

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ АТОМОВ ДЕЙТЕРИЯ В РЕШЕТКЕ КРИСТАЛЛА $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

А. Ю. Гринченко, В. С. Коневский, Е. В. Кривоносов, Л. А. Литвинов,  
В. А. Олейник

Одним из важных вопросов физики твердого тела является вопрос о местоположении примесных атомов в кристаллической решетке. Это связано с тем, что от позиции атомов примеси зависят механические, оптические, электрические и др. свойства легированных структур. Главными факторами, определяющими поведение растворенных атомов в решетке кристалла, являются ионный радиус примесного элемента, его электроотрицательность, координационное число, несовершенства кристаллической структуры, определяющие топологию кристаллического поля [1, 2]. Важные для практических применений примесные атомы водорода в зависимости от положения в кристаллической решетке корунда могут образовывать разные активаторно-вакансионные комплексы, ответственные за отличия структурно-чувствительных свойств кристалла. Поведение атомов водорода (дейтерия) в кристаллической решетке твердых тел является особенно сложным. Вследствие малых размеров иона ( $0.36 \text{ \AA}$ ), электроотрицательности и наличия одной валентной связи дейтерий может занимать различные междоузельные положения [3].

В настоящей работе с помощью обратного рассеяния и ядерной реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ , возбуждаемой каналированными ионами изотопа  $^3\text{He}$ , исследована локализация атомов дейтерия в кристаллической решетке  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , введенных в кристалл методом термической диффузии.

Из монокристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , выращенных методом Киропулуса, вырезали образцы размером  $20 \times 5 \times 4$  мм, плоскости среза которых ориентировали по кристаллографическим плоскостям (0001), (1120) и (1010) с точностью  $\pm 2^\circ$ . Кристаллы полировали и последовательно отжигали в вакууме при  $2040^\circ\text{C}$  в течение 1 ч и в атмосфере  $\text{D}_2$  при  $1600^\circ\text{C}$  в течение 6 ч.

Для идентификации растворенных атомов дейтерия применялась ядерная реакция  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ , возбуждаемая ионами гелия-3 с энергией  $\sim 750$  кэВ. Анализирующий пучок диаметром 2 мм с угловой расходимостью  $0.03^\circ$  падал на монокристаллическую мишень  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 : \text{D}$ , закрепленную в трехосном гониометре, который позволял осуществлять угловое сканирование с шагом  $0.05^\circ$ . Одновременно спектрометрировались поверхностно-барьерным детектором ионы  $^3\text{He}$ , упругорассеянные на атомах кислорода и алюминия, и кольцевым полупроводниковым поверхностно-барьерным детектором, максимально приближенным к поверхности мишени, высокоэнергичные протоны реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ . Перед кольцевым детектором помещалась алюминиевая фольга толщиной 0.6 мм для поглощения обратнорассеянных ионов гелия-3 и  $\alpha$ -частиц реакции. Для предотвращения накопления поверхностного заряда мишень покрывали алюминиевой фольгой толщиной 100 мкм с отверстием  $d=3$  мм.

Концентрация дейтерия в кристаллах составила  $2 \cdot 10^{-4}$  ат. %.

Для определения позиций, занимаемых примесными атомами дейтерия в решетке  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 : \text{D}$ , использовалось явление каналирования заряженных частиц в кристалле [4]. Измерения нормированных выходов продуктов ядерных взаимодействий каналированных ионов с собственными атомами решетки и атомами примеси позволяют получить прямую информацию о местоположении примеси с достаточно высокой точностью (до  $0.1 \text{ \AA}$ ) [5].

В настоящей работе исследованы ориентационные зависимости выхода протонов реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$  и ионов  $^3\text{He}$ , упругорассеянных на атомах катионной и анионной подрешеток кристалла в окрестности осей  $\langle 0001 \rangle$ ,  $\langle 1010 \rangle$  и плоскостей (1010), (1120). Выходы протонов и ионов  $^3\text{He}$  норми-

ровались к результатам измерений при полной разориентации направленного анализирующего пучка и кристаллографических направлений. Экспериментальные результаты для нескольких образцов, насыщенных дейте-

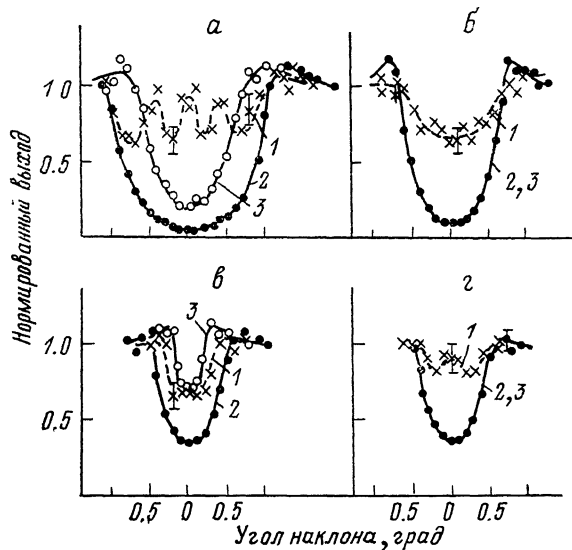


Рис. 1. Угловые зависимости нормированного выхода в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 : \text{D}$ .

