

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВНЕДРЕННЫХ АТОМОВ УГЛЕРОДА, АЗОТА И КИСЛОРОДА В РЕШЕТКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БИНАРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ТИПА $A^{III}B^V$

А. С. Деев, А. Ю. Гринченко, В. А. Олейник,  
П. А. Светашов, Н. А. Скажун

В центре внимания физики радиационных повреждений твердого тела стоят такие вопросы, как образование, миграция и отжиг радиационных дефектов, их микроструктура, локализация примесных атомов в ячейке кристаллической решетки и их взаимодействие с дефектами. Для адекватного описания ожидаемых изменений микроскопических свойств имплантированных материалов, в том числе широко используемых в микроэлектронике соединений типа  $A^{III}B^V$ , необходимо детальное понимание процессов, происходящих на атомном уровне в приповерхностных слоях.

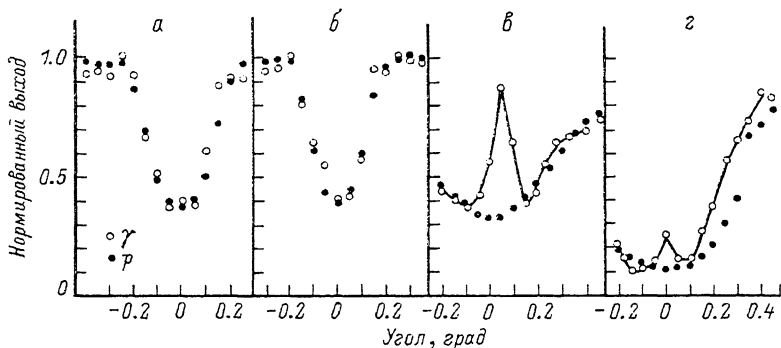


Рис. 1. Угловая зависимость выхода  $\gamma$ -квантов реакции  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$  (светлые точки) и кулоновского рассеяния протонов (темные точки) на атомах: *a* —  $\text{InAs}(\langle 110 \rangle, 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}, 60 \text{ кэВ})$ , *б* —  $\text{InAs}(\langle 110 \rangle, 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}, 60 \text{ кэВ})$ , *в* —  $\text{InSb}(\langle 100 \rangle, 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}, 60 \text{ кэВ})$ , *г* —  $\text{InSb}(\langle 110 \rangle, 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}, 60 \text{ кэВ})$ .

В настоящей работе для определения позиций внедренных атомов С, N, O и исследования структурных изменений в решетке бинарных кристаллов  $\text{InP}$ ,  $\text{InAs}$ ,  $\text{InSb}$  использован метод, основанный на эффекте пространственного перераспределения потока каналированных частиц в сочетании с ядерными реакциями, возбуждаемыми на атомах примеси [1].

Изучены ориентационные зависимости выхода  $\gamma$ -квантов реакции  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$  из кристаллов  $\text{InAs}$  и  $\text{InSb}$ , имплантированных ионами углерода с энергией 60 кэВ в диапазоне доз  $10^{15}$ — $10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 1 представлены угловые зависимости выхода реакции и обратно рассеянных на атомах матрицы протонов при сканировании вблизи осей  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$ . Использовался резонанс реакции при энергии 1747 кэВ. В случае кристалла арсенида индия около 95 % примесных атомов углерода располагается в узлах кристаллической решетки, что следует из совпадения угловых зависимостей выхода реакции и обратного рассеяния. В соединении антимонида индия наряду с основной замещающей компонентой присутствует междоузельная (не тетраэдрическая) компонента, доля которой с увеличением дозы внедрения возрастает. Именно эта компонента дает особенность (пик) в ориентационной зависимости выхода реакции в районе  $0^\circ$ .

Такое различное поведение амфотерной примеси может быть обусловлено различием в пределах растворимости углерода в указанных соеди-

нениях, влиянием радиационных дефектов на позиции атомов примеси, более высокой электроотрицательностью атомов углерода, чем у атомов индия, сурьмы и мышьяка. Так, в [2] показано, что местоположение атомов углерода в соединении GaAlAs меняется от междоузельного до замещенного по вакансиям подрешетки мышьяка в зависимости от концентрации углерода.

