

# Эпитаксиальный рост гетероструктур GaN/AlN/InAlN для НЕМТ в горизонтальных МОС-гидридных реакторах различных конструкций

© А.Ф. Цацульников<sup>++</sup>, В.В. Лундин<sup>++</sup>, А.В. Сахаров<sup>++</sup>, Е.Е. Заварин<sup>++</sup>, С.О. Усов<sup>++</sup>,  
А.Е. Николаев<sup>++</sup>, М.А. Яговкина<sup>+</sup>, В.М. Устинов<sup>++</sup>, Н.А. Черкашин<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>‡</sup> CEMES-CNRS — Université de Toulouse,  
Toulouse, France

E-mail: andrew@beam.ioffe.ru

(Получена 29 февраля 2016 г. Принята к печати 9 марта 2016 г.)

Исследован эпитаксиальный рост слоев InAlN и транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN на установках с реакторами горизонтального типа, имеющими различные размеры:  $1 \times 2''$ ,  $3 \times 2''$  и  $6 \times 2''$ . Исследования структурных свойств выращенных слоев InAlN и электрофизических параметров гетероструктур GaN/AlN/InAlN показало, что оптимальное качество эпитаксиального роста достигается при компромиссных между выращиванием InGaN и AlGaN условиях. Сравнение эпитаксиального роста в различных реакторах показало, что оптимальные условия реализуются на малообъемных реакторах, позволяющих подавить паразитные реакции в газовой фазе. При этом размеры реактора должны быть достаточны для обеспечения высокой однородности параметров гетероструктур по площади для последующего изготовления приборов. Определены оптимальные составы и толщины слоев InAlN для реализации максимальной проводимости транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN.

## 1. Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероперехода GaN/InAlN являются перспективными кандидатами для создания СВЧ устройств для мощных и высокотемпературных применений [1,2]. Особенностью данной системы материалов является то, что слой InAlN (в отличие от AlGaN) может быть выращен решеточно-согласованным с буферным слоем GaN, что позволяет уменьшить упругие напряжения в транзисторной структуре и повысить надежность работы приборов [3,4]. Кроме того, встроенные электрические поля на интерфейсе GaN/InAlN имеют более высокие значения по сравнению с характерными в традиционно применяемых для НЕМТ гетеропереходах GaN/AlGaN [1]. Поэтому НЕМТ на основе GaN/InAlN характеризуются более высокой концентрацией двумерного электронного газа в канале при меньшей по сравнению с НЕМТ на основе GaN/AlGaN толщине барьерного слоя AlGaN, что приводит к увеличению выходной плотности тока и потенциально к более высокой плотности мощности [1,5–7]. В технологии эпитаксиального выращивания гетероструктур III–N наилучшие результаты получены при использовании газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии, МОГФЭ). К сожалению, МОГФЭ тройного соединения InAlN сильно затруднительна из-за принципиально различных оптимальных условий роста алюминий- и индийсодержащих нитридов элементов III группы, что приводит к необходимости поиска неочевидных компромиссов при оптимизации технологических режимов, при этом возможность их нахождения зависит еще и от конструктивных особенностей реактора.

В настоящей работе приведены результаты исследований эпитаксиального роста слоев  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  и транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN методом МОГФЭ, включающих анализ влияния условий эпитаксиального роста, составов и толщин слоев  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  на структурные и электрофизические свойства гетероструктур для НЕМТ. Исследования выполнены на трех различных эпитаксиальных установках.

## 2. Эксперимент

### 2.1. Выбор конструкции реактора и базовых режимов МОГФЭ InAlN

Как отмечалось выше, выбор режимов роста InAlN означает поиск неочевидных компромиссов между требованиями, продиктованными присутствием в нем индия и алюминия. Индийсодержащие нитриды необходимо выращивать при умеренной температуре (700–900°C), высокой концентрации аммиака (> 50% по мольной доле), в атмосфере, свободной от водорода. Как правило, рост производится в диапазоне давлений в реакторе 400–1000 мбар. Это связано с малой энергией связи In–N, низкой реакционной способностью индия и его высоким равновесным давлением, нестабильностью InN в водородсодержащей атмосфере. С другой стороны, при росте AlN предпочтительна атмосфера с высоким содержанием водорода, необходимы высокая температура (> 1100°C), низкая концентрация аммиака (единицы %), давление в реакторе 100 мбар или ниже. Удовлетворение последним двум требованиям позволяет уменьшить скорость паразитных реакций в газовой фазе между

аммиаком и триметилалюминием (ТМА1), единственным из практически используемым в технологии III–N прекурсором алюминия, приводящих к образованию наночастиц AlN.

