

Рентгеноструктурные исследования гетероструктур на основе твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} : Si$

© П.В. Середин¹, В.Е. Терновая¹, А.В. Глотов¹, А.С. Леньшин¹, И.Н. Арсентьев², Д.А. Винокуров², И.С. Тарасов², Н. Leiste³, Т. Prutskij⁴

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Karlsruhe Nano Micro Facility, Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

⁴ Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico

E-mail: paul@phys.vsu.ru, arsenteyev@mail.ioffe.ru

Методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции и рентгеновского микроанализа изучен рост МОС-гидридных эпитаксиальных гетероструктур на основе тройных твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$, легированных высокими концентрациями атомов фосфора и кремния. Полученные эпитаксиальные пленки представляют собой пятикомпонентные твердые растворы $(As_xGa_{1-x}As_yP_{1-y})_{1-z}Si_z$.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-736.2011.2, грантов РФФИ № 12-02-31003 и 12-02-33040, а также частично поддержана фондом Университета Нотр-Дам, США.

1. Введение

Гетеропереходы $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ наиболее часто используют для изготовления квантово-размерных структур, поскольку эти материалы имеют достаточно близкие параметры решеток (расогласование решеток $\sim 0.15\%$) и потому позволяют создавать гетеропереходы с различными разрывами зон на границе [1,2]. Однако полное согласование по параметру в $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ невозможно, так как размер атомов алюминия больше размера атомов галлия и мышьяка. Поэтому при высоких концентрациях алюминия (x) в металлической подрешетке даже в такой хорошо согласованной гетеропаре возникают внутренние напряжения, которые могут приводить к нежелательным эффектам.

Альтернативой системе $Al_xGa_{1-x}As$ могут служить твердые растворы $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$. Так, в ряде работ [3,4] было предсказано, что за счет введение малых концентраций фосфора в слои $Al_xGa_{1-x}As$ позволяет уменьшить суммарные механические напряжения в гетероструктуре, а также обеспечить лучший отвод тепла при высоких токах накачки и, как следствие, увеличить выходную мощность лазерного диода на основе $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$. Получение гетероструктур на осно-

ве многокомпонентных систем твердых растворов дает возможность создавать компоненты оптоэлектронных устройств с более корректными характеристиками [5,6], так как появляется возможность не только варьировать ширину запрещенной зоны, находясь в области прямозонных составов, но и в достаточно широких пределах составов согласовывать слои по периоду решетки и коэффициенту температурного расширения [7].

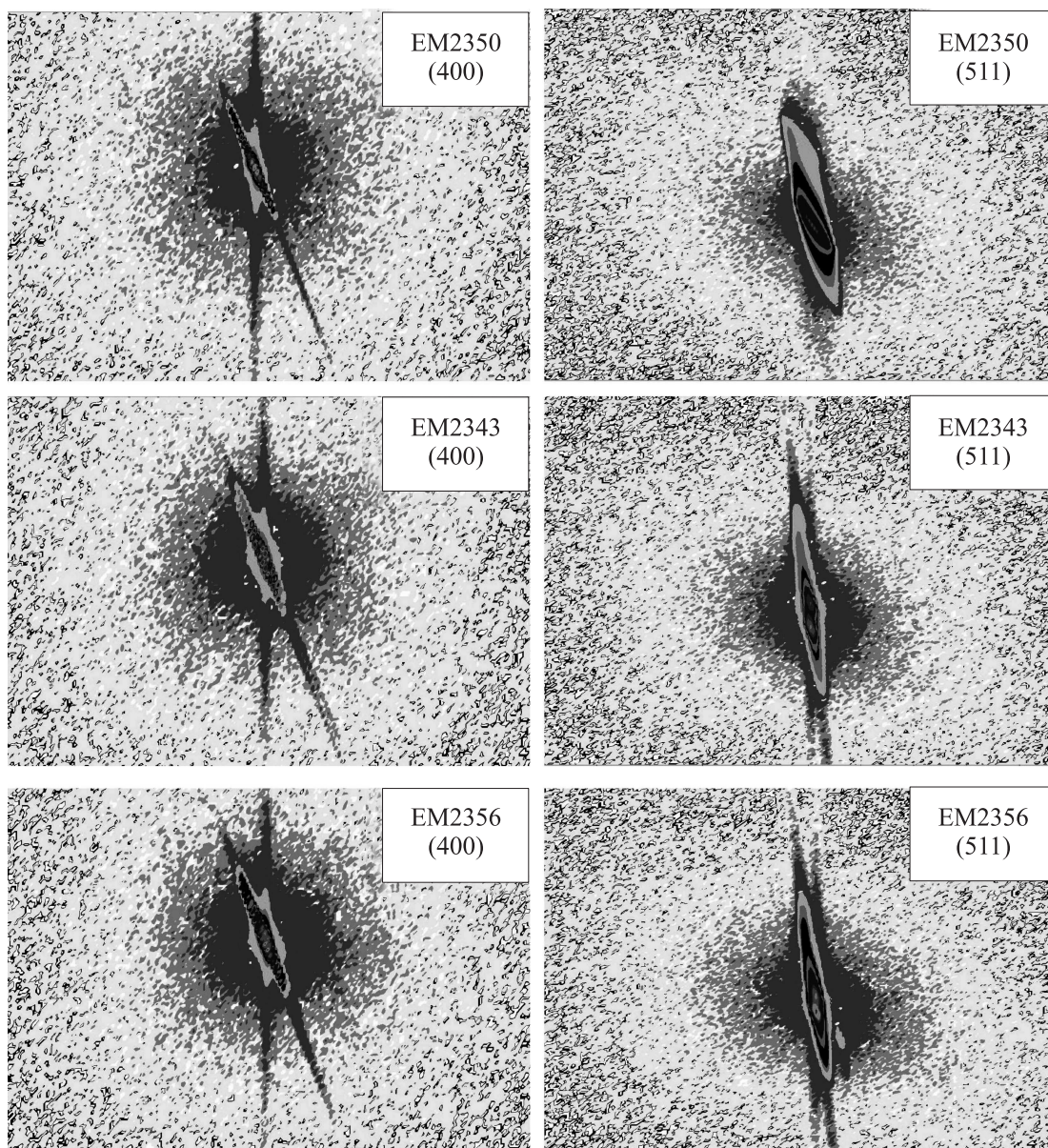
Поэтому целью настоящей работы является исследование структурных свойств многокомпонентных твердых растворов на основе $Al_xGa_{1-x}As$, легированных фосфором и кремнием.

