

Взаимосвязь конструкции метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs с содержанием InAs в активном слое 76–100% с морфологией их поверхности и электрофизическими свойствами

© И.С. Васильевский^{*¶}, Г.Б. Галиев⁺, Е.А. Климов^{**}, А.Л. Кванин^{*}, С.С. Пушкарев^{**+¶}, М.А. Пушкин^{*}

^{*} Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

⁺ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

(Получена 3 февраля 2011 г. Принята к печати 11 февраля 2011 г.)

Исследовано влияние конструкции метаморфного буфера на морфологию поверхности и на электрофизические свойства наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs с содержанием InAs в активном слое от 76 до 100% при использовании подложек GaAs и InP. Показано, что такие параметры, как подвижность и концентрация электронов, а также среднеквадратичная шероховатость поверхности существенно зависят от конструкции метаморфного буфера. Экспериментально установлено, что эти параметры в большей степени зависят от максимального локального градиента параметра решетки метаморфного буфера в направлении роста слоев, чем от среднего его значения. Показано, что подбором конструкции метаморфного буфера возможно создание наноструктурированных поверхностей с крупнопериодическим рельефом.

1. Введение

На сегодняшний день НЕМТ гетероструктуры с высоким содержанием InAs типа $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$, выращенные на подложках InP, позволяют изготовить самые быстродействующие СВЧ транзисторы с рекордно высокими значениями частоты отсечки f_T до 547–562 ГГц [1,2]. Это связано с уменьшением эффективной массы электронов при увеличении содержания InAs в активном слое НЕМТ структур и соответствующим увеличением подвижности и дрейфовой скорости насыщения электронов. Но относительно высокая стоимость подложек InP по сравнению с GaAs и их меньшая технологичность, в основном вызванная хрупкостью, привели к поиску альтернативных методов получения наногетероструктур с высоким содержанием InAs в активном слое с использованием подложки GaAs [3]. Известны работы, в которых методом МЛЭ выращивали толстые слои InAs непосредственно на подложке, и было показано, что для получения приемлемых электрофизических параметров толщина слоев должна быть достаточно большой (более 2–3 мкм) [4–6]. Но одним из самых удачных методов оказался метод использования так называемого метаморфного буфера (ММБ). Суть метода заключается в выращивании между подложкой и активными слоями толстого переходного слоя (метаморфного буфера) с изменяющимся по толщине химическим составом, который согласует подложку со слоями любого состава путем постепенного изменения параметра решетки при постепенной релаксации возникающих механических напряжений. Метаморфная технология позволяет получить „виртуальную“ подложку с требуемым параметром решетки, непосредственно на

которой уже выращиваются активные слои требуемого состава.

Первые работы по росту и использованию гетероструктур с ММБ относятся к 1990 годам [7–10]. В ряде работ [11–13] сообщается об использовании структур с ММБ для изготовления СВЧ приборов и представлены их характеристики. Кроме этого, в работах [14,15] приводятся данные о перспективности использования структур с ММБ на GaAs в pin-фотодиодах [14] и в устройствах спинтроники [15]. При использовании технологии ММБ в большинстве случаев сохраняется двумерный рост эпитаксиальных слоев с приемлемым структурным совершенством, однако поверхность полученной гетероструктуры имеет волнообразный рельеф. Такой рельеф возникает из-за полей деформации, создаваемых сетью образующихся дислокаций несоответствия [16]. Плотность дефектов на поверхности гетероструктуры и гладкость рельефа влияют на свойства гетероструктурных электронных приборов, в особенности при наноразмерных топологиях. Поэтому ключевой задачей в метаморфной технологии является получение достаточно совершенной поверхности ММБ при достижении требуемого параметра решетки. Как правило, для практических применений необходимо оптимизировать конструкцию и условия роста ММБ при его минимальной толщине [17].