Возможность нахождения таких компромиссов зависит также от выбора типа реактора, в котором проводится эпитаксиальный рост. На сегодня основными типами используемых в МОГФЭ реакторов являются вертикальные с быстро вращающимся подложкодержателем (TurboDisc), вертикальные с близко расположенным распределенным инжектором (closed coupled showerhead, CCS), горизонтальные и их популярная разновидность — планетарные реакторы.

Рост любых алюминийсодержащих нитридов при высокой концентрации аммиака в TurboDisc крайне затруднен формированием облака наночастиц AlN над поверхностью подложкодержателя [8,9]. В реакторах CCS проблема паразитных реакций между ТМА1 и аммиаком стоит значительно менее остро, однако при выращивании в них гетероструктур GaN/InAlN вместо InAlN формируется твердый раствор InAlGaN с мольной долей GaN, достигающей до 50%. Механизм этого явления на сегодня не установлен, однако его наблюдали несколько групп, в квалификации которых сомневаться не приходится [10–12].

Принципиальной отличительной чертой горизонтальных и планетарных реакторов по сравнению с вышеописанными вертикальными является протекание газов параллельно подложкодержателю, что позволяет уменьшить влияние паразитных реакций и сместить облако образующихся наночастиц в область позади подложек путем простого увеличения суммарного потока газа. Поэтому такие реакторы наиболее пригодны для выращивания InAlN (как и AlGaN), и именно они использовались в настоящей работе. Оптимизация процесса роста InAlN производилась при следующих компромиссных условиях: пониженные температуры (820–880°C) и давления (100–200 мбар) с использованием азота в качестве газа носителя и при относительно высокой концентрации аммиака (20–60%).

## 2.2. Эпитаксиальное выращивание и исследование гетероструктур InAlN/GaN

Эпитаксиальный рост проводился на установках с горизонтальным реактором (модифицированной EpiquipVP50RP, предназначенной для роста на одной подложке размером 2", и Dragon-125, предназначенной для роста на трех подложках размером 2" или одной подложке размером 100 мм) и установке с планетарным реактором AIX2000HT, предназначенной для роста на шести подложках размером 2". Триметилгаллий (TMGa), триметилиндий (TMIn), ТМА1, аммиак (NH<sub>3</sub>) и моносилан (для осаждения Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) использовались в качестве соединений-источников. При выращивании эпитаксиальных слоев GaN и AlN в качестве несущего газа использовался водород, при выращивании

InAlN — азот. Структурные свойства выращенных образцов были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения с последующей обработкой методом геометрических фаз (GPA) (детали условий получения ПЭМ-изображений высокого разрешения GaN и применения к ним GPA можно найти в [13]) и рентгеновской дифрактометрией высокого разрешения (HRXRD). Исследовались как толстые слои InAlN, толщиной до 700 нм, выращенные на буферных слоях GaN, так и ряд гетероструктур GaN/AlN/In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N, состоящих из буферного слоя GaN толщиной ~ 2 мкм, слоя AlN толщиной ~ 1 нм и слоя InAlN различных толщин и составов.

## 3. Результаты

### 3.1. Рост слоев InAlN в горизонтальном реакторе Epiquip VP50 RP малого объема (1 × 2")

На начальном этапе работы эпитаксиальный рост толстых (700 нм) слоев AlInN осуществлялся на установке с небольшим реактором, в котором паразитные реакции между ТМА1 и NH<sub>3</sub> практически пренебрежимы и не оказывают влияния на процесс роста. Изучалась зависимость параметров слоев AlInN от температуры роста, общего давления в реакторе, потоков аммиака, азота, TMIn и ТМА1. В таблице приведены условия этих экспериментов и измеренные методом HRXRD составы слоев InAlN. Структурные исследования образцов Ep1 и Ep2, выращенных при давлении 100 мбар и различных потоках азота, показали формирование слоев InAlN с относительно низким содержанием индия (5–10%) (рис. 1), приводящим к появлению трещин в слоях InAlN, и наличие сильного разделения фаз (существование двух фаз с различным содержанием индия). Увеличение давления роста до 200 мбар позволило подавить в образце Ep3 разделение без изменения

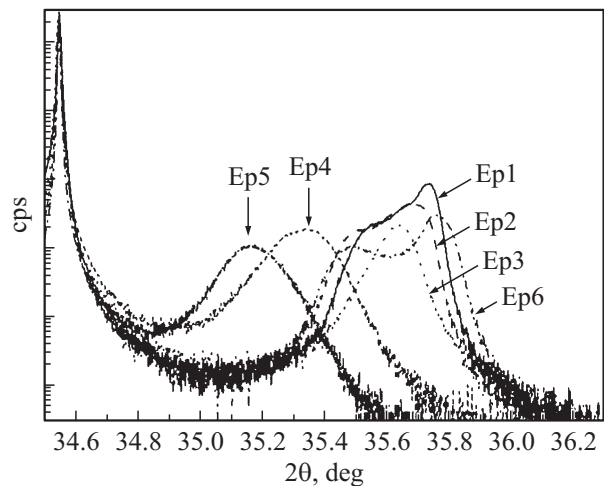


Рис. 1. Данные HRXRD-исследования слоев InAlN, выращенных в различных условиях.

