующим образом. Соотношение между энергией и пробегом принимается в виде $E = \left(\frac{C_i R_i}{2}\right)^{n_i}$, где $i=1$ для бомбардирующей частицы, $i=2$ для ядра отдачи. Толщина рабочего слоя мишени d вдоль пучка определяется решением уравнения

$$k_2 \left\{ \frac{C_1}{2} [R_1(E_0) - d] \right\}^{n_1} = \left\{ \frac{C_2}{2} [R_2(\Pi) + pd] \right\}^{n_2} \quad /1/$$

где E_0 - начальная энергия иона, Π - пороговая энергия регистрации ядра отдачи детектором, $k_2(\theta_2^L)$ выражает энергию ядра отдачи E_2 через энергию E падающей частицы: $E_2 = k_2(\theta_2^L) \cdot E$, $p(\theta_2^L)$ - отношение заглубления точки рассеяния по направлению регистрации l и по направлению падающей частицы: $p(\theta_2^L) = \frac{l}{s}$. Выход ядер отдачи равен:

$$N(\theta_2^L) = \Delta \Omega J \frac{\rho \cdot 6.03 \cdot 10^{23}}{A} M(\theta) \frac{1}{(2n_1 - 1) C_1} \frac{2^{2n_1}}{|R_1(E_0) - d|^{2n_1}} \frac{1}{[R_1(E_0)]^{2n_1 - 1}} \quad /2/$$

где $\Delta \Omega$ - телесный угол регистрации в ср, J - полное число ионов, попавших на мишень, ρ - плотность мишени в г/см^3 , A - мо-

лекулярный вес GaP в ат.ед. массы, $R_1(E_0)$ и d - в см. Величина $M(\theta)$ вычисляется по формуле /4/:

$$M(\theta) = \frac{1,628 Z_1^2 Z_2^2 (1+\gamma)^2}{\pi \cos^3 \theta_2} 10^{-26} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^2 \cdot \text{ср}^{-1}, \quad /3/$$

где Z_1 и Z_2 - атомные номера иона и одного из ядер мишени,

$\gamma = \frac{A_1}{A_2}$ - отношение их массовых чисел.

Функции пробег-энергия для P и Ga в GaP были определены на основе результатов работы /5/. Для Ag использованы экспериментальные результаты /6,7/, при пересчете от тормозящей среды C к GaP учтена " Z_2 -осцилляция", увеличивающая относительную тормозную способность углерода в $\approx 1,4$ раза. Полученный таким образом пробег аргона примерно в два раза больше, чем по работе /5/ для области энергий $< 0,6$ МэВ/нуклон. Такие различия иногда встречаются при небольших энергиях ионов, они могут объясняться " Z -осцилляцией" тормозных потерь, связанной с оболочечной структурой тормозящегося атома или атома среды.