Следует отметить, что в этих работах содержание InAs в активных слоях составляет от 30 до 52% и такие наногетероструктуры в основном используются для изготовления мощных и малощумящих транзисторов и монолитных интегральных схем [18]. Однако для приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, устройств спинтроники и оптоэлектронных приложений структуры с содержанием InAs от 70 до 100% могут оказаться более перспективными. Поэтому изучение различных конструкций ММБ, условий их

[¶] E-mail: ivasilevskii@mail.ru

^{¶¶} E-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

Таблица 1. Конструкция образцов 1–5

Образцы	1	2	3	4	5
	–	–	In _{0.78} Al _{0.22} As (300 Å)	In _{0.80} Al _{0.20} As (200 Å)	In _{0.71} Al _{0.29} As (217 Å)
δ-слой Si	–	–	+	+	+
Барьер	–	–	In _{0.78} Al _{0.22} As (70 Å)	In _{0.80} Al _{0.20} As (70 Å)	In _{0.71} Al _{0.29} As (61 Å)
Канал/ активный слой	n ⁺ -InAs (880 Å)	n ⁺ -InAs (480 Å)	InAs (127 Å)	InAs (99 Å)	In _{0.76} Ga _{0.24} As (164 Å)
		n-InAs (1130 Å)			
Залечивающий слой	i-InAs (1750 Å)	–	In _{0.78} Al _{0.22} As (0.20 мкм)	In _{0.81} Al _{0.19} As (0.21 мкм)	In _{0.71} Al _{0.29} As (0.16 мкм)
Inverse step	–	–	InAs (270 Å)	–	+
Сверхрешетка	–	–	+	–	–
ММБ	+	+	+	+	+
Сверхрешетка	–	–	+	–	–
Буфер	GaAs (440 Å)	GaAs (430 Å)	GaAs (690 Å)	–	In _{0.56} Al _{0.44} As (390 Å)
Подложка	GaAs	GaAs	GaAs	InP	InP

роста и характеристик наногетероструктур с высоким содержанием InAs в активной области (более 70%) является актуальной задачей.

Цель настоящей работы состоит в исследовании взаимосвязи между морфологией поверхности, электрофизическими свойствами и конструкцией как ММБ (Al, Ga)InAs, так и всей гетероструктуры с содержанием InAs в активном слое 76–100%. Под конструкцией ММБ мы в дальнейшем будем понимать распределение химического состава по толщине ММБ. При этом особенность данной работы заключается в том, что ММБ аккомодировал значительное рассогласование параметра решетки при сравнительно небольшой толщине.

2. Образцы и методика эксперимента

Для достижения высокого содержания InAs в активных слоях наногетероструктур с двумерным электронным газом необходимо выполнить ряд компромиссных условий по материалам, образующим активную область — квантовую яму (КЯ) между барьерами. Во-первых, необходимо создать барьерные слои, ограничивающие квантовую яму, создающие достаточно большой разрыв энергии зоны проводимости на границе КЯ для более жесткого ограничения электронов. Во-вторых, барьерные слои In_xAl_{1-x}As и слой квантовой ямы In_yGa_{1-y}As не должны заметно отличаться по параметру решетки, иначе полученная структура окажется

напряженной и ширину КЯ придется ограничить. Таким образом, нашей основной целью мы выбрали структуры, где в качестве барьерных слоев к КЯ In_yGa_{1-y}As с $0.7 < y < 1.0$ выступает In_xAl_{1-x}As с $0.7 < x < 0.8$. Но для выяснения закономерностей роста и свойств ММБ вначале были исследованы метаморфные структуры, в которых ММБ обеспечивал переход на чистый InAs.