Условия выращивания образцов и данные по составу

Образец	Давление, мбар	Поток NH <sub>3</sub> , sccm	Поток N <sub>2</sub> , sccm	Поток TMAI, мкмоль/мин	Поток TMIn, мкмоль/мин	Температура роста, °C	Содержание индия, %
Ep1	100	2500	8400	15.7	10.6	840	5 + 9*
Ep2	100	2500	4500	15.7	10.6	840	6 + 10*
Ep3	200	2500	4500	15.7	10.6	840	7
Ep4	200	2500	4500	15.7	18.6	840	12
Ep5	200	2500	4500	15.7	29.6	840	17
Ep6	200	6400	4500	15.7	10.6	840	5 + 10*

Примечание. \* — наблюдается разделение фаз с двумя характерными концентрациями индия.

содержания индия. Последовательное увеличение потока индия при этих условиях (образцы Ep3, Ep4, Ep5) позволило увеличить мольную долю InN в слоях InAlN до 17%, что соответствует составу, совпадающему по параметру решетки с GaN в плоскости эпитаксиального роста. Следует отметить, что увеличение концентрации NH<sub>3</sub> в атмосфере реактора (образец Ep6) приводит к появлению разделения фаз и при давлении в реакторе 200 мбар.

Таким образом, было установлено, что на установке Epiquip VP50RP могут быть реализованы оптимальные для роста InAlN условия, причем для выращивания эпитаксиальных слоев InAlN в диапазоне мольных долей InN 7–17% без разделения фаз необходимо поддерживать достаточно высокое давление в реакторе и использовать не слишком большие потоки аммиака. К сожалению, в реакторе Epiquip VP50RP область однородного роста не превышает 1–2 см<sup>2</sup>. Это связано как с отсутствием вращения подложки, так и с малым поперечным размером реактора, из-за чего влияние боковых стенок простирается почти на всю его ширину. Это не позволило провести исследования роста приборных гетероструктур, пригодных для последующего изготовления мощных транзисторов и МИС (монолитных интегральных схем), размеры одного кристалла которых составляют десятки квадратных миллиметров.

### 3.2. Рост слоев InAlN и гетероструктур GaN/AlN/InAlN в планетарном реакторе (6 × 2'') AIX2000HT

Следующая часть экспериментальной работы была выполнена на установке AIX2000HT, предназначенной

