

УДК 621.793.162;621.315.592

© М. Г. Бирюков, П. Е. Афонин, С. А. Щуренкова, Д. Ю. Пугачев,
А. Ф. Цацульников, А. В. Сахаров, Е. Е. Заварин, В. В. Лундин, Д. С. Базаревский, 2025

ОБОРУДОВАНИЕ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА ПОДЛОЖКАХ КРЕМНИЯ ДИАМЕТРОМ ДО 200 мм ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРАНЗИСТОРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Рассмотрены преимущества использования III-N гетероструктур GaN на кремниевом типе подложек. Представлена общая конструкция, способы оптимизации процесса осаждения и ключевые характеристики разрабатываемой установки газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) для реализации базовых технологических процессов на подложках кремния диаметром до 200 мм для производства транзисторных гетероструктур. Показаны результаты реализованных базовых технологических процессов.

Ключевые слова: установка МОС-гидридной эпитаксии, транзисторная гетероструктура, нитрид галлия на кремнии, моделирование, базовый технологический процесс

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным направлением микроэлектроники является создание полупроводников на основе III-N гетероструктур GaN, т.к. они наилучшим образом отвечают постоянно возрастающим требованиям к техническим характеристикам конечных изделий, таких как СВЧ и силовые транзисторы [1, 2]. Согласно аналитике [3], рынок изделий на основе GaN полупроводников ежегодно растет на 22.1% (рис. 1).

В настоящее время основным промышленным методом изготовления III-N гетероструктур является МОС-гидридная эпитаксия [4], что связано с ее более высокой производительностью по сравнению с молекулярно-лучевой эпитаксией. К настоящему времени промышленного производства установок МОС-гидридной эпитаксии в России нет. Поэтому вопрос создания отечественных установок современного технического уровня для производства таких изделий становится все более актуальным.

Проведенная разработка установки МОС-гидридной эпитаксии на 200 мм базировалась на разработанных в НТЦ микроэлектроники РАН и ООО "Монолюм" (патент RU2673515C2) установках МОС-гидридной эпитаксии [5], позволяющих проводить выращивание III-N гетероструктур на подложках диаметром до 150 мм. Из выращенных на этих установках транзисторных гетероструктур на предприятиях электронной промышленности

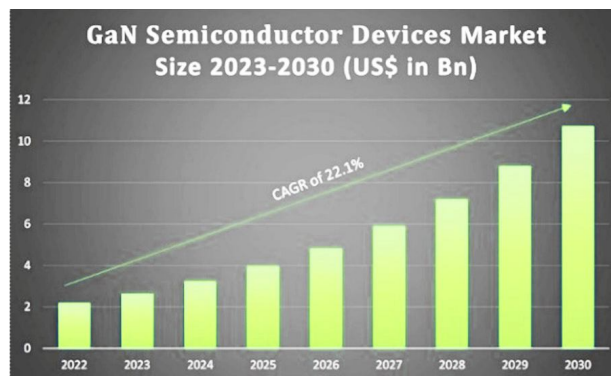


Рис. 1. Рынок GaN полупроводников.

России (АО НПФ "Микран", МИЭТ, АО "НПП "Исток" им. Шокина, АО "НПП Салют", ФГУП "РНИИРС", НИЦ "Курчатовский институт") были созданы транзисторы с параметрами, соответствующими существующему коммерческому уровню [6, 7].

Стоит отметить, что как описанная в данной статье установка для подложек диаметром до 200 мм, так и вышеупомянутые установки для подложек меньшего диаметра являются одноподложечными. Это соответствует выраженному тренду последнего десятилетия — переходу для выращивания сложных гетероструктур, в первую очередь для электронных применений, от многоподложечных

Табл. 1. Сравнение характеристик подложек для получения GaN гетероструктур

Материал подложки	Параметр кристаллической решетки a , Å	Рассогласование a (GaN) к a (подложки), %	Коэффициент термического расширения в плоскости*, 10^{-6} K^{-1}	Рассогласование КТР (GaN) к КТР (подложки), %	Теплопроводность, $10^2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Цена за см^2 , отн. ед.
GaN	3.189	—	5.5	—	1.3	—
Al_2O_3	4.758	14.8	7.0	27.3	0.3	10
6H-SiC	3.081	–3.2	4.5	–18.2	3.7	100
Si (111)	5.431	17.0	4.0	–27.8	1.6	1