Исследуемые образцы в количестве пяти штук были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке ЦНА-24 (Россия). Причем 3 образца (1, 2, 3) были выращены на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100), а 2 образца (4 и 5) были выращены на подложках InP с такой же ориентацией. Схематически структура образцов представлена в табл. 1. Образцы можно классифицировать по нескольким параметрам. Первые два образца (1, 2), выращенные на подложках GaAs, имеют объемно-легированный кремнием активный слой InAs с уровнем легирования $4.5 \cdot 10^{12}$ и $13.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Главное отличие этих образцов заключается в конструкции ММБ. В образце 1 использовался метод формирования ММБ не сплошным, а „цифровым“ твердым раствором In_xGa_{1-x}As с изменяющимся эффективным составом, т.е. в виде совокупности короткопериодных сверхрешеток [19]. Таким образом, в образце 1 вместо ММБ с плавным изменением мольной доли InAs выращены 5 сверхрешеток GaAs/In_{0.54}Ga_{0.46}As с переменной толщиной слоев

Таблица 2. Структурные параметры ММБ образцов

№	Подложка	ММБ	h , мкм	x_0	x_1	$[\text{grad}(a)]_{\text{max}}$, $\text{Å} \cdot \text{мкм}^{-1}$	$\langle \text{grad}(a) \rangle$, $\text{Å} \cdot \text{мкм}^{-1}$	RMS ₁ , нм	RMS ₂ , нм
1	GaAs	In _x Ga _{1-x} As	1.58	0	1.00	—	0.255	14.5	14.8
2	GaAs	In _x Ga _y Al _{1-x-y} As	1.46	0.04	1.00	1.3	0.264	5.0	5.3
3	GaAs	In _x Ga _y Al _{1-x-y} As	1.02	0.15	0.78	6.3	0.247	11.0	10.8
4	InP	In _x Al _{1-x} As	0.46	0.54	0.81	0.5	0.240	4.0	4.7
5	InP	In _x Al _{1-x} As	0.93	0.57	0.74	0.07	0.071	2.6	3.4

Примечание: h — толщина ММБ, x_0 и x_1 — начальная и конечная молярные доли индия в ММБ, $[\text{grad}(a)]_{\text{max}}$ — максимальный градиент параметра решетки ММБ, $\langle \text{grad}(a) \rangle$ — средний градиент параметра решетки ММБ.

и 5 сверхрешеток In_{0.54}Ga_{0.46}As/InAs по 10 периодов каждая. Для постепенного увеличения средней молярной доли InAs, в каждой последующей сверхрешетке увеличивалась толщина In-содержащих слоев и уменьшалась толщина слоев GaAs; отдельные слои сверхрешеток имеют толщину от 10 до 200 Å, средний период сверхрешеток ~ 150 Å.

В отличие от образца 1, в образце 2 использован метаморфный буфер InGaAlAs с непрерывным изменением состава по нелинейному закону.

Вторая серия образцов (3, 4, 5) отличаются от предыдущих главным образом тем, что они являются структурами с квантовыми ямами с односторонним δ-легированием кремнием через спейсер. Образец 3 выращен на подложке GaAs, а образцы 4 и 5 — на подложке InP. Параметр решетки InP вдвое ближе параметру решетки InAs, чем GaAs, поэтому использование метаморфной технологии на данной подложке позволило сократить толщину буфера и улучшить его структурное совершенство. Метаморфные буферы имеют непрерывно изменяющийся состав In_xGa_yAl_{1-x-y}As и In_xAl_{1-x}As в образцах на подложках GaAs и InP соответственно. Остальные особенности исследуемых структур и входящих в их состав ММБ отображены в табл. 1 и 2.

Электрофизические характеристики (концентрация и подвижность электронов проводимости при температурах 300 и 77 К) были измерены методом Ван-дер-Пау [20], полученные результаты представлены в табл. 3. Морфология поверхности образцов была исследована методом атомно-силовой микроскопии с помощью сканирующего мультимикроскопа СММ-2000 (Россия). По каждому измеренному скану рассчиты-

валась среднеквадратичная шероховатость поверхности (RMS) вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений, совпадающих с направлениями ориентации рельефа. Для каждого образца мы получили два значения RMS: RMS₁ и RMS₂, относящиеся к [01 $\bar{1}$] и [011] кристаллографическим направлениям соответственно. Направления были определены по базовым срезам подложек.