2. Объекты и методы исследования

Технологические характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1. Твердые растворы $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ с толщиной $\sim 2\mu m$ были получены методом МОС-гидридной эпитаксии (эпитаксиальный рост из газовой фазы путем разложения металлорганических соединений (МОС)). В табл. 1 указан также поток легирующей примеси (которая состоит из 0.05 wt.% моносилана в водороде) в реактор. Концентрация носителей определялась с помощью эффекта Холла при

Таблица 1. Состав и условия роста гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} : Si$

Образец	Состав, $x, y, \text{at.}\%$	$T, ^\circ\text{C}$	Поток $\text{SiH}_4, \text{cm}^3/\text{min}$	Концентрация носителей, cm^{-3}
EM2350	GaAs	800	—	$3.6 \cdot 10^{16}$
EM2343	$x \sim 40, y \sim 98-99$	800	200	$8.19 \cdot 10^{17}$
EM2356	$x \sim 50, y \sim 98-99$	800	300	$4.56 \cdot 10^{17}$



Карты обратного q -пространства, полученные вокруг узлов (400) и (511) гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} : Si/GaAs(100)$.

комнатной температуре. Расчетное значение состава по фосфору ($1 - y$) составляло величину в районе 1–2 at.%. Фосфор вводился в слой с целью предполагаемой компенсации объемных напряжений, которые вызываются слаборассогласованными по параметру решетки, но значительными по толщине ($2\mu m$) слоями $Al_xGa_{1-x}As$.

Для оценки структурного качества полученных гетероструктур и определения параметров решеток эпитаксиальных твердых растворов использовался рентгеновский дифрактометр Seifert 3003 HR с четырехкружным гониометром и излучением меди.

Концентрации элементов в твердом растворе были уточнены методом рентгеновского микроанализа с применением приставки к электронному микроскопу.

3. Результаты и их обсуждение

Используя приставку для рентгеновского микроанализа, мы уточнили концентрации элементов, входящих в состав исследуемых твердых растворов. Для анализа использовалось ускоряющее напряжение электронов 20 kV и исследовались участки образца $\sim 750 \times 750 \mu m$. Эффективная глубина микроанализа составила $\sim 0.5 \mu m$. Данные рентгеновского микроанализа приведены в табл. 2. Как видно из полученных результатов, концентрации атомов фосфора и кремния в эпитаксиальной пленке гетероструктуры $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} : Si/GaAs(100)$ достигают сотых долей атомного процента, что достаточно для образования

Таблица 2. Результаты рентгеновского микроанализа эпитаксиальных пленок

Образец	Состав эпитаксиальной пленки по данным микроанализа, ат.%				
	n_{Al}	n_{Ga}	n_{As}	n_P	n_{Si}
EM2350	—	50.00	50.00	—	—
EM2343	16.37	33.06	50.00	0.53	0.04
EM2356	21.02	28.05	50.27	0.66	0.09

Таблица 3. Результаты высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии

Образец	Узел обратной решетки			
	(400)		(511)	
	$l/d, nm$	$a^\perp, \text{Å}$	$l/d, nm$	$a^\parallel, \text{Å}$
EM2350	—	—	—	—
EM2343	7.0705	5.6573	8.83836	5.6571
EM2356	7.0721	5.6560	8.84066	5.6557

твердых растворов в системе AlGaAsPSi, аналогично тому, что нам удалось наблюдать в случае роста высоколегированных кремнием твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ [8–10].