Примечание: * КТР усреднен в диапазоне температур от 300 до 1350 К

реакторов к одноподложечным [8]. Этот переход подобен случившемуся ранее в кремниевой технологии.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaN И ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТИПЫ ПОДЛОЖЕК

Основным преимуществом широкозонных III-N гетероструктур на основе AlInGaN является возможность изготавливать СВЧ и силовые транзисторы с высокими пробивным напряжением, плотностью тока и мощностью, что существенно улучшает массово-габаритные параметры конечных изделий.

Для изготовления III-N гетероструктур GaN обычно используют подложки сапфира, карбида кремния и кремния [9]. Сравнение характеристик подложек для получения GaN гетероструктур [10] приведено в табл. 1. Наиболее совершенные гетероструктуры реализуются на подложках сапфира и карбида кремния. Однако подложки сапфира имеют низкую теплопроводность и не используются для СВЧ и силовой электроники. Подложки SiC благодаря их высокой теплопроводности и близости параметров кристаллической решетки и коэффициента термического расширения (КТР) с нитридными структурами позволяют выращивать гетероструктуры высокого качества для транзисторов, тем не менее такие подложки имеют высокую стоимость и только недавно появилась возможность заказывать в ограниченном количестве подложки SiC диаметром 200 мм [11]. Стоит заметить, что большая часть технологических линеек в мире использует подложки SiC диаметром 100–150 мм. Развитие нитридных технологий, сопровождающееся увеличением размеров подложек, привело к необходимости использования недорогих кремниевых подложек размером до 200 мм

и, следовательно, разработке соответствующего эпитаксиального оборудования.

ОБЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ И КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОЙ УСТАНОВКИ

Конструктивно установка МОС-гидридной эпитаксии состоит из трех блоков (рис. 2): электрического сверху (1), вакуумного справа (2) и основного по центру (3).

Основной блок состоит из газовой системы (3.1), перчаточного бокса (3.2) для загрузки подложек, шлюза (3.3) и реакторного узла (3.4) (рис. 3). Под газовой системой располагаются источники металлоорганических соединений (МО). Загрузка подложек в реактор осуществляется

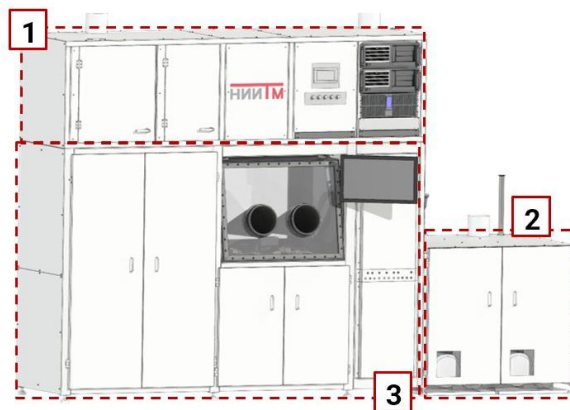


Рис. 2. Состав установки МОС-гидридной эпитаксии. 1 — блок электрический; 2 — вакуумный блок; 3 — основной блок

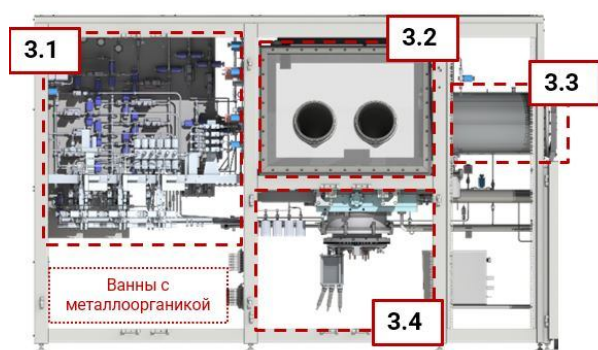


Рис. 3. Состав основного блока (3).