3. Обсуждение

ММБ образца 1 (ММБ-1) отличается от ММБ других образцов тем, что он является не сплошным, а образован „цифровым“ твердым раствором In_xGa_{1-x}As с изменяющимся эффективным составом. Для оценки распределения механической деформации в слоях ММБ принималась модель, в которой слои InAs и GaAs предполагались деформированными, причем деформация накапливалась на толщине порядка критической толщины без релаксаций. Для такого описания состав сверхрешеток усреднялся при помощи функции Гаусса с полушириной, равной критической толщине InGaAs для состава In_{0.5}Ga_{0.5}As, растущего на GaAs. Полученное в результате усреднения распределение деформаций является осциллирующей функцией со значительной амплитудой. Таким образом, с точки зрения механических деформаций колебания состава в сверхрешеточном ММБ не приводят к вполне усредненному составу.

Как видно из рис. 1, поверхность образца 1 неровная, содержит большое количество углублений в форме ромба, ориентированных вдоль направления [01 $\bar{1}$]. Глубина дефектов ~ 90–100 нм, расстояние между ними ~ 400–600 нм. Длина большей оси ром-

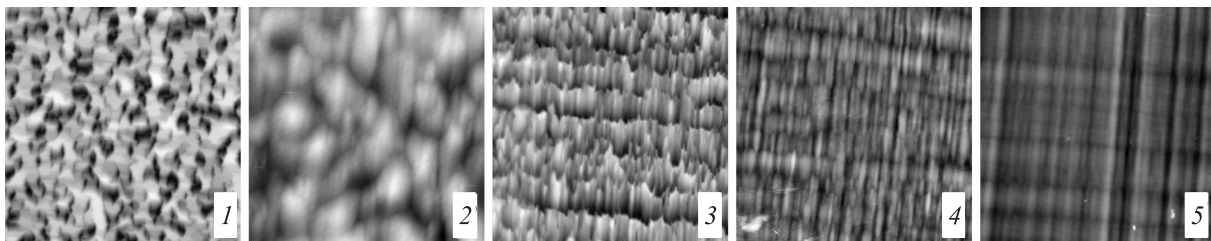


Рис. 1. АСМ изображения образцов 1–5 (размер 13 × 13 мкм)

Таблица 3. Электрофизические характеристики образцов

№	Характер активного слоя	N_{Si} , 10^{12} см^{-2}	μ , $\text{см}^2(\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$		n , 10^{12} см^{-2}	
			300 К	77 К	300 К	77 К
1	ТОС	4.53	1810	1840	8.8	8.3
2	ТОС	13.9	7500	8650	20.3	19.4
3	КЯ	1.38	4900	6600	2.1	1.9
4	КЯ	1.60	9390	17760	1.7	1.7
5	КЯ	2.15	12500	51000	1.5	1.4

Примечание: μ — подвижность электронов, n — поверхностная концентрация электронов, N_{Si} — поверхностная концентрация доноров; КЯ — квантовая яма, ТОС — толстый объемно-легированный слой.

ба ~ 800 – 1200 нм, длина меньшей оси ~ 200 – 400 нм. Для удобства анализа в табл. 2 приведены несколько структурных параметров образцов, в том числе среднее и максимальное значение градиента параметра решетки в направлении роста, характеризующее резкость изменения параметра решетки в ММБ. Измеренное значение среднеквадратичной шероховатости поверхности образца 1 наибольшее среди всех образцов (табл. 2). Наблюдаемые углубления, вероятно, свидетельствуют об испытываемых эпитаксиальным слоем напряжениях растяжения. Такие напряжения, судя по наблюдаемым параметрам дефектов, появились в верхней части ММБ-1, где относительно тонкие слои $\text{In}_{0.54}\text{Ga}_{0.46}\text{As}$ чередовались с относительно толстыми слоями InAs . Слои $\text{In}_{0.54}\text{Ga}_{0.46}\text{As}$ испытывали деформацию растяжения, настолько сильную, что в них появлялись разрывы и возникал трехмерный характер роста слоев, что и привело к появлению на поверхности образца описанного выше рельефа.