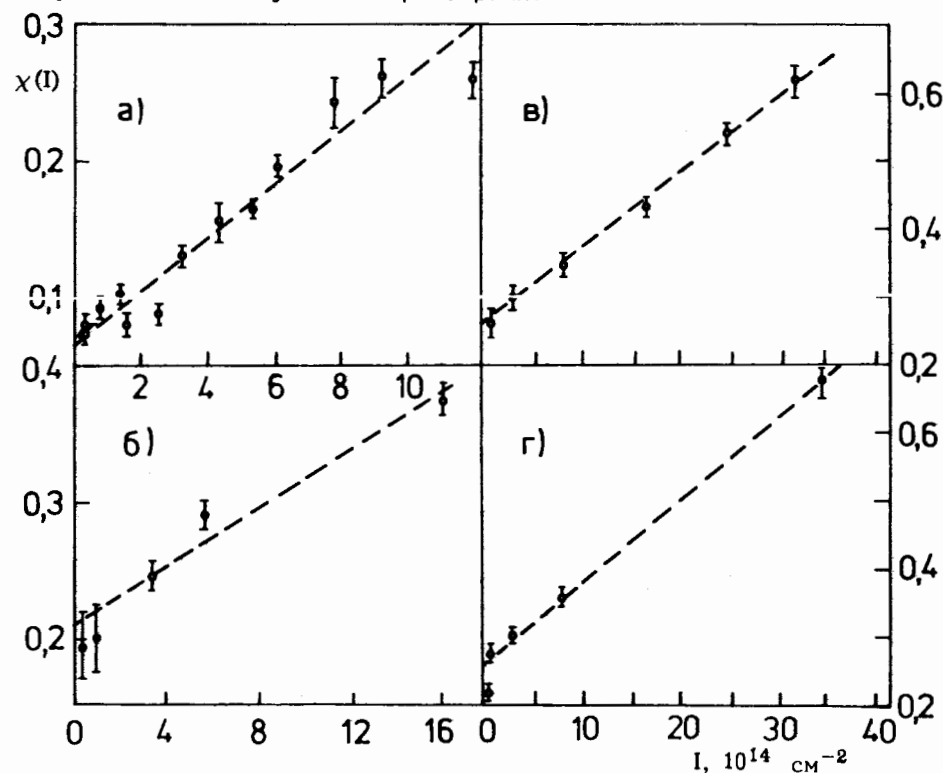
На рисунке приведены зависимости глубины тени от плотности дозы облучения $\chi(I)$, полученные в данной работе, а также результаты /3/. Функция $\chi(I)$ является количественной характеристикой степени повреждения монокристалла тяжелыми ионами. В большинстве случаев функции $\chi(I)$ могут быть аппроксимированы прямой линией $\chi(I) = \chi_0 + \gamma I$, где γ показывает силу повреждающего воздействия тяжелого иона. Отметим, что для взаимодействия $W + {}^{40}\text{Ag}$ нельзя исключить уменьшение производной $\partial \chi / \partial I$ в области малых I , а в случае монокристалла GaP наблюдается скорее противоположное поведение точек вблизи $I=0$. Это различие можно связать со свойствами монокристаллов. Почти полное отсутствие свободных электронов в чистом GaP затрудняет образование компенсирующего электронного облака вокруг положительного заряда иона в отличие от металлической среды. По мере облучения происходит диссоциация некоторых молекул GaP и в объеме появляются свободные электроны. Поэтому в начале облучения GaP повреждающее действие иона оказывается большим. На другом языке, такое объяснение состоит в различии кильватерных потенциалов частицы, движущейся в металлической и неметаллической средах.

В таблице перечислены значения γ , полученные при изучении взаимодействия тяжелых ионов с монокристаллами. Видно, что повреждающее действие иона заметно возрастает с увеличением массы иона и с уменьшением его энергии. Это позволяет предположить наличие корреляции повреждения с ядерной тормозной способностью иона в веществе монокристалла, которую в простом приближении можно считать пропорциональной производному $Z_1^2 Z_2^2 E^{-1} \gamma$. В таблице приведено отношение $\gamma / Z_1^2 Z_2^2 E^{-1} \gamma$.

Оно не сильно отличается для всех изученных случаев. Следовательно, подтверждается определенная корреляция повреждения монокристалла с ядерной тормозной способностью иона в веществе монокристалла. Поэтому можно считать, что механизм возникновения дефектов состоит в выбивании атомов из узлов решетки кулоновским полем бомбардирующих тяжелых ионов.

Основным результатом работы является получение зависимости глубины тени от плотности дозы $\chi(I)$ при облучении монокристалла GaP ионами P и Ag и установление корреляции степени повреждения монокристалла с ядерной тормозной способностью иона в веществе.

Авторы благодарны Г.Н.Флерову и Ю.Ц.Оганесяну за интерес к работе, Г.Отто за предоставление монокристалла GaP, группам ионного источника и эксплуатации циклотрона У-300 за получение пучков ионов с нужными параметрами.