3.1 — газовая система; 3.2 — перчаточный бокс для загрузки подложек; 3.3 — шлюз; 3.4 — реакторный узел

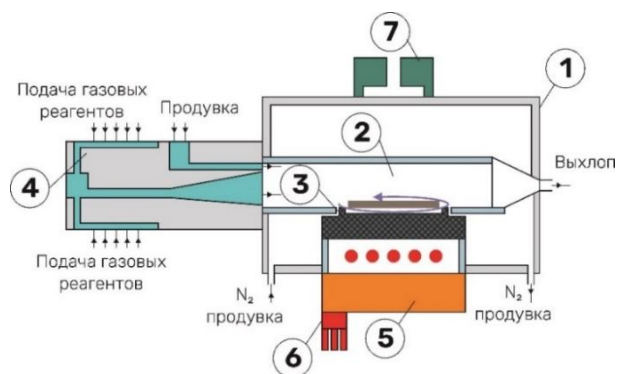


Рис. 4. Схематичное изображение реакторного узла установки.

1 — реактор с холодной стенкой; 2 — внутренний кварцевый реактор; 3 — графитовый подложкодержатель; 4 — многозонный инжектор; 5 — система нагрева и вращения; 6 — система пирометров; 7 — система мониторинга прогиба подложки и толщины осаденного слоя

вручную через шлюз (3.3) и перчаточный бокс (3.2). В конструкцию реактора установки заложен порт для подключения автоматического загрузчика, что в перспективе позволит реализовать автоматическую загрузку подложек.

Реактор установки горизонтальный и состоит из (рис. 4): реактора с холодной стенкой (1), изготовленного из нержавеющей стали; внутреннего кварцевого реактора (2); графитового подложко-

держателя (3); многозонного инжектора (4) в который рабочие и несущие газы подаются, смешиваются и равномерно распределяются над подложкой; системы нагрева и вращения (5), которая осуществляет индукционный нагрев и вращение подложки с подложкодержателем; системы пирометров (6) для измерения равномерности нагрева и системы *in-situ* мониторинга прогиба подложки и толщины осаденного слоя (7).

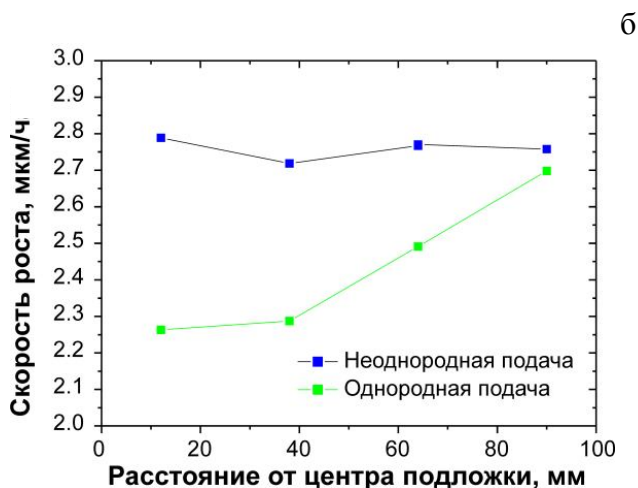
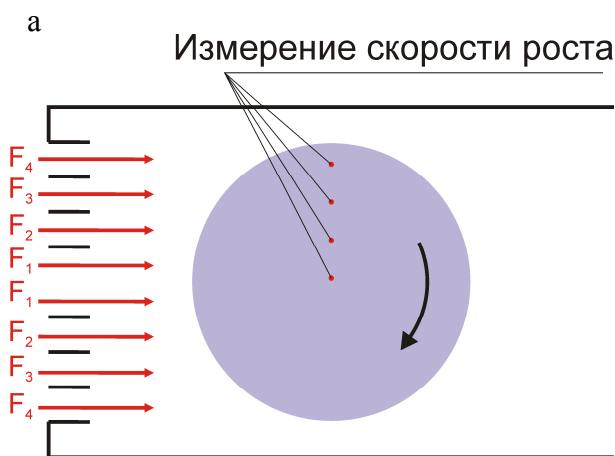


Рис 5. Независимая регулировка потоков по ширине реактора для оптимальной однородности (а) и скорость роста при однородной и оптимизированной неоднородной подаче (б).

F_1 – F_4 — потоки МО соединений, подаваемые через 7 каналов (зон инжекции)

Конструкция реакторного узла установки разрабатывалась на основе патента RU2673515C2, который описывает принцип создания многозонального инжектора с совместной подачей прекурсоров третьей группы и аммиака, обеспечивающего высокую скорость роста и независимое регулирование потоков по ширине реактора для создания равномерности осаждения на большой площади подложки (рис. 5, а).