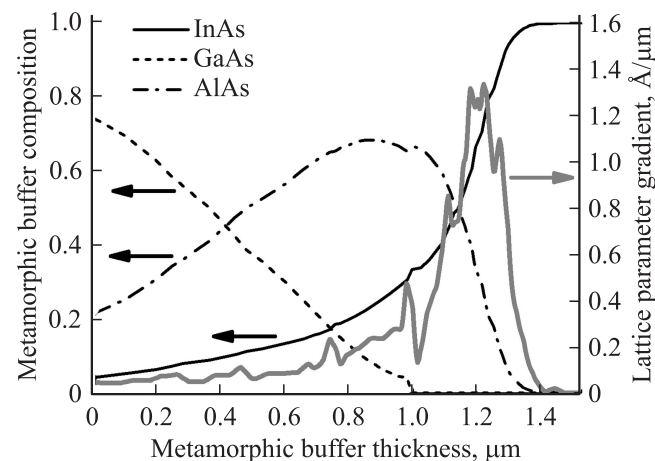
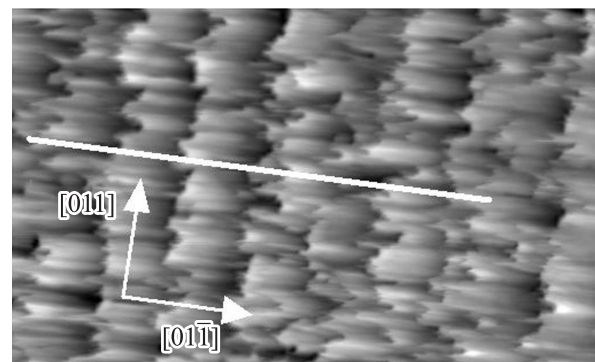
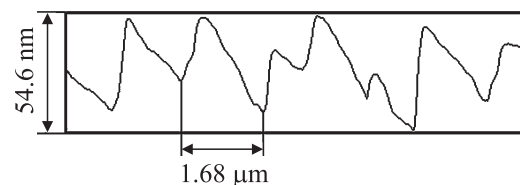
На дефектность структуры 1 указывает и низкая подвижность электронов. Как видно из результатов, представленных в табл. 3, подвижность электронов для этого образца самая низкая и практически не зависит от температуры. Это свидетельствует о том, что электроны в активном слое испытывают гораздо более интенсивное рассеяние на дефектах, чем рассеяние на фонах и ионизированных примесях.

В образце 2 был использован метаморфный буфер InAlGaAs с непрерывным изменением состава. Изменение состава ММБ и градиент параметра решетки в нем представлены на рис. 2, а изображение поверхности образца приведено на рис. 1. Как видно из рисунка, поверхность образца 2 покрыта гладкими продолговатыми возвышенностями неправильной формы, ориентированными по направлению $[01\bar{1}]$. Значения подвижности электронов существенно выше, чем для образца 1.

Перейдем к рассмотрению образца 3, где КЯ состоит из чистого InAs , а подвижные носители заряда в КЯ создавались с помощью δ -легирования. Метаморфный буфер ММБ-3 выращен с изменением содержания InAs по линейному закону. Кроме этого, после сверхрешетки $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{InAs}$ перед барьерным слоем был выращен

слой чистого InAs толщиной 27 нм (табл. 1). Таким образом, мы проверяли влияние локального скачка параметра решетки на свойства структуры. Как видно из табл. 3, подвижность электронов для образца 3 оказывается невысокой: $4900 \text{ см}^2(\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ и $6000 \text{ см}^2(\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ при температуре 300 и 77 К соответственно.