Для определения позиций атомов азота в кристаллической решетке InAs и InSb использована ядерная реакция  $^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$ , возбуждаемая каналированными протонами с энергией 750 кэВ. Энергии внедрения ионов азота  $^{15}\text{N}$  составляли 40—100 кэВ. Диапазон доз  $3 \cdot 10^{14}$ — $5 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ . Установлено, что большая часть атомов примеси непосредственно после имплантации в данные кристаллы занимает узлы кристаллической решетки. Доля атомов, локализованных в узлах, составляет 80—100 % для доз  $5 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  и энергий 70 и 100 кэВ. В процессе постимплантационного нагрева местоположение внедренных атомов азота существенно меняется и часть атомов примеси переходит в междоузельные положения.

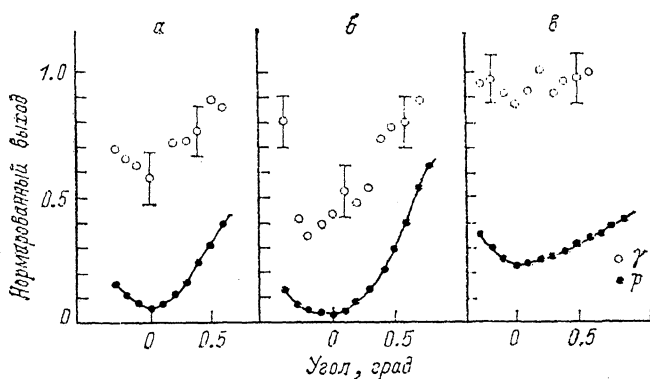


Рис. 2. Угловая зависимость выхода  $\alpha$ -частиц реакции  $^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}$  (светлые точки) и кулоновского рассеяния протонов (темные точки) на атомах: а — InSb ( $\langle 110 \rangle$ ,  $10^{15}$  см $^{-2}$ , 30 кэВ), б — InAs ( $\langle 110 \rangle$ ,  $3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ , 60 кэВ), в — InP ( $\langle 110 \rangle$ ,  $10^{15}$  см $^{-2}$ , 30 кэВ, отжиг при 540 °С, 20 мин).

Так, для InSb ( $10^{15}$  см $^{-2}$ , 70 кэВ) после отжига при 300 °С, 15 мин в узлах решетки остается не более 5 % атомов азота. В случае имплантации в соединение InP имеет место значительное нарушение структуры кристалла и уже при дозе имплантации  $10^{15}$  см $^{-2}$  для энергии 40 кэВ наблюдается полностью разупорядоченный слой материала. Восстановление структуры кристалла при отжиге идет с двух сторон: с его поверхности и со стороны радиационно ненарушенной матрицы. Здесь локализация примеси сложно связана с образованием и распадом радиационных дефектов. Например, для энергии внедрения 40 кэВ, доз  $5 \cdot 10^{14}$  и  $10^{15}$  см $^{-2}$ , 400—500 °С доля атомов в узлах составляет  $\sim 10$  %, а в случае энергии 100 кэВ уже 30—50 % атомов азота располагается в узлах для аналогичных параметров.

Измерены ориентационные зависимости выхода  $\alpha$ -частиц реакции  $^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}$ , возбуждаемой каналированными протонами с энергией 640 кэВ, из указанных кристаллов, облученных ионами кислорода. Энергия внедрения 30—120 кэВ, диапазон доз  $3 \cdot 10^{14}$ — $3 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ .

На рис. 2 представлены некоторые угловые зависимости выхода реакции и обратно рассеянных протонов. Степень замещения узлов решетки атомами кислорода непосредственно после внедрения значительно меньше, чем для Be, V, N, C в этих соединениях при аналогичных параметрах [3, 4]. Например, степень замещения узлов атомами кислорода в кристалле InSb составляет 71 % для дозы  $3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ , 49 % для  $10^{15}$  см $^{-2}$ , 30 % для  $3 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  при энергии имплантации 100 кэВ. Нагрев InSb всего до 210 °С, 15 мин приводит к выходу примеси из узлов.