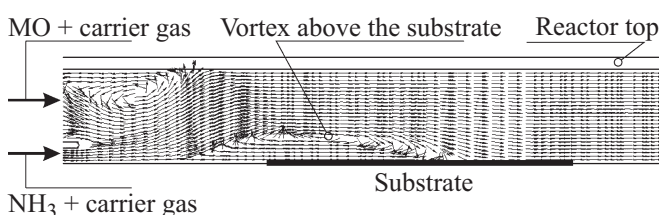
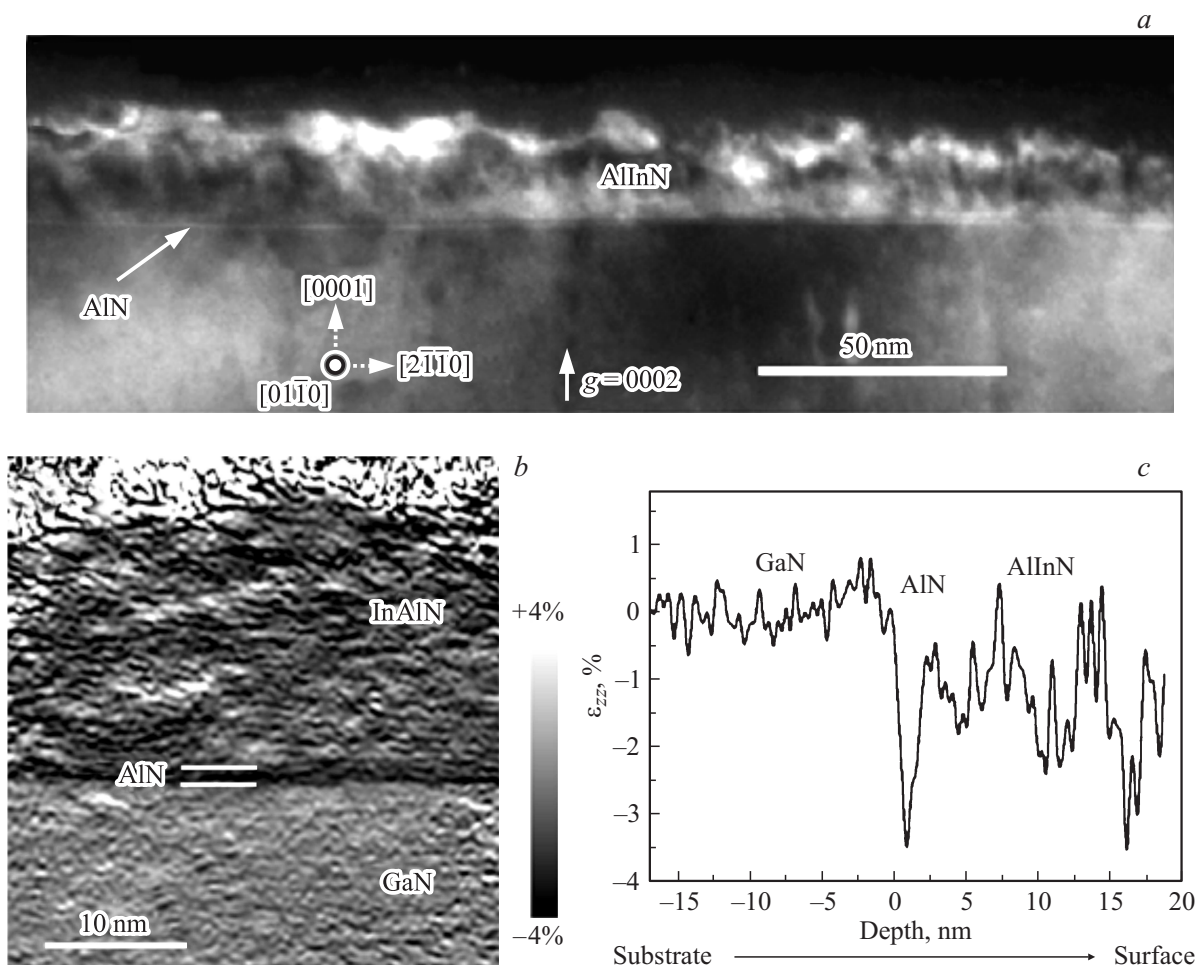


Рис. 2. Вихри в планетарном реакторе, образующиеся при неоптимальных условиях, радиальный разрез, газы протекают слева направо. MO — металлоорганика.

для роста одновременно на 6 подложках размером 2'' и с потенциальной однородностью, достаточной для последующего изготовления приборов. Однако специфические требования к параметрам технологического процесса чрезвычайно затрудняют в ней выращивание InAlN. Как следует из результатов, полученных в реакторе Epiquip, для роста InAlN требуются относительно высокие для алюминийсодержащих нитридов давления (200 мбар) и не слишком высокая концентрация аммиака. Однако паразитные реакции между TMAI и NH<sub>3</sub> из-за большого времени прохождения через относительно большой (при этом самый малый из планетарных) реактор AIX2000HT оказывают значительно более негативное влияние на процесс эпитаксии, чем в малом реакторе Epiquip. При выращивании AlN или AlGaIn эту проблему легко решить увеличением суммарного потока через реактор [14]. Однако в планетарном реакторе поток газов протекает параллельно подложкодержателю от центра к периметру. Поэтому при безвихревом протекании газа его линейная скорость должна падать обратно пропорционально радиусу реактора, что вступает в противоречие с законом сохранения импульса и приводит к возникновению вихрей (рис. 2). Дополнительной причиной возникновения вихрей является не самая удачная форма инжектора газов в этом реакторе. Анализ характера протекания газа через такой реактор, выполненный с использованием коммерчески доступной программы CVDSim NE, показал, что критическими являются не объемные, а массовые расходы газа. При их превышении в реакторе образуется мощный тороидальный вихрь, находящийся над областью расположения подложек. Существование данной проблемы было подтверждено и экспериментально: в режимах, соответствующих формированию вихрей, рост материала практически останавливался. Для реактора AIX2000HT критическим суммарным расходом газа является 30–35 г/мин. Чем выше молекулярная масса газа, тем при меньшем мольном расходе газа, протекающего через реактор, возникает устойчивый кольцевой вихрь. Подробнее диаграмма стабильности этого реактора описана в [15]. Как было сказано выше, рост InAlN производится с использованием азота в качестве несущего газа, и при требуемой для роста InAlN концентрации аммиака ~ 35% суммарный расход газа через реактор не должен превышать 30 SLM. Этого потока недостаточно для подавления



