

05;12

Воздействие импульсных магнитных полей на реальную структуру кристаллов арсенида индия

© М.Н. Левин, Г.В. Семенова, Т.П. Сушкова,
Э.А. Долгополова, В.В. Постников

Воронежский государственный университет
E-mail: levin@lev.vsu.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2002 г.

На примере кристалла InAs показана возможность использования воздействий импульсных магнитных полей для повышения фазовой однородности и структурного совершенства бинарных фаз полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$.

Ранее сообщалось об уникальной способности относительно слабых (< 1 Т) импульсных магнитных полей (ИМП) воздействовать на реальную структуру и физические свойства диамагнитных кристаллов. ИМП-индуцированные изменения микроструктуры были обнаружены в щелочно-галогидных кристаллах [1], а позже в полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$ [2] и кристаллах кремния, выращенных методом Чохральского (Cs–Si) [3]. Во всех случаях воздействие ИМП приводило к распаду имевшихся дефектных комплексов с образованием новых подвижных дефектов, участвующих в долговременном многоэтапном преобразовании реальной структуры кристалла. Интерпретация эффектов основана на представлениях о влиянии магнитных полей на кинетику спин-зависимых реакций радикальных пар [4]. Считается, что слабые магнитные поля снимают запреты на электронные переходы с изменением спина, способствующие ослаблению связей в дефектных комплексах, а собственно структурные перестройки происходят за счет тепловой и упругой энергии кристаллической решетки [3,5,6].

Несмотря на яркое макроскопическое проявление ИМП-индуцированных эффектов, имеющих квантовую природу, вопрос о возможности их использования для позитивной модификации кристаллов полупроводников оставался открытым.

Целью данной работы явилось определение возможности использования импульсных магнитных обработок для повышения качества кристаллов бинарных полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$.

В качестве модельного объекта был выбран кристалл InAs. Синтез кристаллов InAs проводился двухтемпературным методом с последующей направленной кристаллизацией расплава по методу Бриджмена. В качестве исходных компонентов использовали In марки ОСЧ-11-5 и As ОСЧ-9-5, дополнительно очищенный от оксидов двукратной сублимацией в вакууме. В один конец толстостенной кварцевой ампулы помещалась керамическая лодочка с индием, в другой — летучий компонент — мышьяк. Запаянная реакционная ампула, предварительно вакуумированная до остаточного давления $5 \cdot 10^{-4}$ гПа, помещалась в печь таким образом, чтобы температура лодочки с индием была на 5–10 К выше точки ликвидуса синтезируемого сплава. Необходимое давление в системе устанавливалось заданием температуры „холодной“ зоны с летучим компонентом в соответствии с температурной зависимостью давления насыщенного пара твердого мышьяка. Полученные слитки имели крупноблочную структуру. Исследования проводились на образцах размером $5 \times 4 \times 4$ мм, вырезанных из центральной части слитка. Исследуемая поверхность подвергалась механической полировке.

Исследования воздействия ИМП на кристаллы InAs проводились методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМ) и рентгеновской дифрактометрии (РД).

Методом РСМ исследовалось распределение химических элементов по поверхности образца. Исследования проводились в растровом электронном микроскопе CamScan S4 с системой рентгеновского энергодисперсионного анализа Link AN10/55S. Планарное распределение элементов определялось в приповерхностном слое толщиной ~ 1 мкм по характеристическому рентгеновскому излучению, возбуждаемому при сканировании поверхности образца электронным пучком. Рентгеноструктурные исследования проводились методом порошка на дифрактометре ДРОН 4-07 с фильтрованным $Co K_\alpha$ излучением ($\lambda = 0.154059$ нм). Дифрактограммы измерялись в режиме автоматического углового перемещения образца с шагом 0.1° , временем экспозиции 1 с в каждой точке и вращением образца в собственной плоскости.

