

# Гетероструктуры со сверхрешетками GaAs/AlGaAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии: особенности роста, оптические и транспортные характеристики

© Н.В. Байдусь<sup>†¶</sup>, А.А. Бирюков<sup>†</sup>, Е.П. Додин\*, Ю.Н. Дроздов\*, М.Н. Дроздов\*, Ю.Н. Ноздрин\*, А.А. Андронов\*

<sup>†</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

\* Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Представлены результаты исследований закономерностей роста сверхрешеток GaAs/AlGaAs с узкими запрещенными мини-зонами методом МОС-гидридной эпитаксии. Измерены спектры фотолюминесценции, рентгеновской дифракции, определены профили распределения компонентов методом вторично-ионной масс-спектрометрии, распределение концентраций носителей заряда методом емкостного профилирования. Изучена связь технологических режимов выращивания гетероструктур с их кристаллическими характеристиками, люминесцентными и электрофизическими свойствами. Измерения фотолюминесценции свидетельствуют о высоком качестве сверхрешеток. Рентгеновская дифракция и данные по вторичным ионам подтверждают высокую периодичность сверхрешеток, выращенных в оптимизированных режимах. На сверхрешетках, выращенных в оптимальных режимах роста, получена нелинейная вольт-амперная характеристика с областью отрицательной дифференциальной проводимости при умеренных напряжениях и последующим, при больших напряжениях, ростом тока из-за туннелирования между мини-зонами. В области отрицательной дифференциальной проводимости наблюдались колебания тока на частотах  $\sim 60$  МГц. Отрицательная дифференциальная проводимость и осцилляции подтверждают наличие эффекта локализации электронов в умеренных электрических полях в первой мини-зоне проводимости, возникающей вследствие брэгговского отражения носителей в сверхрешетке.

## 1. Введение

Существующий в настоящее время интерес к полупроводниковым сверхрешеткам (СР) GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As в значительной степени связан с возможностью их применения в качестве генераторов СВЧ и терагерцового излучений (см., например, [1] и цитированную там литературу). В большинстве таких исследований используются короткопериодные сверхрешетки с широкой запрещенной мини-зоной, подобные тем, что рассматривались в пионерской работе Эсаки и Тсу [2]. Наш интерес к созданию качественных длиннопериодных СР продиктован желанием использовать активные свойства таких сверхрешеток для реализации стимулированного терагерцового излучения на основе резонансного туннелирования электронов между уровнями ваньештарковских лестниц, принадлежащих квантовым ямам, разнесенным на несколько периодов [3]. Для достижения максимального коэффициента усиления электромагнитного излучения необходимы сверхрешетки с оптимальным уровнем легирования (как показывают оценки,  $\sim (1-2) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> [3]) и относительно высокой подвижностью электронов. Необходимый энергетический спектр может быть реализован в СР GaAs/AlGaAs с широкими КЯ и узкими потенциальными барьерами. В обеспечении необходимой подвижности электронов

существенную роль играет высокая периодичность СР, что определяется степенью разброса размеров квантовых ям и барьеров СР, а также уровнем и однородностью их легирования.

Одной из основных проблем, возникающих для гетероструктур на основе твердого раствора AlGaAs из триметилгаллия (ТМГ), является высокое содержание кислорода и углерода в слоях [4]. Наличие кислорода связано с высокой окислительной способностью алюминия и приводит к созданию глубоких DX-центров. Углерод является акцепторной примесью и входит в растущий слой вследствие паразитной реакции разложения ТМГ. Снижение концентрации этих примесей является непростой задачей и достигается как дополнительной очисткой исходных реагентов, так и тщательным подбором технологических режимов выращивания. Несмотря на то что существует много публикаций по исследованию закономерностей роста СР при использовании метода молекулярно-лучевой эпитаксии, возможности метода МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) в этом отношении изучены недостаточно [1,4]. В связи с этим целью данной работы являлось исследование влияния температуры выращивания сверхрешеток на основе гетеропереходов GaAs/AlGaAs методом МОС-гидридной эпитаксии на их кристаллическую структуру, люминесцентные и электрофизические свойства, а также изучение их транспортных свойств в электрическом поле.