**Рис. 3.** Темнопольное изображение  $(01\bar{1}0)$  интерфейса GaN/AlN/AlGaIn, снятое с  $g = 0002$  (a), изображение распределения деформации в направлении эпитаксиального роста относительно недеформированной решетки GaN (b) и линейный профиль деформаций (c) относительно GaN вдоль направления  $[0001]$ , усредненный по слою толщиной 10 нм в плоскости интерфейса.

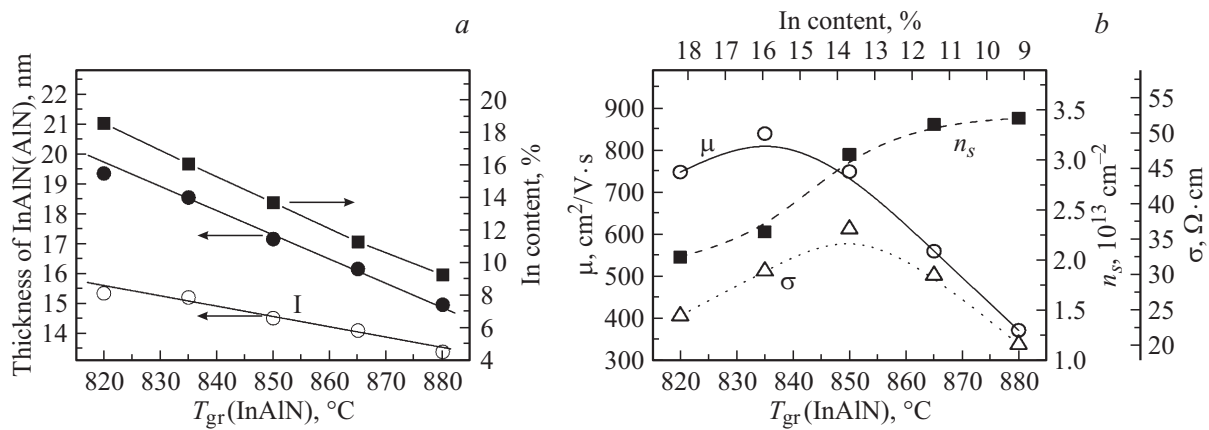
паразитных реакций между TMAI и  $\text{NH}_3$  при давлении 200 мбар и необходимых концентрациях  $\text{NH}_3$  и TMAI. По причине вышеизложенного прямой перенос условий роста InAlN с реактора Epiquip в реактор AIX2000HT оказался невозможен. Путем тщательной оптимизации, с использованием как расчетов в программе CVDSim NE, так и экспериментов, условия роста, позволяющие выращивать InAlN в данном реакторе, были найдены. Однако давление в реакторе пришлось поддерживать на уровне 100 мбар, а диапазон допустимых условий оказался узким и далеким от оптимальных.

Измерения электрофизических параметров выращенных в реакторе AIX2000HT транзисторных гетероструктур GaN/AlN/ $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$  показали подвижность электронов  $\sim 700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при комнатной температуре при слоевой концентрации  $\sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Таким образом, несмотря на относительно небольшую подвижность, концентрация носителей заряда практически в 2 раза превышала соответствующее значение для гетероструктур GaN/AlN/AlGaIn.

Структурные свойства выращенной гетероструктуры были исследованы ПЭМ высокого разрешения. Из изоб-

ражения на рис. 3, a видно, что слой InAlN имеет толщину около  $\sim 20$  нм, при этом поверхность слоя непланарна с характерной высотой неоднородностей 6–7 нм. Анализ геометрической фазы изображения высокого разрешения в направлении  $[0001]$  позволил получить распределение упругих деформаций  $\varepsilon_{zz}$  в слое InAlN относительно недеформированной матрицы GaN (рис. 3, b) и линейный профиль деформаций (b) относительно GaN в слоях AlN и InAlN вдоль направления  $[0001]$ , усредненного по толщине 10 нм в плоскости интерфейса.

