

УДК 621.315.592

XVIII симпозиум „Нанозифика и нанозлектроника“,  
Нижний Новгород, 10–14 марта 2014 г.

## Исследование деформационных полей, возникающих при изовалентном легировании GaAs фосфором и индием

© Д.А. Павлов, Н.В. Байдуш\*, А.И. Бобров<sup>†</sup>, О.В. Вихрова\*, Е.И. Волкова, Б.Н. Звонков\*,  
Н.В. Малехонова, Д.С. Сорокин

<sup>†</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 15 июня 2014 г.)

Методом геометрической фазы показано распределение упругих деформаций в системе, состоящей из слоя квантовых точек и захороненного под ним слоя фосфидированного арсенида галлия. Предложена гипотеза о возможности управления процессом формирования квантовых точек InAs в матрице GaAs посредством локального изовалентного введения фосфора.

### 1. Введение

Процесс формирования и оптоэлектронные свойства гетероструктур с квантовыми точками (КТ) в значительной степени определяются распределением деформаций и полей упругих напряжений в них [1,2]. Твердые растворы  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  имеют постоянную решетку, меньшую по сравнению с GaAs и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Благодаря этому при последовательном введении в матрицу GaAs фосфора и индия появляется возможность управления упругими деформациями по величине и знаку [1,2]. Таким образом, слои  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  могут применяться как для формирования напряжений перед слоем с квантовыми точками, например, для повышения поверхностной плотности последних, так и для ускорения релаксации напряжений в арсениде галлия над слоями InGaAs. Фосфидированные слои могут быть использованы для управления процессами формирования вертикально упорядоченных массивов квантовых точек  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , самоорганизующихся по механизму Странского–Крастанова [3,4]. Цель работы — демонстрация принципиальной возможности применения описанного выше подхода для создания квантово-размерных гетеронаносистем.

### 2. Методика эксперимента

Методом МОС-гидридной эпитаксии была выращена структура со слоем КТ InAs/GaAs (001) (рис. 1, а). Ее формирование осуществлялось при температуре подложки 520°C. Осаждению слоя InAs предшествовало формирование захороненного  $\delta$ -слоя  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$  путем термодиффузии фосфора в структуру арсенид галлия

за счет выдержки его ростовой поверхности в потоке фосфина при температуре 550°C. Время этого воздействия составляло 3 мин. Предполагалось, что фосфидированный  $\delta$ -слой приведет к увеличению упругих напряжений и деформаций в квантовых точках InAs при их формировании. Соответствующая гипотеза основывалась на информации о влиянии фосфора на образование гетеронаноструктур на основе GaAs и модели роста по механизму Странского–Крастанова [1,2,5]. В соответствии с этими представлениями фосфидированный слой должен сжимать осажденный над ним GaAs в плоскости роста (001). При этом предполагается, что происходит увеличение рассогласования деформированного таким образом GaAs относительно осаждаемого поверх него слоя с квантовыми точками InAs.

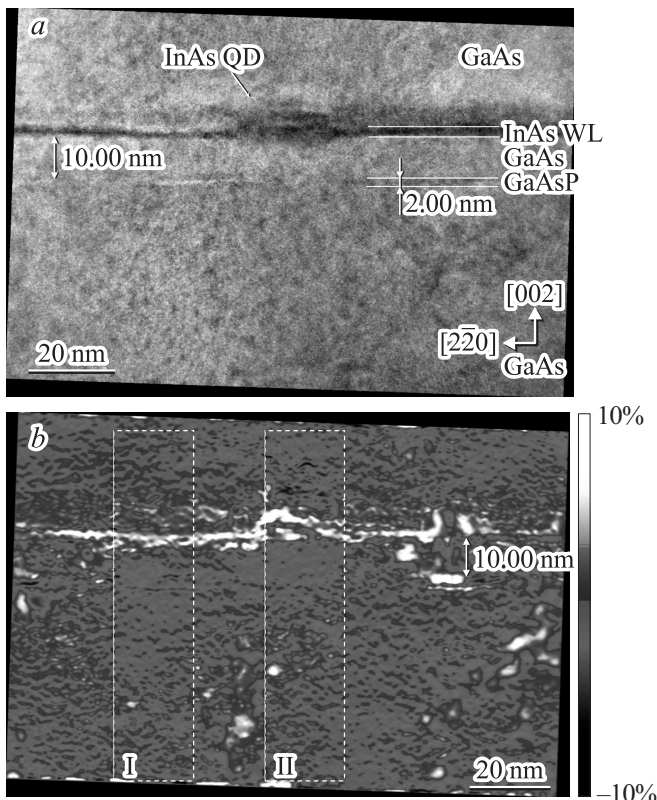
Структурный и элементный анализ исследуемых образцов проводился на просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения JEM-2100F, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (XEDS) X-Max Oxford Instruments. Препарирование образцов осуществлялось по стандартной технологии при помощи системы PIPS Gatan. Для построения карт распределения упругих деформаций по снимкам высокого разрешения применялось программное обеспечение Digital Micrograph и программный модуль Geometric Phase Analysis (GPA) [6]. Принцип работы модуля GPA основан на анализе периодичности фазового контраста на ПЭМ-снимках высокого разрешения [6,7]. Возникновение соответствующего контраста обусловлено когерентным рассеянием электронов на потенциале кристаллической решетки [8]. Таким образом, в нем заключена информация об искажениях в структуре исследуемого кристалла. Благодаря методу геометрической фазы эти деформации могут быть измерены и наглядно продемонстрированы [7,9].