¶ E-mail: bnv@nifti.unn.ru

## 2. Образцы и методика эксперимента

Гетероструктуры были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на установке AIX 200RF (AIXTRON, Германия). Гетероструктуры выращены на проводящих подложках GaAs (001), имеющих отклонение от точной ориентации  $2^\circ$ . Источниками элементов являлись триметилгаллий, триметилалюминий и арсин. В качестве легирующей примеси использовался кремний из силана. Общая структура: подложка  $n^+$ -GaAs, буферный слой  $n^+$ -GaAs толщиной 0.5 мкм, сверхрешетка GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (200 периодов, 18/1.5 нм,  $x(\text{Al}) = 0.2$ ), контактный слой  $n^+$ -GaAs толщиной 0.2 мкм. В некоторых структурах между СР и GaAs с обеих сторон помещался переходный слой — СР с переменным периодом (до 7 периодов), ширина КЯ в нем увеличивалась на 1 нм на каждый период в направлении удаления от СР. Это было сделано для создания плавного профиля потенциала на границах СР—GaAs. Скорость роста СР составляла 0.2–0.3 нм/с.

Послойное распределение элементного состава по глубине гетероструктур контролировалось методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на приборе TOFSIMS-5. Рентгенодифракционные измерения проведены на приборе Bruker D8 Discover по линии излучения  $\text{CuK}\alpha_1$ .

Из выращенных гетероструктур для проведения оптических и электрофизических исследований были изготовлены два типа мезаструктур: а) мезаструктуры с барьером Шоттки (Au) и б) мезаструктуры с омическими контактами к  $n^+$ -слоям. Для создания мезаструктур с барьером Шоттки (БШ) верхний контактный  $n^+$ -слой стравливали. С использованием методов фотолитографии изготовлены мезаструктуры диаметром 500 мкм для БШ и набор квадратных мез с омическими контактами с размерами сторон 500 мкм. Омические контакты и БШ создавались напылением Au—Ge с последующим вжиганием при  $430^\circ\text{C}$  в течение 30 с. Гетероструктуры изучались методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) при возбуждении гелий-неоновым лазером при температуре 77 К. На мезаструктурах с БШ измерялись вольт-фарадные характеристики при прямом и обратном смещении для последующего вычисления профиля концентрации носителей заряда.

На мезаструктурах с омическими контактами проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и токовых неустойчивостей в режимах заданного постоянного или импульсного напряжения. В областях неустойчивости и токовых осцилляций за ток принималось среднее по времени значение. Для предотвращения теплового разрушения структур при больших напряжениях длительность приложенного импульса тока варьировалась в пределах 1–5 мкс с частотой повторения 1–10 Гц.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Для выбора оптимальных условий роста было изучено влияние температуры роста в интервале  $600\text{--}800^\circ\text{C}$

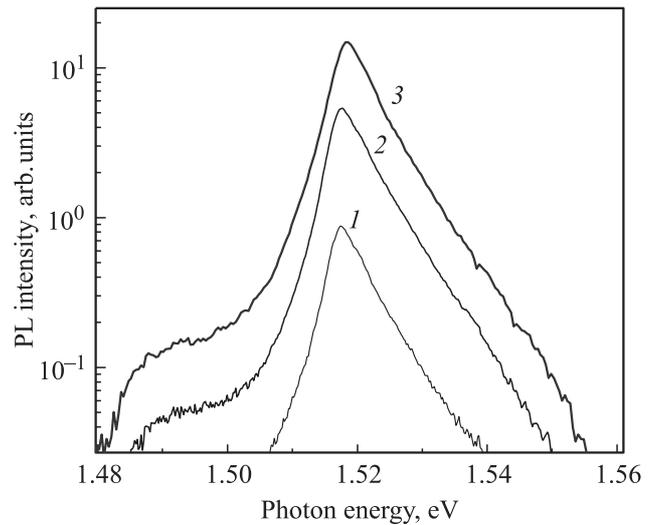
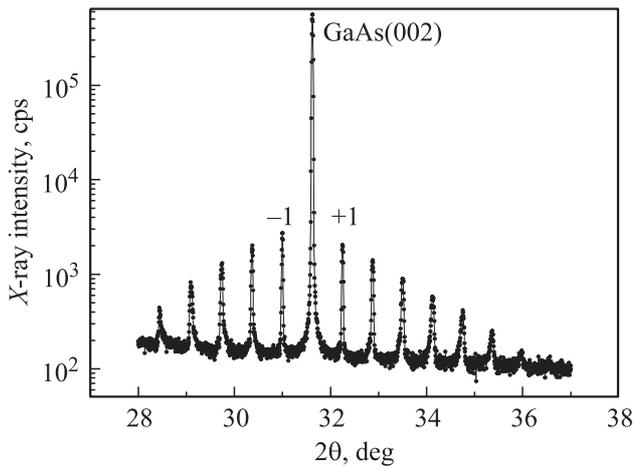


Рис. 1. Спектральные зависимости фотолюминесценции (PL) СР, выращенных при температурах  $650^\circ\text{C}$  (1),  $700^\circ\text{C}$  (2),  $750^\circ\text{C}$  (3).