$a - \langle 0001 \rangle$ ,  $б - \langle 10\bar{1}0 \rangle$ ,  $в - \langle 11\bar{2}0 \rangle$ ,  $г - \langle 10\bar{1}0 \rangle$ . 1 — протонов из реакции  $\text{D}({}^3\text{He}, \text{P}){}^4\text{He}$ ; 2 — ионов изотопа  ${}^3\text{He}$ , упругорассеянных на атомах кислорода; 3 — ионов изотопа  ${}^3\text{He}$ , упругорассеянных на атомах алюминия. Для оси  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  и плоскости  $(10\bar{1}0)$  выходы обратного рассеяния от катионной и анионной подрешеток практически совпадают. На рисунке показана также величина статистической ошибки эксперимента.

рием в идентичных условиях отжига, в пределах статистической ошибки измерений совпадают и имеют характерный вид (рис. 1). На рис. 2 представлены проекции цепочек и плоскостей атомов алюминия и кислорода для соответствующих направлений кристалла.

Угловая зависимость выхода протонов реакции для оси  $\langle 0001 \rangle$  имеет сложный вид и может быть представлена в виде суперпозиции трех кривых: центрального пика вблизи  $0^\circ$ , двух симметричных максимумов вблизи  $\pm 0.4^\circ$  и кривой, близкой по форме к кривой выхода упругорассеянных ионов гелия от подрешетки Al. Следовательно, часть атомов дейтерия занимает соответственно позиции, дающие проекцию вблизи централь-

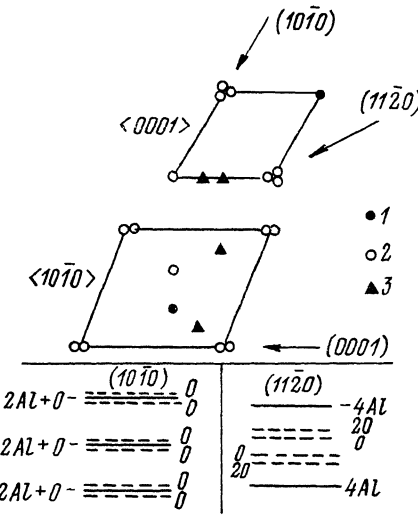


Рис. 2. Проекция атомов алюминия (1), кислорода (2) и дейтерия (3) на кристаллографические направления  $\langle 0001 \rangle$ ,  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ .

ной области канала  $\langle 0001 \rangle$  и в промежуточном положении между центральной областью и цепочками Al (междоузельные положения); другая часть атомов размещается в цепочках алюминия (катионные вакансии).

Ширина угловой зависимости выхода протонов от атомов дейтерия для плоскости  $(11\bar{2}0)$  больше соответствующей величины для кислорода, но несколько меньше, чем для алюминия. Кроме того, на ориентационной зависимости выхода реакции для плоскости  $(10\bar{1}0)$  на фоне общего падения

проявляется пик вблизи  $0^\circ$ . Такое поведение кривых означает, что междоузельные позиции, занимаемые атомами дейтерия, располагаются вдоль плоскостей  $(10\bar{1}0)$  кристалла (рис. 2, ось  $\langle 0001 \rangle$ ).

В направлении  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ , перпендикулярном базисной плоскости, наблюдается уменьшение выхода реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$  по мере совмещения оси пучка с осью  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ . Минимум углового распределения выхода протонов в реакции существенно выше соответствующего минимума обратного рассеяния от подрешетки алюминия. С учетом проекций позиций дейтерия, установленных для оси  $\langle 0001 \rangle$ , наиболее вероятными проекциями положений внедренных атомов в направлении  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  являются позиции, изображенные на рис. 2.

Таким образом, атомы дейтерия в решетке  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  занимают узлы катионной подрешетки и два междоузельных положения, которые локализованы вблизи плоскости кислородного слоя. Это согласуется с предположением о позициях водорода в решетке кристалла корунда по данным ИК-спектроскопии [6].

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Frerich H. P., Kolbitzer S. // Rad. Effects. 1984. V. 83. P. 135—142.
- [2] Antonic E. // Nucl. Instrum. and Meth. 1986. V. 14. P. 193—203.
- [3] Nilsen Bach B. // Phys. Rev. 1986. V. 37. N 11. P. 6353—6367.
- [4] Picraux S. T. // Nucl. Instrum. and Methods. 1981. V. 182/183. P. 413.
- [5] Swanson M. L. // Repts. Progr. Phys. 1982. V. 45. N 1. P. 66—68.
- [6] Волянец Ф. К., Сидорова Е. А., Сценгуро Н. А. // ЖПС. 1972. Т. 17. С. 1088—1091.

Научно-производственное объединение  
«Монокристаллреактив»  
Харьков

Поступило в Редакцию  
24 августа 1990 г.

В окончательной редакции  
31 мая 1991 г.

## МАГНИТОСТРИКЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$

С. М. Бармин, А. А. Севастьянов

В работе [1], посвященной изучению теплового расширения монокристаллов гексагонального ферромагнитного германида марганца  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ , было обнаружено, что магнитные вклады в температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР,  $\alpha$ ) для образцов, вырезанных вдоль осей легкого [001] и трудного [100] намагничивания, имеют сложную зависимость. С целью получения прямых данных о поведении магнитных составляющих ТКЛР ( $\alpha_m$ ) были исследованы полевые зависимости магнитострикции монокристаллов  $\lambda(H)$  при различных температурах. В работе использовались те же образцы, что и в [1], а магнитострикция измерялась методом наклеенного тензодатчика в магнитных полях до 15 Тл с погрешностью не более 5 %.

### 1. Экспериментальные результаты

Результаты измерения магнитострикции монокристаллов  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$  при различных температурах представлены на рис. 1.

В соответствии с термодинамикой полный коэффициент теплового расширения ферромагнитного материала можно представить в виде [2].