Воздействие ИМП осуществлялось серией 1500 симметричных треугольных импульсов с амплитудой $B = 0.3$ Т, длительностью $t = 4 \cdot 10^{-5}$ с и частотой следования $f = 50$ Hz. Импульсы магнитного

поля формировались разрядами батареи конденсаторов через низкоиндуктивный соленоид. При ИМП обработке образцы в соленоиде специальным образом не ориентировались. Образцы обрабатывались и хранились при $T = 300\text{ К}$ вместе со спутниковыми образцами, не подвергавшимися обработке ИМП.

По данным РСМ кратковременное (секунды) воздействие ИМП на кристалл InAs инициирует в нем долговременный (тысячи часов при $T = 300\text{ К}$) двухстадийный процесс фазовых превращений. Результат воздействия ИМП наглядно представлен на рис. 1.

На первой стадии имеет место выделение компонентов соединения в отдельные фазы (рис. 1, *b*), а на второй происходит обратный процесс — растворение выделившихся фаз с восстановлением химического соединения InAs (рис. 1, *c*). Сравнение исходного и конечного состояний кристалла свидетельствует о повышении однородности его фазового состава в результате воздействия ИМП, по крайней мере в приповерхностном слое толщиной $\sim 1\ \mu\text{м}$. Характеристики спутникового образца, вырезанного из того же слитка, но не подвергавшегося воздействию ИМП, за это время не менялись.

По данным РД, представленным на рис. 2, воздействие ИМП приводило к необратимому повышению степени текстурированности образцов InAs.

До обработки дифрактограмма имела три четко выраженные линии, соответствующие плоскостям (111), (220) и (311) кристалла InAs. В результате воздействия ИМП происходило многократное возрастание интенсивности линии (220) по отношению к интенсивностям линий (111), (311) и фона, что указывает на повышение степени текстурированности образца в направлении $\langle 110 \rangle$ и является показателем улучшения структуры кристалла.

Основным фактором чувствительности кристаллов InAs к ИМП, видимо, следует считать наличие комплексов собственных точечных дефектов, способных распадаться под слабым магнитным воздействием. Доминирующими в соединениях $A^{III}B^V$ являются дефекты нестехиометрии, обусловленные вакансиями элемента пятой группы, и антиструктурные дефекты, формирующие между собой вакансионно-дефектные комплексы [7].

С учетом развитых ранее модельных представлений, наиболее вероятным стартовым механизмом воздействия ИМП на кристаллы полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ представляется ослабление

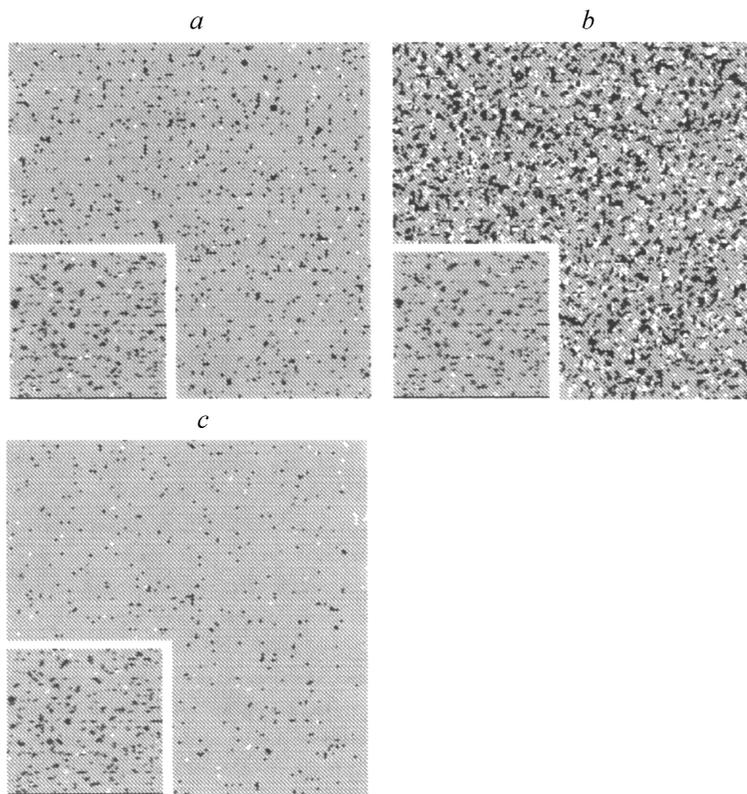


Рис. 1. Планарное распределение фаз в приповерхностном слое $\sim 1 \mu\text{m}$ кристалла InAs: *a* — до воздействия, *b* и *c* — через 5 и 50 суток после воздействия ИМП соответственно. Увеличение $\times 500$. На вставках — спутниковый образец, не подвергавшийся обработке в ИМП.