Инжекция МО-соединений происходит через 7 зон (см. рис. 5, а). Концентрацию TMGa в каждой зоне можно регулировать независимо. Скорость роста измеряется рефлектометрическим способом во время процесса на 4 радиусах 200 мм подложки. Изменяя концентрацию МО-соединений, можно прямо во время процесса настраивать однородность скорости роста (рис. 5, б).

Разработанная конструкция реактора, по которой были поданы 2 заявки на патент, позволяет минимизировать количество формирующихся на оснастке депозитов и продлить срок ее службы, что ведет к удешевлению проведения технологического процесса.

Разработка реактора проводилась с использованием компьютерного моделирования процессов массо- и теплопереноса, а также химических процессов в газовой фазе и на всех внутренних поверхностях, включая поверхность растущего слоя. Целью моделирования была оптимизация геометрии реактора и режимов роста для минимизации паразитных реакций в газовой фазе и осаждения на верхней и боковых стенках реактора.

Также одной из главных проблем эпитаксии GaN на Si является растрескивание эпитаксиального слоя при охлаждении подложки под влиянием высоких растягивающих напряжений в слое из-за разницы коэффициентов термического расширения. Для преодоления этой проблемы проводилась оптимизация базовых технологических процессов с использованием комплексной компьютерной модели. Моделирование напряжений и дислокаций позволило оптимизировать толщины и состав слоев структуры, чтобы избежать растрескивания структуры во время процесса.

На рис. 6, а, представлен график изменения кривизны подложки во время процесса эпитаксии до оптимизации: при комнатной температуре происходит растрескивание структуры. На рис. 6, б, тот же график после оптимизации: дополнительные напряжения, создаваемые в растущих слоях, позволяют скомпенсировать напряжение растяжения слоя GaN во время охлаждения.

Ключевыми характеристиками и особенностями разрабатываемой установки являются:

- Количество одновременно обрабатываемых подложек: 1×200 мм, 1×150 мм, 3×100 мм, 7×76.2 мм, 13×50.8 мм.
- Многозонная инжекция компонентов в зону роста для настройки высокой однородности толщин и составов слоев твердых растворов.
- Контроль толщины и прогиба структуры во время роста (*in-situ*).
- Осаждение высокоомных буферных слоев GaN, легированных Fe и C.

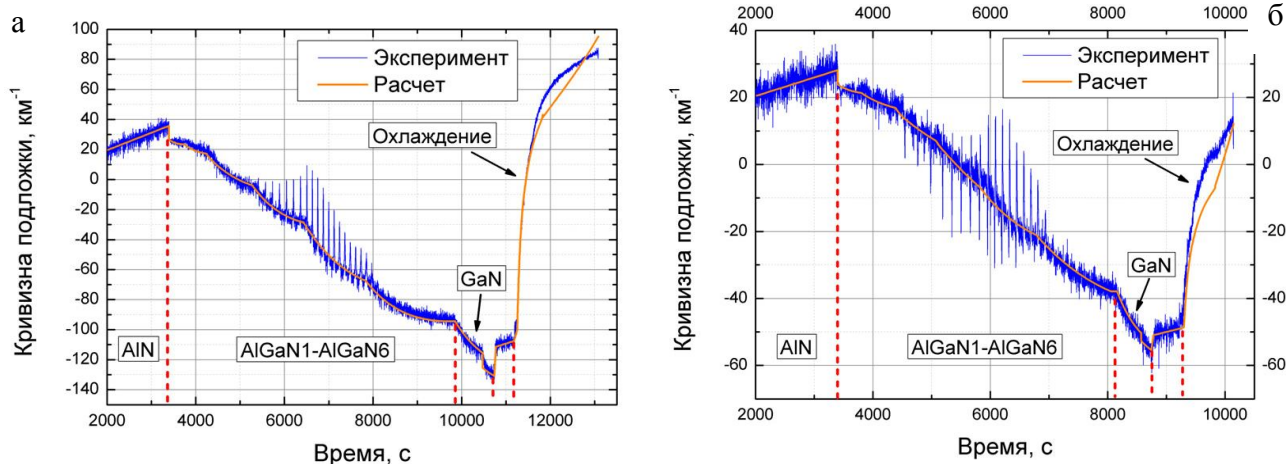


Рис. 6. Развитие кривизны растущей структуры во время эпитаксиального процесса до (а) и после (б) оптимизации процесса.