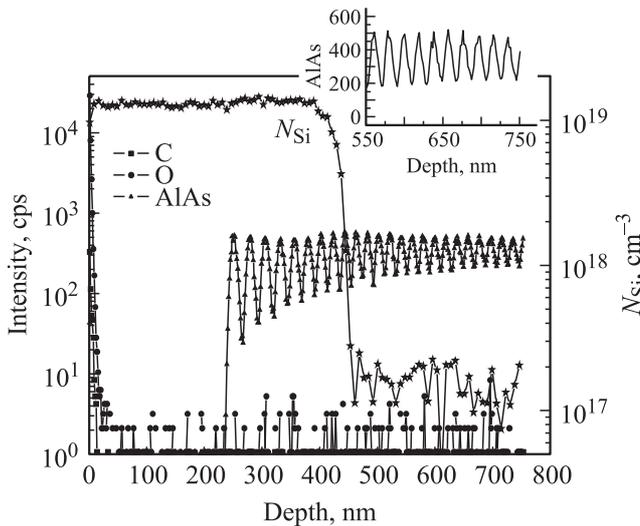
на такие параметры спектров ФЛ гетероструктур, как ширина спектра на половине высоты и интенсивность (рис. 1). Наблюдалось значительное (на порядки величины) возрастание интенсивности ФЛ при повышении температуры роста от  $650$  до  $750^\circ\text{C}$ . Дальнейшее повышение температуры роста не приводило к увеличению интенсивности, а приводило лишь к незначительному уширению спектра. Этот факт мы объясняем уменьшением концентрации кислорода в структурах и связанного с ним снижения концентрации центров безызлучательной рекомбинации [4]. Максимум спектральной зависимости ФЛ сдвинут относительно межзонного перехода в GaAs на  $10\text{--}11$  мэВ, что соответствует расчетному значению оптического перехода между мини-зонами электронов и тяжелых дырок ( $e1\text{--}hh1$ ) в СР. Минимальная наблюдаемая ширина спектра ФЛ для нелегированных СР была равна 6 мэВ при температуре измерений  $T = 77$  К, что соответствует  $k_B T$  для данной температуры. Это свидетельствует о достаточно высокой однородности периода СР, выращенной при оптимальной температуре роста  $750^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 приведен типичный спектр рентгеновской дифракции в режиме  $(2\theta\text{--}\omega)$ -сканирования в окрестности пика (002) GaAs. Четко проявляется наличие сверхпериода. По расстоянию между спутанными пиками определен период ( $D = 16.3$  нм). По уширению дальних спутантов оценена неоднородность периода  $\omega \approx 2.5\%$ , что не превышает двух монослоев GaAs в направлении [001].

Послойный элементный анализ проводился методом ВИМС. На рис. 3 приведены профили распределения компонентов в структуре со сверхрешеткой. На вставке показан профиль интенсивности сигнала ионов AlAs в линейном масштабе для нескольких периодов СР, он показывает высокую периодичность СР. Спадание модуляции профиля AlAs с глубиной связано с разви-



**Рис. 2.** Рентгенодифракционный спектр в режиме  $(2\theta-\omega)$ -сканирования в окрестности пика (002) GaAs структуры А568. Видны спутные пики до 7-го порядка, что свидетельствует о высокой периодичности и однородности структуры.