<sup>†</sup> E-mail: bobrov@phys.unn.ru

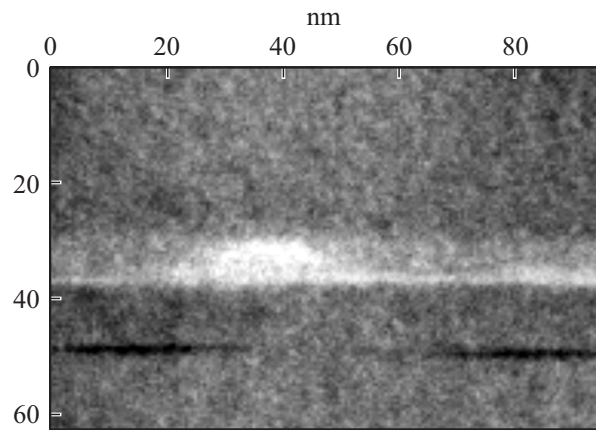
### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1, *a* представлен ПЭМ-снимок высокого разрешения исследованной структуры в области с квантовой точкой и отчетливо различимым слоем  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ . Фосфидированный слой отличается слабым светлым контрастом, что связано с меньшим атомным номером фосфора относительно галлия и мышьяка. В свою очередь темный контраст, которым выделяются квантовая точка и смачивающий слой, возникает вследствие формирования этих объектов с непосредственным участием индия — более тяжелого элемента относительно материала матрицы GaAs.

На рис. 1, *b* представлена карта распределения деформаций для ростового направления в области, показанной на рис. 1, *a*. Величина деформаций определялась относительно материала подложки. Нетрудно заметить, что в области формирования квантовой точки возникли значительные деформации. Так, непосредственно в квантовой точке искажения кристаллической решетки имеют положительный знак и локально достигают 9%. В области над квантовой точкой располагается область локального сжатия GaAs в ростовом направлении, что,



**Рис. 1.** *a* — ПЭМ-снимок высокого разрешения квантовой точки и фосфидированного слоя. Квантовая точка на снимке обозначена как InAs QD, смачивающий слой InAs—InAs WL. *b* — карта полей деформаций в направлении роста [001], полученная методом геометрической фазы. Белыми прямоугольниками обозначены области, по которым производилось построение профилей, представленных на рис. 3.



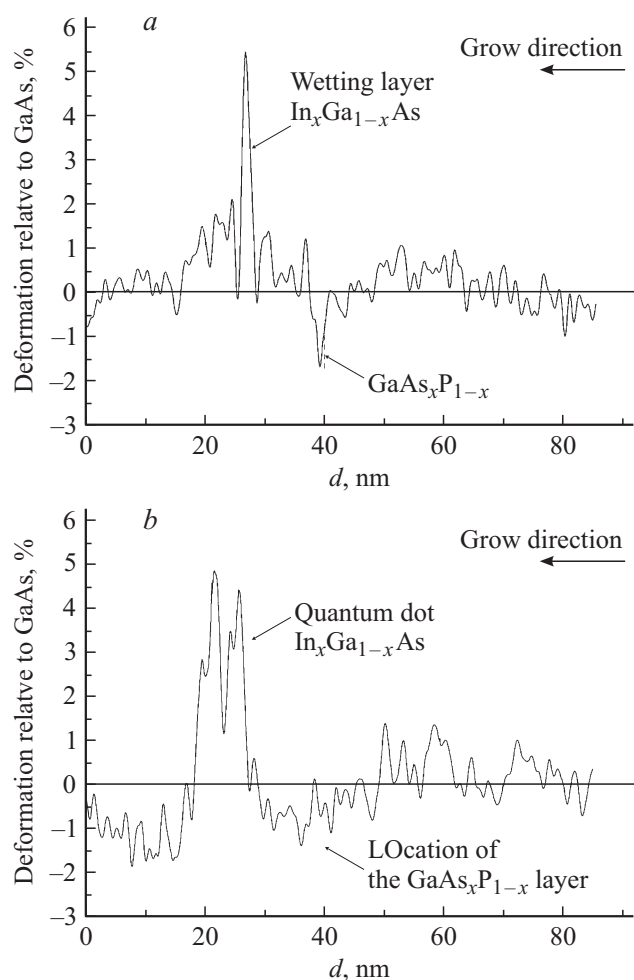
**Рис. 2.** Снимок квантовой точки, полученный в темнопольном режиме сканирующего просвечивающего электронного микроскопа. Светлый контраст соответствует арсениду индия, темный — GaAsP.