Перейдем к рассмотрению рельефа поверхности образца 3. На рис. 1 представлены изображения поверхности образцов 3–5. Как видно, эти изображения принципиально отличаются от изображений поверхности первых двух образцов. Рельеф поверхности в данном случае представляет собой чередующиеся возвышенности и впадины в виде полос, ориентированных в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в одном они характеризуются более значительным изменением высоты и чередуются с периодом 1.2–1.8 мкм, в другом — меньшим изменением высоты и чередуются с периодом

**Рис. 2.** Конструкция метаморфного буфера образца 2 (ММБ-2).**Рис. 3.** Профиль рельефа поверхности образца 3.

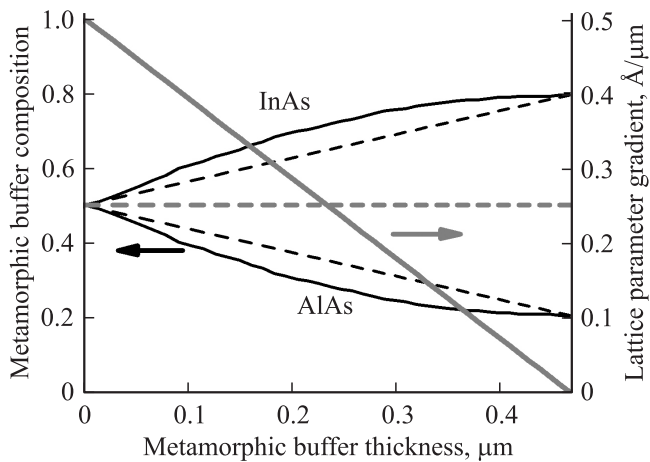


Рис. 4. Конструкция метаморфного буфера образца 4 (ММБ-4).

0,5–0,8 мкм. Строгой периодичности чередования полос не наблюдается даже у самых гладких образцов, все полосы имеют разную ширину.

Особенностью рельефа поверхности образца 3 по сравнению с образцами 4 и 5 является то, что он асимметричен. На рис. 3 представлено изображение профиля рельефа поверхности образца 3; наблюдается сравнительно пологий подъем гребней с одной стороны и сравнительно крутой спад с другой (рис. 3). В совокупности с наибольшим локальным градиентом решетки ММБ-3 среди образцов 3–5, обусловленным введением слоя InAs вместо традиционного инверсного слоя, это привело к насыщенности дефектами активного слоя образца 3, а следовательно, к сильно шероховатой поверхности и низкой подвижности электронов. Интересно также отметить, что нетривиальный рельеф, сформировавшийся на поверхности образца 4, содержит длиннопериодические ступени с достаточно большим перепадом высоты, вытянутые преимущественно в одном направлении. Такой рельеф можно использовать как темплейтную подложку для исследования процессов упорядочения при самоорганизации достаточно крупных наноструктур при эпитаксиальном росте, по аналогии с вицинальными поверхностями подложек.

Рассмотрим образцы 4 и 5. Как уже отмечалось, эти образцы выращены на подложках InP. Отметим особенности образцов. Метаморфный буфер образца 4 (ММБ-4) был рассчитан и выращен с параболическим изменением состава $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ по глубине. Такая закономерность распределения состава исключает генерацию деформаций растущих слоев в конечной части ММБ. Расчетный ход изменения состава и градиент параметра решетки в этом случае представлены на рис. 4. Кроме того, на том же рисунке изображен предполагаемый закон изменения состава ММБ по толщине и градиент параметра решетки для образца 4 в том случае, если бы ММБ-4 был линейным. Видно,

что в случае линейного ММБ механические напряжения были бы равномерно распределены по толщине буфера, а в случае параболического ММБ постепенно ослабевают по направлению к активной области, что, очевидно, более благоприятно с точки зрения улучшения кристаллического качества активных слоев. Для образца 5 изменение состава $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с толщиной ММБ-5 было линейным, а сам ММБ-5 — очень толстым, что обеспечивало наименьший средний градиент параметра решетки среди всех образцов (табл. 2). Кроме этого, в образце 5 выращен инверсный слой, который представляет собой неоднородный по составу слой с постепенно уменьшающимся по мере его роста содержанием InAs. Обычно инверсный слой (inverse step) имеет толщину 0,15–0,50 мкм и обеспечивает переход от механически напряженной верхней части ММБ к ненапряженному активному слою. Наличие инверсного слоя, как правило, приводит к улучшению как структурных, так и электрофизических параметров наногетероструктур [21,22]. В нашем случае инверсный слой обеспечивал переход от состава $\text{In}_{0,74}\text{Al}_{0,26}\text{As}$ в конце ММБ-5 к составу $\text{In}_{0,71}\text{Al}_{0,29}\text{As}$ на толщине 46 нм. Еще одним отличием структур этих образцов является то, что КЯ образца 4 сформирована чистым InAs, в то время как КЯ образца 5 состоит из $\text{In}_{0,76}\text{Ga}_{0,24}\text{As}$ (табл. 1), т. е. КЯ в этом случае менее напряжена (предполагалось тем не менее, что КЯ образца 4 образуется с тетрагональными искажениями кристаллической решетки, но с сохранением двумерного характера роста, т. е. окажется псевдоморфно напряженной). Таким образом, для образца 5 можно ожидать наилучшие структурные и электрофизические характеристики.