**Рис. 3.** Профили распределения элементов в гетероструктуре со сверхрешеткой, полученные методом ВИМС.

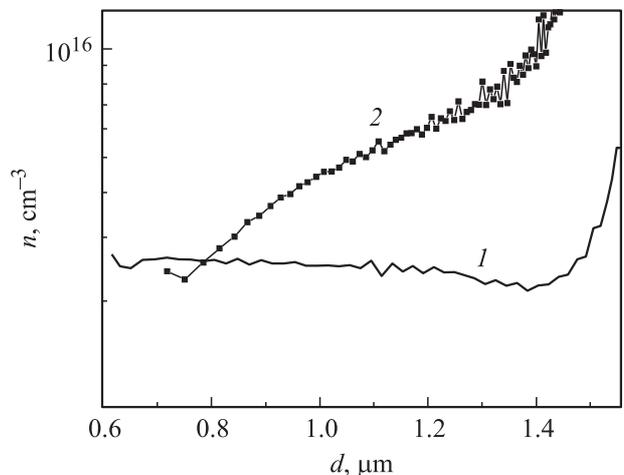
тием шероховатости дна кратера травления при послойном анализе. Уровень легирования контактных областей кремнием (концентрация  $N_{Si}$ ), а также верхней области СР составлял  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , основная часть СР легирована до уровня  $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Примеси углерода С и кислорода О регистрируются только в поверхностном слое структуры, в объеме слоя их концентрация не превышает  $(1-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Методом емкостного профилирования гетероструктур с БШ определялось распределение концентрации носителей заряда  $n$  по глубине  $d$  в СР [5]. На рис. 4 показаны два предельных случая для исследованных структур — однородное и неоднородное распределения. Концентрация электронов в СР зависела от температуры роста: она увеличивалась с температурой роста (от характерной для полупроводника при  $600^\circ\text{C}$  до  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

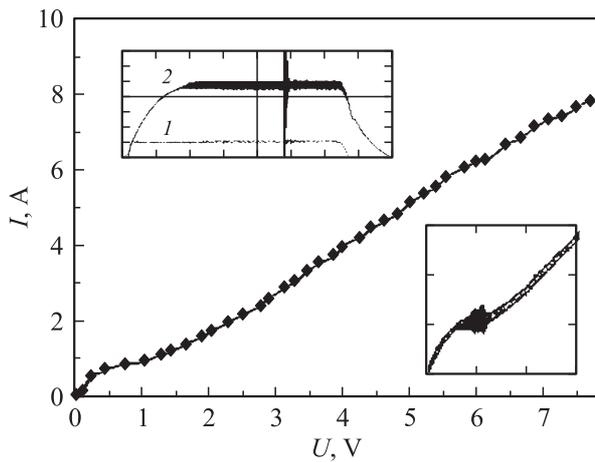
при  $750^\circ\text{C}$ ). От температуры роста также зависела однородность распределения концентрации вдоль оси роста. Более однородное распределение примеси было получено при низких температурах. Неоднородность концентрации с увеличением температуры роста мы связываем с диффузией атомов кремния из сильно легированного буферного слоя арсенида галлия при максимальных (для наших опытов) температурах роста [6]. Увеличению коэффициента диффузии кремния в арсениде галлия также может способствовать недостаточно высокое отношение компонент V/III в газовой фазе при росте гетероструктур.

Удовлетворительное качество СР (высокая интенсивность ФЛ и однородное распределение концентрации носителей заряда) достигалось при температуре выращивания  $750^\circ\text{C}$ , низкой скорости роста ( $0.3 \text{ нм/с}$ ) и высоком (более 100) отношении компонент V/III в газовой фазе. Для улучшения ВАХ важным условием является наличие переходных слоев между СР, буферным и покрывным слоями.

На рис. 5 показана ВАХ СР, выращенной в таких условиях (концентрация носителей заряда  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Характерной чертой ВАХ является наличие плато на зависимости среднего тока  $I$  от приложенного напряжения  $U$ . На вставке внизу показана ВАХ в области плато, при малых напряжениях. При напряжениях  $U \approx 0.25-1.25 \text{ В}$  наблюдаются области отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), обусловленные локализацией электронов в пределах первой мини-зоны проводимости. Здесь электрон, разогреваемый электрическим полем, достигает границы мини-зоны и, испытывая брэгговское отражение, меняет скорость на противоположную, что и приводит к падению средней скорости и тока. Падение тока приводит к возникновению ОДП и, как следствие, к образованию движущихся доменов электрического поля и возникновению осцилляций тока. На вставке сверху (рис. 5) показаны импульсы



**Рис. 4.** Профили концентрации  $n(d)$  в области СР, вычисленные из измерений вольт-фарадных характеристик диодов Шоттки. Температура выращивания  $600^\circ\text{C}$  (1) и  $800^\circ\text{C}$  (2).