Изучение особенностей структуры и роста гетероструктуры на основе многокомпонентного твердого раствора мы проводили с использованием картирования обратного пространства. Построение карт обратного пространства для симметричного и асимметричного узлов позволяет определять параметры кристаллической решетки в направлении и плоскости роста, состав твердого раствора, кристалличность и качество эпитаксиального слоя, отличать наклон эпитаксиальной пленки от дилатации. Нами были получены карты распределения интенсивности дифрагированного излучения в q -пространстве вокруг симметричного узла (400) и асимметричного узла (511), которые приведены на рисунке.

Как следует из полученных экспериментальных результатов (см. рисунок), эпитаксиальная пленка многокомпонентной гетероструктуры растет частично релаксированной, о чем свидетельствуют положение и форма узлов в обратном пространстве как для симметричного, так и для асимметричного отражения. Отклонение линии интерференционных максимумов на карте узла (400) от направления q_x свидетельствует о росте на подложках, имевших изначальное угловое рассогласование с направлением (100).

Компоненты параметра кристаллической решетки в направлении (a^\perp) и в плоскости (a^\parallel) роста легко определяются исходя из данных, полученных из анализа карт обратного q -пространства для симметричного (400)

и асимметричного (511) отражений. Величина a^\perp может быть определена на основе информации о симметричном (400) рефлексе: $q_{400}^{epilayer} = \left(\frac{4^2}{a^\perp}\right)^{1/2}$, в то время как значение a^\parallel задается следующим соотношением с учетом данных для асимметричного (511) рефлекса: $q_{511}^{epilayer} = \left(\frac{5^2}{a^\parallel}\right)^{1/2}$. Здесь q — координаты узлов в обратном пространстве.

Результаты высокоразрешающей рентгеновской дифракции приведены в табл. 3.

4. Заключение

Анализ данных, полученных методами рентгеновской дифракции и рентгеновского микроанализа, позволят сделать ряд заключений. Во-первых, легирование фосфором и кремнием тройных твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии с различными составами, с концентрациями ~ 1 –2 ат.% по фосфору и долей атомного процента по кремнию, приводит к образованию пятикомпонентного твердого раствора AlGaAsPSi. Во-вторых, высокий уровень легирования кремнием должен был бы привести к более высокой концентрации носителей заряда в эпитаксиальной пленке в отличие от того, что показали холловские измерения ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Такие значительные отклонения от ожидаемых величин свидетельствуют об образовании глубоких уровней в твердом растворе, обусловленных сложными дефектами и комплексами, возникающими в результате образования твердых растворов с кремнием.

Изменение в структуре и стехиометрии в случае образования многокомпонентных твердых растворов на основе AlGaAsPSi должно проявиться в изменении оптических и энергетических характеристик материала, что служит поводом для продолжения начатой авторами работы.

Авторы благодарят KNMF (Карлсруэ, Германия) за предоставленный доступ к научному оборудованию.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32**, 1, 3 (1998).
- [2] Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Пер. с англ. под ред. Л. Ченга, К. Плога. Мир, М. (1989) 584 с.
- [3] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов. ФТП **46**, 10, 1344 (2012).
- [4] А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. ФТП **40**, 5, 628 (2006).

- [5] P.V. Seregin, A.V. Glotov, E.P. Domashevskaya, I.N. Arsenyev, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov. *Appl. Surf. Sci.* **267**, 181 (2013).
- [6] П.В. Середин, А.В. Глотов, Э.П. Домашевская, А.С. Леншин, М.С. Смирнов, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов. *ФТП* **46**, 6, 739 (2012).
- [7] В.В. Кузнецов, Л.С. Лунин, В.И. Ратушный. Гетероструктуры на основе четверных и пятерных твердых растворов $A^{III}B^V$. Изд.-во СКНЦ ВШ, Ростов н/Д (2003). 376 с.
- [8] P.V. Seregin, A.V. Glotov, E.P. Domashevskaya, I.N. Arsenyev, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov. *Physica B* **405**, 22, 4607 (2010).
- [9] П.В. Середин, А.В. Глотов, В.Е. Терновая, Э.П. Домашевская, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов. *ФТП* **45**, 4, 481 (2011).
- [10] П.В. Середин. Конденсированные среды и межфазные границы **12**, 3, 258 (2010).