Как видно из табл. 3, подвижность электронов для образца 5 существенно выше, чем для образца 4 как при температуре 300 К, так и при 77 К. Сравнение изображений поверхности образцов 4 и 5 (рис. 1), а также значений RMS (табл. 2) подтверждает, что по структурным характеристикам образец 5 оказался наилучшим. Тем не менее в образце 4 по сравнению с образцом 5 мы вдвое выиграли в толщине метаморфного буфера (а значит, в количестве затраченных материалов и времени), получив при этом достаточно большую подвижность электронов при комнатной температуре при большей концентрации электронов (поверхностное удельное сопротивление гетероструктур 5 и 6 при комнатной температуре составляло 391 и 333 Ом/□ соответственно).

4. Заключение

Исследована взаимосвязь морфологии поверхности и электрофизических свойств наногетероструктур с содержанием InAs в активном слое $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ от 76 до 100% в зависимости от конструкции метаморфного буфера. Исследуемые образцы были выращены на подложках GaAs и InP и имели различный профиль изменения

состава в метаморфном буфере: как плавные линейный, параболический, так и содержащий локальные перепады.

Показано, что при различных конструкциях метаморфного буфера рельеф поверхности образцов неизменно обнаруживает анизотропию в направлении $[01\bar{1}]$; анизотропия в перпендикулярном направлении $[011]$ прослеживается слабее и только в образцах с плавным профилем метаморфного буфера.

Показано, что электрофизические параметры наногетероструктур (подвижность и концентрация электронов) и среднеквадратичная шероховатость поверхности (RMS) чувствительны к конструкции метаморфного буфера. При этом в большей степени проявляется зависимость этих величин от максимального локального градиента параметра решетки в направлении роста слоев, чем от среднего его значения. Наибольшая подвижность электронов наблюдается в образцах с малой величиной шероховатости поверхности образца. При определенных условиях (наличие резкого скачка параметра решетки при плавном его изменении в остальной области ММБ) наблюдалось образование длиннопериодического ступенчатого рельефа, что может быть использовано для создания темплейтных подложек для исследования самоорганизации при эпитаксиальном росте наноструктур.

Работа проводится в рамках проекта НК-616П(39) и программы президиума РАН (№ 21), а также ФЦП „Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации“ (государственный контракт № 16.647.12.2024).