**Рис. 5.** Полная ВАХ, измеренная на импульсах длительностью 6 мкс при температуре 77 К. На вставках: внизу — область ВАХ с ОДП в увеличенном масштабе;верху — импульсы напряжения (1) и тока (2). При напряжении 1 В, токе 0.83 А, наблюдаются осцилляции тока с частотой 60 МГц.

напряжения (кривая 1) и тока (кривая 2) при напряжении 1 В в области ОДП, где наблюдаются низкочастотные (десятки МГц) колебания тока, обусловленные такими доменами [3,7]. При повышении напряженности электрического поля возрастает вероятность зинеровского туннелирования носителей в высшие мини-зоны проводимости, что приводит к исчезновению ОДП и увеличению тока. Отсутствие особенностей, наблюдаемых ранее на ВАХ в [3,7], обусловленных резонансным туннелированием при больших напряжениях в области положительной дифференциальной проводимости, связано, по-видимому, с недостаточно высокой подвижностью электронов при конкретном уровне легирования структуры.

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты исследования влияния температуры роста сверхрешеток GaAs/AlGaAs с узкими запрещенными мини-зонами при использовании метода МОС-гидридной эпитаксии на их основные характеристики. Измерены спектры фотолюминесценции, рентгеновской дифракции, определены профили распределения компонентов методом ВИМС, распределение концентрации носителей заряда методом емкостного профилирования. Изучена связь технологических режимов выращивания гетероструктур с их люминесцентными и электрофизическими свойствами. Полученные закономерности влияния технологических режимов роста на характеристики выращенных структур в основном совпадают с описанными в литературе [4], однако причины наблюдающейся неоднородности распределения концентрации носителей в направлении роста слоев нуждаются в дополнительных исследованиях. Для СР, выращенных в оптимальных режимах роста, получена нелинейная вольт-амперная характеристика с

областью отрицательной дифференциальной проводимости при умеренных напряжениях и последующим, при больших напряжениях, ростом тока из-за туннелирования между мини-зонами. В области ОДП наблюдались колебания тока на частотах  $\sim 60$  МГц, что подтверждает хорошую периодичность и вполне удовлетворительные электрические свойства изготовленных сверхрешеток с числом слоев  $\sim 200$ .

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 10-02-00501а, 11-02-12165-офи-м-2011) и Министерства образования и науки РФ по ГК 16.552.11.7007.

#### Список литературы

- [1] Karl Leo. *High-Field Transport in Semiconductor Superlattices* [Springer Tracts in Mod. Phys., v. 187]. (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003).
- [2] L. Esaki, R. Tsu. *IBM J. Res. Dev.*, **14**, 61 (1970).
- [3] А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица. *Квант. электрон.*, **40** (5), 400 (2010).
- [4] G.B. Stringfellow. *Organometallic vapor-phase epitaxy: theory and practice*, 2nd ed. (Academic Press, California, USA, 1999).
- [5] В.И. Зубков. *Приложение к журналу „Вестник ИГРТУ“*, № 4, ISSN 1995-4565 (Рязань, 2009).
- [6] P. Murugan, R. Pothiraj, S.D.D. Roy, K. Ramachandran. *Bull. Mater. Sci.*, **25** (4), 335 (2002).
- [7] А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин. *ФТП*, **43** (2), 240 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Heterostructures with GaAs/AlGaAs superlattices grown by MOCVD: growth features, optical and transport characteristics

N.V. Baidus<sup>†</sup>, A.A. Biruykov<sup>†</sup>, E.P. Dodin\*, Yu.N. Drozdov\*, M.N. Drozdov\*, Yu.N. Nozdrin\*, A.A. Andronov\*

<sup>†</sup> Physico-Technical Research Institute of Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

\* Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The low pressure growth peculiarities of GaAs/AlGaAs superlattices grown by MOCVD were studied. The superlattices were investigated by photoluminescence, capacitance profiling, X-ray diffraction and second-ion mass-spectrometry (SIMS) methods. Photoluminescence measurements show a high optical quality of the superlattices. X-ray diffraction and SIMS profiles show high period homogeneity of the superlattices grown under optimized conditions. Transport measurements on mesa-structures with ohmic contacts show region of negative differential conductivity and current oscillations in the megahertz range, indicating the presence single miniband transport due to the Bragg reflections at moderate electric fields.