Полученные результаты показывают, что вместо AlN на интерфейсе формируется слой AlGaIn с содержанием по Al  $\sim 80\%$ . Распределение Al является неоднородным и может падать до 60%. Полученные результаты могут быть связаны как с перемешиванием атомов Ga и Al при росте, так и с дополнительным эффектом формирования островков AlN на начальных стадиях роста InAlN, показанным, например, в работах [16,17]. Распределение  $\varepsilon_{zz}$  в слое  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  позволяет сделать вывод, что данный слой имеет неоднородную структуру. Среднее значение  $\varepsilon_{zz}$  в слое  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  составляет  $(-1.3 \pm 1.6)\%$ , что соответствует содержанию индия  $x = 17\%$ , но при



**Рис. 4.** Зависимости толщины, содержания индия (а) и электрофизических параметров (концентрации  $n_s$ , подвижности носителей  $\mu$  и проводимости  $\sigma$ ) транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN от температуры роста  $T_{gr}$ . а: I — произведение толщины InAlN на мольную долю в нем AlN.

этом наблюдаются как области с  $x < 17\%$ , так и с  $x > 17\%$ . При этом в плоскости интерфейса упругие напряжения отсутствуют, что свидетельствует о совпадении параметров решетки  $a$  выращенного слоя InAlN и GaN. Однако стандартное отклонение значения  $\varepsilon_{zz}$  от среднего достаточно велико и составляет  $\pm 1.6\%$ , что соответствует отклонению содержания индия  $\pm 9\%$ . Следовательно, в слое  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  формируются локальные области с содержанием по индию от 8 до 26%, т.е. в структуре наблюдается сильное фазовое разделение, что, по-видимому, приводит к уменьшению подвижности носителей.

Таким образом, проведенные исследования роста InAlN и транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN на установке AIX2000HT показывают, что реализация оптимальных условий роста InAlN на данной установке крайне затруднена. Рост при давлении 200 мбар невозможен из-за сильных паразитных реакций в газовой фазе. Преодоление данной проблемы путем увеличения общего потока газов приводит к возникновению вихрей в реакторе, а увеличение только потока аммиака, делает неоптимальными условия роста AlInN и возникновение сильного эффекта разделения фаз. Приборные гетероструктуры, выращенные на данной установке в компромиссных условиях, показали низкое структурное качество InAlN, недостаточное для изготовления транзисторов.

### 3.3. Рост гетероструктур GaN/AlN/InAlN в горизонтальном реакторе ( $3 \times 2''$ ) Dragon-125

Третья часть эпитаксиальных экспериментов проводилась на установке Dragon-125. Она имеет горизонтальный реактор с большим отношением ширины к высоте, что подавляет распространение влияния боковых стенок вглубь реактора. В сочетании с вращением подложкодержателя и однородным температурным

полем, создаваемым профилированным спиральным индуктором, расположенным под подложкодержателем, эта установка позволяет получить высокую однородность и высокую скорость эпитаксиального процесса [18]. В частности, при выращивании на подложке диаметром 100 мм среднеквадратичное отклонение скорости роста GaN составляет менее 1.5%. Принципиальным преимуществом горизонтального реактора является стабильность характера протекания газа в широчайшем диапазоне потоков, давлений и молекулярных масс. Это позволило при росте InAlN использовать найденные ранее для реактора Epiquip оптимальные условия. В частности, рост проводился при давлении 200 мбар. Значения потоков несущего и активных газов определялись прямым масштабированием соответствующих значений, оптимизированных для реактора Epiquip, с некоторой корректировкой, связанной с техническими особенностями установки Dragon-125. Успешный рост однородных по площади подложки эпитаксиальных гетероструктур GaN/InAlN был реализован в установке Dragon-125 с первой попытки, что позволило осуществить более тщательную оптимизацию приборно-ориентированного технологического процесса.

Было изучено влияние температуры роста слоев InAlN в составе транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN в интервале от 820 до 880°C, при этом время роста InAlN оставалось постоянным. Для всех образцов этой серии методом HRXRD не выявлено разделения фаз в слоях InAlN. Увеличение температуры роста InAlN приводит к одновременному изменению толщины слоя InAlN и его состава (рис. 4, а). На том же рисунке показана величина произведения толщины InAlN на мольную долю в нем AlN. Видно, что эта величина снижается с ростом температуры намного медленнее, чем толщина InAlN, т.е. уменьшение толщины InAlN связано в основном с уменьшением вхождения индия.