- Осаждение пассивирующего Si_3N_4 покрытия непосредственно в эпитаксиальном реакторе.

- Скорость роста GaN до 30 мкм/ч.

- Производительность (GaN на Si): до 2000 эпитаксиальных процессов/год.

- Наличие отечественного ПО, обеспечивающего контроль ростовых параметров, безопасности процесса и анализ состояния всех элементов установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В ходе реализации проекта были разработаны базовые технологические процессы создания транзисторных гетероэпитаксиальных структур; полученные результаты и целевые значения, закладываемые при проектировании установки, представлены в табл. 2.

Табл. 2. Параметры эпитаксиальных слоев

№	Параметр эпитаксиального слоя	Метод измерений	Целевые значения	Измеренное значение
1	Нелегированный GaN			
1.1	Однородность по толщине по площади структуры	РЭМ/оптическое отражение, σ	$\leq 5\%$	2.3
1.2	Ширина кривой качания	Рентгеновская дифрактометрия (002), $\theta/2\theta$	$\leq 400 \text{ arcsec}$	94
1.3	Фоновая концентрация примесей	ВИМС	$\leq 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{16}$
2	GaN, выращенный с высокой скоростью роста			
2.1	Скорость роста	Оптическое отражение	$\geq 30 \text{ мкм/ч}$	44
3	n-GaN:Si			
3.1	Однородность по толщине по площади структуры	РЭМ/оптическое отражение, σ	$\leq 5\%$	3.1%
3.2	Максимальный уровень легирования	Эффект Холла при комнатной температуре	$\geq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$6.1 \cdot 10^{18}$
3.3	Подвижность	Эффект Холла при комнатной температуре	$\geq 150 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	232
3.4	Однородность слоевого сопротивления по площади структуры	Бесконтактный метод измерения проводимости, σ	$\leq 10\%$	5.3
4	Изолирующий GaN: (C, Fe)			
4.1	Однородность по толщине по площади структуры	РЭМ/оптическое отражение, σ	$\leq 5\%$	1.2 (Fe) 0.8 (C)
4.2	Максимальный уровень легирования	ВИМС	$\geq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$5.8 \cdot 10^{18}$
4.3	Слоеое сопротивление	Бесконтактный метод	$\geq 3 \cdot 10^5 \text{ Ом/кв.}$	$3.3 \cdot 10^5$
5	AlGaN			
5.1	Однородность по толщине по площади	РЭМ/оптическое отражение, σ	$\leq 6\%$	1.2
5.2	Содержание Al	XRD	0–100%	0, 5, 8, 18, 25, 44, 68, 100
5.3	Однородность по составу по площади структуры	XRD/ фотолюминесценция, σ	$\leq 7\%$	2.0
5.4	Скорость роста AlGaN с содержанием Al = 15%	Оптическое отражение	$\geq 5 \text{ мкм/ч}$	5.36
6	Диэлектрик Si_3N_4			
6.1	Однородность по толщине по площади	РЭМ/оптическое отражение, σ	$\leq 10\%$	3.3
6.2	Толщина слоя	РЭМ/оптическое отражение	$< 100 \text{ нм}$	50