согласно работам [5,9], связано с релаксацией напряжений, создаваемых островком InAs.

Однако в рамках настоящей работы наибольший интерес представляет распределение деформаций в слое  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  и его окружении. На рис. 1, *b* на расстоянии  $(10.0 \pm 0.5)$  нм можно заметить синюю горизонтальную полосу. Эта область по своему положению соответствует слою, в котором производилось фосфидирование. На ПЭМ-снимках в этой области проявляется контраст, связанный с наличием фосфора (рис. 2). Темный цвет слоя GaAsP на карте полей деформаций свидетельствует о наличии в нем деформаций сжатия, что согласуется с общими представлениями о влиянии фосфора на кристаллическую структуру арсенида галлия [1,2].

Локальность проявления деформаций, связанных с фосфидированным слоем, обусловлена неоднородностью распределения фосфора при его осаждении на подложку. Так, на рис. 2 можно видеть, что фосфор образовал скопления по обе стороны от квантовой точки, но полностью отсутствует непосредственно под ней. Этот эффект является проявлением несовершенства использованной в работе технологии.

На профиле, изображенном на рис. 3, *a*, отчетливо выделяется область, в которой присутствует изovalентная примесь фосфора, характеризующаяся отрицательными деформациями. Над слоем GaAsP возникают положительные деформации, обусловленные подстраиванием GaAs под уменьшенные параметры кристаллической решетки. Влияние фосфора сохраняется вплоть до смачивающего слоя InAs. При этом в области под квантовой точкой (рис. 3, *b*), где имеет место обеднение слоя GaAsP, деформации в направлении [001] носят исключительно характер сжатия. Такие искажения структуры характерны для систем с квантовыми точками, полученных без каких-либо изменений, вносимых в материал подложки [5,9]. Таким образом, несмотря на ограниченность в настоящее время экспериментальных



**Рис. 3.** Профили упругих деформаций в направлении роста, построенные вдоль областей, отмеченных на рис. 1, *b* прямоугольниками: *a* — профиль упругих деформаций в смачивающем слое (I); *b* — профиль упругих деформаций в квантовой точке (II).

данных, основываясь на профилях упругих деформаций, представленных на рис. 3, можно сделать предварительный вывод о том, что фосфидированный слой оказывает непосредственное влияние на последующее формирование гетероэпитаксиальной структуры.

#### 4. Заключение

Изовалентные примеси индия и фосфора определяют формирование деформационных полей в структуре арсенида галлия, создавая в его решетке напряжения разного знака. Этот эффект может быть использован для контролируемого изменения межплоскостных расстояний на фронте ростовой поверхности в процессе создания гетеронаноструктур. Таким образом, открывается перспектива создания технологии, позволяющей управлять формированием как отдельных слоев квантовых точек, так и их вертикально упорядоченных массивов.

#### Список литературы

- [1] N. Nuntawong, Y.C. Xin, S. Birudavolu, P.S. Wong, S. Huang, C.P. Hains, D.L. Huffaker. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 193 115 (2005).
- [2] R.B. Laghumavarapu, M. El-Emawy, N. Nuntawong, A. Moscho, L.F. Lester, D.L. Huffaker. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 243 115 (2007).
- [3] V.G. Talalaev, J.W. Tomm, N.D. Zakharov, P. Werner, B.V. Novikov, A.A. Tonkikh. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2), 284 (2004).
- [4] M. Hanke D. Grigoriev, M. Schmidbauer, P. Scäfer, R. Köhler, R.L. Sellin, U.W. Pohl, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (15), 3062 (2004).
- [5] N. Shtinkov. *J. Appl. Phys.*, **114**, 243 513 (2013).
- [6] M.J. Hÿtch. *Scanning Microscopy*, **11**, 53 (1997).
- [7] A. Béché, J.L. Rouvière, J.P. Barnes, D. Cooper. *Ultramicroscopy*, **131**, 10 (2013).
- [8] David B. Williams, C. Barry Carter. *A Textbook for Materials Science* (Springer, N.Y., 2009).
- [9] N. Cherkashin, S. Reboh, M.J. Hÿtch, A. Claverie, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, B.R. Semyagin, V.V. Chaldyshev. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 173 115 (2013).

Редактор А.Н. Смирнов

#### Investigation of deformation fields generating in gallium arsenide by the use of isovalent impurity phosphorus and indium

*D.A. Pavlov, N.V. Bidus\*, A.I. Bobrov, O.V. Vichrova\*, E.I. Volkova, B.N. Zvonkov\*, N.V. Malekhonova, D.S. Sorocin*

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia  
\* Physicotechnical Reseach Institute, Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** Distribution of elastic deformations in the system, consisting of a quantum dot layer and a buried GaAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> layer, was studied using geometric phase analysis. A hypothesis was offered about possibility to control the process of formation of InAs quantum dots in a GaAs matrix by the use of local isovalent impurity of phosphorus.