Рассмотрим влияние температуры роста на электрофизические свойства транзисторных гетерострук-

тур. В работе [19] было показано, что изменение толщины барьерного слоя InAlN в гетероструктурах GaN/AlN/InAlN в интервале от 10 до 33 нм приводит к незначительному изменению подвижности и концентрации электронов в канале. Поскольку в выращенных структурах по данным HR XRD толщина слоя InAlN изменяется в пределах  $\sim (20-15)$  нм, можно заключить, что наблюдаемое изменение электрофизических свойств (рис. 4, b) обусловлено изменениями состава слоя InAlN. Из приведенных зависимостей видно, что концентрация носителей в канале увеличивается с уменьшением содержания индия, а подвижность имеет максимум при  $x \approx 16\%$ . При этом максимум проводимости наблюдается при  $x \approx 14\%$ . Таким образом, проведенные исследования показывают, что оптимум по подвижности и проводимости в транзисторных гетероструктурах GaN/AlN/InAlN наблюдается при содержании индия в слое InAlN, меньшем, чем в решеточно-согласованном с GaN  $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ . Полученные результаты могут быть объяснены тем, что при уменьшении содержания индия в слоях InAlN и, следовательно, увеличении содержания Al увеличиваются как разрыв зон между GaN и InAlN, так и величина встроенного пьезоэлектрического поля на границе данных материалов. Оба этих эффекта приводят к увеличению концентрации носителей. С другой стороны, увеличение локализации носителей вблизи AlN/InAlN приводит к увеличению рассеяния электронов, обусловленного как неоднородностью состава InAlN, так и формированием слоя AlGaIn вместо AlN, как было показано исследованиями методами ПЭМ и HRXRD. Для детального анализа полученных зависимостей необходимо проведение расчетов зонной структуры таких гетероструктур, что планируется сделать в последующих работах.

Были проведены исследования однородности параметров эпитаксиальных транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN при росте на установке Dragon-125. Было показано, что вплоть до размеров подложки 100 мм поверхностное сопротивление по площади пластины имеет среднеквадратичное отклонение не более 3%, что свидетельствует о высокой однородности параметров гетероструктур и возможности использования данной установки для получения приборов.

Таким образом, установка Dragon-125 позволяет одновременно реализовать оптимальные условия эпитаксиального роста InAlN и обеспечить высокую однородность параметров транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN, что дает возможность изготавливать из данных гетероструктур транзисторы и МИС.

#### 4. Заключение

В работе приведены результаты исследования эпитаксиального роста слоев InAlN и транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN на установках с реакторами горизонтального типа, имеющими различные размеры. Показано, что оптимальными условиями роста InAlN

являются компромиссные условия роста между InGaIn и AlGaIn, а именно промежуточное давление 200 мбар и относительно небольшие потоки аммиака. Данные условия позволяют подавить разделение фаз в InAlN и реализовать хорошие морфологические характеристики поверхности. Сравнение эпитаксиального роста на различных реакторах показало, что оптимальные условия роста реализуются на малообъемных реакторах, позволяющих подавить паразитные реакции в газовой фазе при данном давлении. При этом размеры реактора должны быть достаточны для обеспечения высокой однородности параметров гетероструктур по площади для последующего изготовления приборов. Было показано, что установка Dragon-125, имеющая размеры  $3 \times 2''$ , позволит реализовать компромисс между оптимальными условиями роста транзисторных гетероструктур GaN/AlN/InAlN и однородностью их параметров по площади.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о субсидии № 14.607.21.0003 от 05.06.2014, уникальный код проекта: RFMEFI60714X0003).

#### Список литературы

- [1] F. Medjdoub, J.-F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, M.A. Py, D. Ducatteau, C. Gaquiere, N. Grandjean, E. Kohn. *IEEE Intern. Electron Devices Meeting* (San Francisco, USA, 2006) p. 1.
- [2] E. Kohn, F. Medjdoub. *Intern. Workshop on Physics of Semiconductor Devices* (Mumbai, India, 2007) p. 311.
- [3] J. Joh, L. Xia, J.A. del Alamo. *IEEE Intern. Electron Devices Meeting* (Washington, USA, 2007) p. 385.
- [4] J. Joh, J.A. del Alamo. *IEEE Intern. Electron Devices Meeting* (San Francisco, USA, 2006) p. 1.
- [5] J.W. Chung, O.I. Saadat, J.M. Tirado, X. Gao, S. Guo, T. Palacios. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **30** (9), 904 (2009).
- [6] M. Higashiwaki, T. Matsui. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, L768 (2004).
- [7] M. Higashiwaki, T. Mimura, T. Matsui. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, L843 (2006).
- [8] B. Krishnan, S. Lee, H. Li, J. Su, D. Lee, A. Paranjpe. *Sensors Materials*, **25** (3), 205 (2013).
- [9] J.R. Creighton, M.E. Coltrin, J.J. Figiel. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 171 906 (2008).
- [10] J.J. Zhu, Y.M. Fan, H. Zhang, G.J. Lu, H. Wang, D.G. Zhao, D.S. Jiang, Z.S. Liu, S.M. Zhang, G.F. Chen, B.S. Zhang, H. Yang. *J. Cryst. Growth*, **348**, 25 (2012).
- [11] E. Taylor, M.D. Smith, T.C. Sadler, K. Lorenz, H.N. Li, E. Alves, P.J. Parbrook, R.W. Martin. *J. Cryst. Growth*, **408**, 97 (2014).
- [12] J. Kim, Z. Lochner, Mi-H. Jia, S. Choi, H.J. Kim, J.S. Kim, R.D. Dupuis, A.M. Fischer, R. Juday, Y. Huang, T. Li, J.Y. Huang, F.A. Ponced, J.-H. Ryou. *J. Cryst. Growth*, **388**, 143 (2014).
- [13] А.В. Сахаров, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.А. Синецын, А.Е. Николаев, С.О. Усов, В.С. Сизов, Г.А. Михайловский, Н.А. Черкашин, М. Нутч, Ф. Hue, Е.В. Яковлев, А.В. Лобанова, А.Ф. Цацульников. *ФТП*, **43** (6), 841 (2009).
- [14] A.V. Kondratyev, R.A. Talalaev, W.V. Lundin, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsul'nikov, E.E. Zavarin, A.V. Fomin, D.S. Sizov. *J. Cryst. Growth*, **272**, 420 (2004).