Зависимость измеренных значений глубины теневого минимума от плотности дозы облучения: а/ $W + {}^{40}\text{Ag}$ для кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$; б/ $\text{GaP} + {}^{31}\text{P}$ - $\langle 110 \rangle$; в/ $\text{GaP} + {}^{40}\text{Ag}$ - $\langle 110 \rangle$; г/ $\text{GaP} + {}^{40}\text{Ag}$ - $\langle 111 \rangle$.

Таблица. Результаты измерения степени радиационного повреждения монокристаллов

Ион	$^{12}\text{C}^*$	$^{22}\text{Ne}^*$	$^{40}\text{Ar}^*$	^{31}P	^{40}Ar	^{40}Ar
Энергия	8I	174	24	3I	24	24
Мишень	UO_2	W	W	GaP	GaP	GaP
Направление регистрации	$\langle \text{IIO} \rangle$ 150°	$\langle \text{III} \rangle$ 161°	$\langle \text{III} \rangle$ 161°	$\langle \text{IIO} \rangle$ 95°	$\langle \text{IIO} \rangle$ 95°	$\langle \text{III} \rangle$ $58,5^\circ$
Толщина слоя мгсм ⁻²	5,8	3,3	2,25	0,84	1,02	0,95**
$\tau (\pm 25\%)$, 10^{-18} см^2	2,8	9,0	196	110	110	120
$\tau/z_1^2 z_2^2 v^{-1} \gamma$, $10^{-20} \text{ см}^2 \text{ МэВ}$	1,48	2,37	1,21	3,53	1,48	1,62

* Результаты работ^{/2,3/}. Введены некоторые уточнения, в частности связанные с использованием тормозной способности ^{40}Ar по данным^{/6,7/}.

** Приведено значение, относящееся к регистрации рассеянных ионов ^{40}Ar , исключая ядра отдачи Ga и P.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. of the VII Int. Conf. on Atomic Collisions in Solids, Moscow Univ. Publishing House, M., 1981.
2. Бугров В.Н., Карамян С.А. ОИЯИ, P7-81-184, Дубна, 1981.
3. Бугров В.Н., Карамян С.А. ОИЯИ, P14-81-714, Дубна, 1981.
4. Экспериментальная ядерная физика /под ред. Э.Сегре/. ИИЛ, М., 1955.
5. Northcliffe L.C., Schilling R.F. Nucl. Data Tables, 1970, vol. A7, p. 233.
6. Mokler P.H. Ion-Solid Interaction Phenomena Studied at the Heavy Ion Accelerator, UNILAC. In: Ref. 1, vol. 1, p. 270.
7. Pape H., Clerc H.G., Schmidt K.H. Z. Phys., 1978, vol. A286, p. 159.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1982 года.

Бугров В.Н., Карамян С.А.

P14-82-325

Радиационное повреждение монокристалла GaP
ионами ^{31}P и ^{40}Ar

С целью количественного исследования радиационного повреждения монокристаллы фосфида галлия облучались ионами ^{31}P с энергией 31 МэВ и ^{40}Ar - 24 МэВ. Упругорассеянные ионы фиксировались в процессе облучения пластиковыми трековыми детекторами для получения теневой картины. Прослежена зависимость глубины теневого минимума от плотности дозы облучения в интервале от $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Установлена корреляция повреждающего действия иона с величиной его ядерной тормозной способности в веществе мишени.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Bugrov V.N., Karamian S.A.

P14-82-325

Radiation Damage of GaP Single Crystal
with ^{31}P and ^{40}Ar Ions

The single crystals of gallium phosphide are irradiated by ^{31}P ions with 31 MeV energy and ^{40}Ar - with 24 MeV in order to obtain the quantitative information on radiation damage. Elastic scattered ions are fixed by plastic track detectors during the irradiation to record the blocking pattern. The dependence of the blocking-minimum depth on irradiation fluence at the interval from $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ up to $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ is followed. The correlation between the ion damage action and nuclear stopping power of the ion in the target substance is established.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.