Полученные экспериментальные данные по локализации атомов легких элементов позволили выявить основные закономерности в поведении

разновалентных имплантированных атомов в решетке кристаллических соединений типа  $A^{III}B^V$ : InP, InAs, InSb. Главными факторами, влияющими на позиции примеси, являются локальные химические связи [5], определяющиеся числом свободных связей атома и его электроотрицательностью, а также степень разупорядочения кристаллической структуры, определяющая топологию поля в решетке.

#### Список литературы

- [1] Gemmel G. // Rev. Mod. Phys. 1974. V. 46. N 1. P. 129—227.
- [2] Misdag M. A. // Nucl. Instr. Meth. B. 1986. V. 15. P. 328—332.
- [3] Скакун Н. А., Деев А. С., Стоянова И. Г. и др. // Поверхность. 1988. № 8. С. 144—146.
- [4] Скакун Н. А., Деев А. С., Олейник В. А. и др. // Материалы XVIII Всес. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 148—150.
- [5] Antoncik E. // Nucl. Instrum. Meth. B. 1986. V. 14. P. 193—203.

Харьковский физико-технический институт АН УССР

Поступило в Редакцию  
1 августа 1990 г.

УДК 539.89 : 536.464.1

© Физика твердого тела, том 33, № 7, 1991  
Solid State Physics, vol. 33, N 7, 1991

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КРИСТАЛЛАХ $ABF_6 \cdot 6H_2O$

М. В. Горев, И. Н. Флёров, К. С. Александров

Исследования оптических и теплофизических свойств ряда фторсилкатов и фтортитанатов с общей формулой  $ABF_6 \cdot 6H_2O$  (где  $A=Mg, Mn, Fe, Co, Zn, B=Ti, Si$ ) показали, что две группы кристаллов, образованные по принадлежности к разным пространственным группам исходной фазы, отличаются величинами изменения энтропии  $\Delta S$ , а также поведением двупреломления и теплоемкости [1]. Были обнаружены высокотемпературные фазы в кристаллах  $MgTiF_6 \cdot 6H_2O$  и  $MnSiF_6 \cdot 6H_2O$ . В то же время не наблюдались промежуточные фазы между ромбоэдрической (или тригональной) и моноклинной, существование которых предполагалось по данным ЯМР [2] и ЭПР [3] исследований в  $CoSiF_6 \cdot 6H_2O, CoTiF_6 \cdot 6H_2O, MgSiF_6 \cdot 6H_2O, ZnTiF_6 \cdot 6H_2O$ . Дейтерирование кристаллов не приводило к значительным сдвигам температур фазовых переходов (ФП)  $T_0$  [1].

С целью дальнейшего изучения различий ФП в двух группах семейства в настоящей работе исследовано влияние гидростатического давления на величины  $T_0$ . Насколько нам известно, ранее подобные исследования на кристаллах  $ABF_6 \cdot 6H_2O$  не проводились. В качестве объектов выбраны кристаллы с существенно отличающимися изменениями  $\Delta S$ : с одной стороны,  $CoSiF_6 \cdot 6H_2O, MnTiF_6 \cdot 6H_2O, ZnTiF_6 \cdot 6H_2O$  ( $\Delta S/R = 0.67 \div 0.95$ , пр. гр.  $R\bar{3}$ ), а с другой —  $MnSiF_6 \cdot 6H_2O, MgSiF_6 \cdot 6H_2O, MgTiF_6 \cdot 6H_2O$  ( $\Delta S/R = 0.19 \div 0.38$ , пр. гр.  $R\bar{3}m, P\bar{3}m1, P\bar{3}$ ). Измерения сдвига температуры ФП под давлением выполнены методом ДТА с использованием медь-германиевой термодпары в камере высокого давления, соединенной с мультипликатором. В качестве жидкости, передающей давление, использовалось трансформаторное масло или смесь масла с пентаном (для низких температур) [4].

Фазовые диаграммы первой группы соединений представлены на рис. 1. Для всех исследованных кристаллов с ростом давления характерно понижение температуры ФП из ромбоэдрической в моноклинную фазу