- [15] W.V. Lundin, E.E. Zavarin, M.A. Sinitsyn, A.V. Sakharov, S.O. Usov, A.E. Nikolaev, S.I. Troshkov, M.A. Yagovkina, E.V. Yakovlev, R.A. Talalaev, D.V. Davydov, A.V. Lobanova, N.A. Cherkashin, M.J. Hytch, P.N. Brunkov, A.F. Tsatsul'nikov. *Extended Abstracts 13th Eur. Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy* (Ulm, Germany, 2009).
- [16] M. Gherasimova, G. Gui, Z. Ren, J. Su, X.-L. Wang, J. Han, K. Higashimine, N. Otsuka. *J. Appl. Phys.*, **95**, 2921 (2004).
- [17] А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, А.Е. Николаев, А.В. Сахаров, М.М. Рожавская, С.О. Усов, П.Н. Брунков, М.А. Синецын, Д.В. Давыдов, М.Н. Мизеров, Н.А. Черкашин. *ФТП*, **46** (10), 1304 (2012).
- [18] В.В. Лундин, Д.В. Давыдов, Е.Е. Заварин, М.Г. Попов, А.В. Сахаров, Е.В. Яковлев, Д.С. Базаревский, Р.А. Талалаев, А.Ф. Цацульников, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. *Письма в ЖТФ*, **41** (5), 9 (2015).
- [19] F. Medjdoub, M. Alomari, J.-F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, M.A. Py, N. Grandjean, E. Kohn. *Electron Dev. Lett.*, **29** (5), 422 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

## Epitaxial growth of GaN/AlN/InAlN heterostructures for HEMTs in horizontal MOCVD reactors with different designs

A.F. Tsatsulnikov<sup>+,\*</sup>, W.V. Lundin<sup>+,\*</sup>, A.V. Sakharov<sup>+,\*</sup>, E.E. Zavarin<sup>+</sup>, S.O. Usov<sup>+,\*</sup>, A.E. Nikolaev<sup>+,\*</sup>, M.A. Yagovkina<sup>+</sup>, V.M. Ustinov<sup>+,\*</sup>, N.A. Cherkashin<sup>†</sup>

<sup>+</sup> Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup> Submicron Heterostructures for Microelectronics,

Research & Engineering Center,

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

<sup>†</sup> CEMES-CNRS — Université de Toulouse,

Toulouse, France

**Abstract** Epitaxial growth of InAlN layers and GaN/AlN/InAlN heterostructures for HEMTs was investigated by using of growth systems with horizontal type of reactors having different sizes:  $1 \times 2''$ ,  $3 \times 2''$  and  $6 \times 2''$ . Investigations of the structural properties of the InAlN layers and electrophysical properties of the GaN/AlN/InAlN heterostructures showed that optimal growth conditions are achieved at compromise between InGaN and AlGaN growth conditions. Comparison of the growth in different reactors showed that optimal conditions are realized in small size reactors suppressing parasitic reactions in gas phase. On the other hand, reactor should have appreciated size for realization of high uniformity of parameters of the GaN/AlN/InAlN heterostructures on wafer for future device fabrication. Optimal content and thickness of the InAlN layers in the GaN/AlN/InAlN heterostructures resulting maximal conductivity were revealed.