напряженных химических связей в исходных вакансионно-дефектных комплексах за счет магнитоиндуцированных интеркомбинационных переходов электронов, участвующих в формировании этих связей. Предположение об ИМП-индуцированном распаде комплексов собственных дефектов кристаллов $A^{III}B^V$, сопровождающимся появлением подвижных точечных дефектов — вакансий и собственных атомов, позволяет

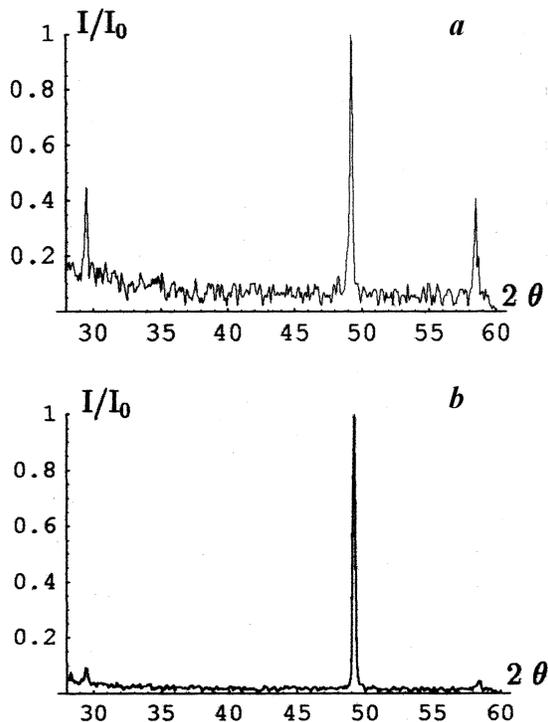


Рис. 2. Дифрактограммы кристалла InAs: *a* — до воздействия ИМП, *b* — через 10 суток после воздействия ИМП. I/I_0 и 2θ — относительная интенсивность и угол дифракции соответственно.

понять локальное выделение компонентов бинарных фаз на поверхности, являющейся естественным стоком для дефектов. Образовавшиеся в результате распада исходных дефектных комплексов фазы отдельных элементов являются метастабильными и распадаются с образованием бинарного соединения, результатом чего является гомогенизация кристалла и снижение его дефектности. Длительность этих процессов определяется скоростью диффузии точечных дефектов — собственных атомов кристалла при данной температуре ($T = 300$ К в проводившихся экспериментах).

Основной вывод работы заключается в том, что кратковременные воздействия ИМП на кристаллы InAs инициируют долговременные изменения их фазового, структурного и термодинамического состояний, приводящие к повышению однородности состава и структурного совершенства кристаллов.

Таким образом, воздействия ИМП могут быть эффективно использованы для улучшения качества кристаллов бинарных фаз типа $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$.

Список литературы

- [1] Дистлер Г.И., Каневский В.М., Москвин В.В., Постников С.Н., Рябинин Л.А., Сидоров В.П., Шнырев В.Г. // Докл. АН СССР. 1983. Т. 268. С. 591–593.
- [2] Давыдов В.Н., Лоскутова В.А., Найден Е.П. // ФТП. 1989. Т. 23. № 9. С. 1596–1600.
- [3] Левин М.Н., Зон Б.А. // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. № 4. С. 1373–1397.
- [4] Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л. // УФН. 1988. Т. 155. № 1. С. 3–45.
- [5] Molotskii M.I. // Material Science and Engineering A. 2000. V. 287. P. 248–258.
- [6] Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е., Дмитриевский А.А. // ЖЭТФ. 2000. Т. 117. № 6. С. 1080–1093.
- [7] Булярский С.В., Фистуль В.И. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1997. 352 с.