Список литературы

- [1] A. Endoh, K. Hikosaka, T. Matsui, K. Shinohara, Y. Yamashita. IEEE Electron. Dev. Lett., **23** (10), 573 (2002).
- [2] A. Endoh, K. Hikosaka, T. Matsui, K. Shinohara, I. Watanabe, Y. Yamashita. IEEE Electron. Dev. Lett., **25** (5), 241 (2004).
- [3] W.E. Hoke, P.J. Lemonias, J.J. Mosca, P.S. Lyman, A. Torabi, P.F. Marsh, R.A. McTaggart, S.M. Lardizabal, K. Hetzler. J. Vac. Sci. Technol. B, **17**(3), 1131 (1999).
- [4] S. Holmes, R.A. Stradling, P.D. Wang, R. Droopad, S.D. Parker, R.L. Williams. Semicond. Sci. Technol., **4** (4), 303 (1989).
- [5] P.D. Wang, S.N. Holmes, Tan Le, R.A. Stradling, I.T. Ferguson, A.G. de Oliveira. Semicond. Sci. Technol., **7**, 767 (1992).
- [6] Y. Jeong, H. Choi, T. Suzuki. J. Cryst. Growth, **301–302**, 235 (2007).
- [7] T. Ueda, S. Onozawa, M. Akiyama, M. Sakuta. J. Cryst. Growth, **93**, 517 (1988).
- [8] C. Harmand, K. Inoue, T. Matsuno. Jpn. J. Appl. Phys., pt. 2, **28**, L1101 (1989).
- [9] C. Harmand, K. Inoue, T. Matsuno. J. Cryst. Growth, **111**, 313 (1991).
- [10] P.N. Uppal, D.M. Grill, S.P. Svensson, D.-W. Tu. J. Vac. Sci. Technol. B, **10**, 1029 (1992).
- [11] Y. Cordier, S. Bollaret, M. Zaknoune, J. Depersio, D. Ferre. Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 1164 (1999).
- [12] S. Bollaert, Y. Cordier, M. Zaknoune, H. Happy, V. Hoel, S. Lepilliet, D. Theron, A. Cappy. Solid-State Electron., **44**, 1021 (2000).

- [13] J.H. Kim, H.-S. Yoon, J.-H. Lee, W.J. Chang, J.Y. Shim, K.H. Lee, J.-I. Song. Solid-State Electron., **46**, 69 (2002).
- [14] W.E. Hoke, T.D. Kennedy, A. Torabi, C.S. Whelan, P.F. Marsh, R.E. Leoni, S.M. Lardizabal, Y. Zhang, J.H. Jang, I. Adesida, C. Xu, K.C. Hsieh. J. Cryst. Growth, **251**, 804 (2003).
- [15] K.S. Joo, S.H. Chun, J.Y. Lim, J.D. Song, J.Y. Chang. Physica E, **40**, 2874 (2008).
- [16] O. Yastrubchak, T. Wosinski, T. Figielski, E. Lusakowska, B. Pecz, A.L. Toth. Physica E., **17**, 561 (2003).
- [17] Е.С. Семенова, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, С.С. Михрин, А.Р. Ковш, В.М. Устинов, Ю.Г. Мусихин, С.А. Блохин, А.Г. Гладышев, Н.Н. Леденцов. ФТП, **37**, 1127 (2003).
- [18] M. Isler. Solid-State Electron., **46**, 585 (2002).
- [19] Kenneth E. Lee, Eugene A. Fitzgerald. J. Appl. Phys., **106**, 074911 (2009).
- [20] Л.П. Павлов. *Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов* (М., Высш. шк., 1975).
- [21] F. Capotondi, G. Biasiol, D. Ercolani, V. Grillo, E. Carlino, F. Romanato, L. Sorba. Thin Sol. Films, **484**, 400 (2005).
- [22] I. Tangring, S.M. Wang, M. Sadeghi, Q.F. Gu, A. Larsson. J. Cryst. Growth, **281**, 220 (2005).

Редактор Л.В. Беляков

Correlation between the design of the metamorphic nanoheterostructures with 76–100% InAs content in the active layer and the surface morphology and the electrophysical properties

I.S. Vasil'evskii*, G.B. Galiev⁺, E.A. Klimov⁺⁺, A.L. Kvanin*, S.S. Pushkarev⁺⁺, M.A. Pushkin*

* National Nuclear Research University „MEPHI“, 115409 Moscow, Russia

+ Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Science, 117105 Moscow, Russia

Abstract The influence of the metamorphic buffer construction on the surface morphology and the electrophysical properties of InAlAs/InGaAs/InAlAs nanoheterostructures with high InAs content (76–100%) is investigated. The electron mobility and the surface relief are shown to be quite sensitive to the metamorphic buffer construction. These parameters are experimentally revealed to depend mainly on the maximal local value of the lattice parameter gradient towards the growth direction rather than on its average value. The engineering of nanostructured surfaces with specific terrace relief is available by the selection of the metamorphic buffer construction.