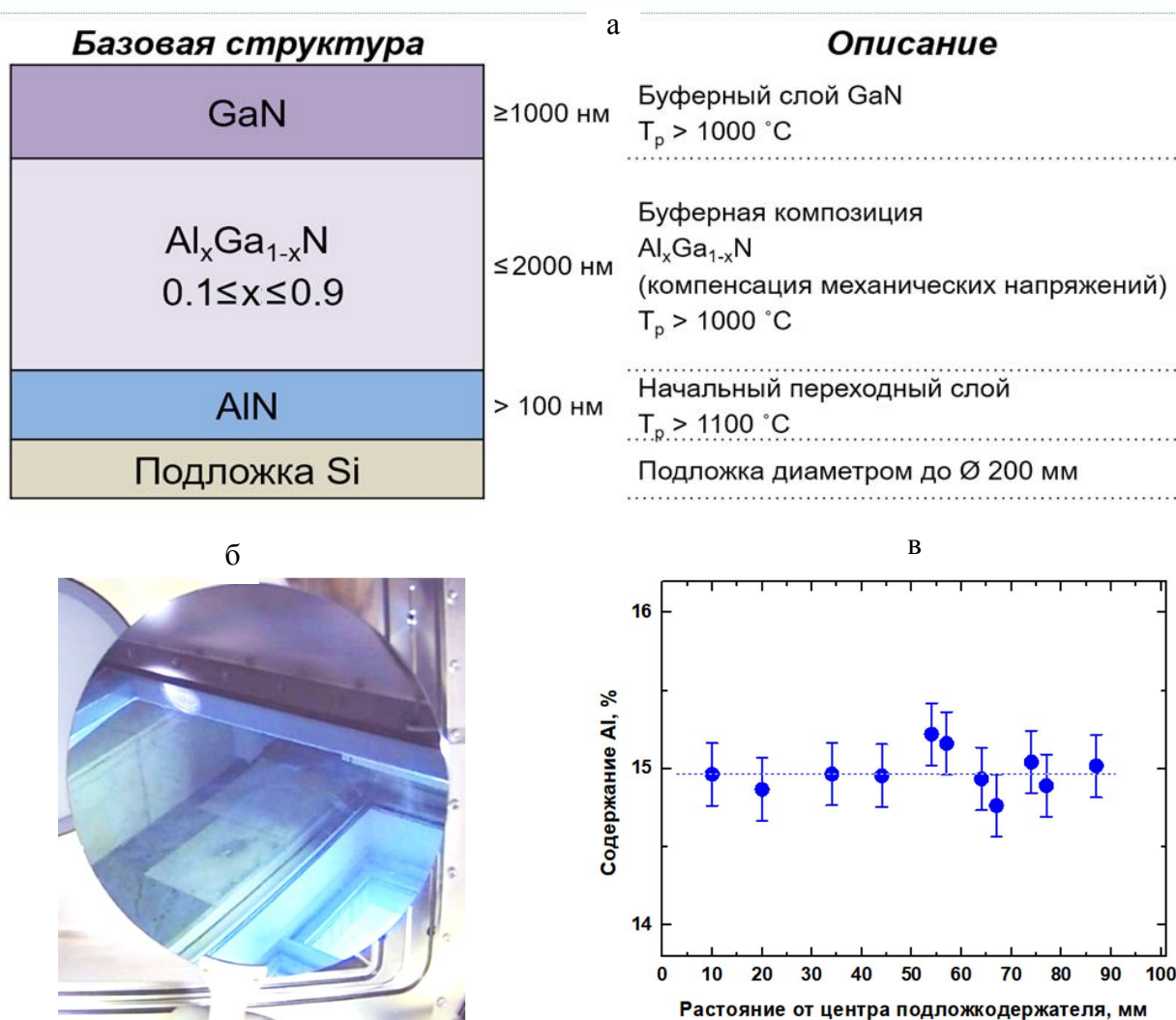


Рис. 7. Схема базовой структуры нелегированного GaN (а), фотография базовой структуры зародышевого слоя AlN (б) и график распределения Al по составу AlGaIn по площади структуры на подложке 200 мм (для AlGaIn с содержанием Al = 15%) (в).

На рис. 7, а, представлена схема базовой структуры нелегированного GaN. На рис. 7, б, показана фотография эпитаксиального зародышевого слоя AlN. На рис. 7, в, приведен график распределения содержания Al в слое AlGaIn. Видно, что неоднородность по составу AlGaIn с содержанием Al = 15% по площади структуры составила менее 2%.

На выращенной на данной установке транзисторной структуре были измерены следующие характеристики:

- подвижность $1500\text{--}1600\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$;
- концентрация носителей $1.1\text{--}1.2 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$.

Эта структура имела следующий дизайн (рис. 8, а). На подложке Si выращивались зароды-

шевый слой AlN, далее буферный слой AlGaIn сложной композиции (определяет кристаллическое качество и рабочее напряжение транзистора), после слой GaN и спейсер AlN (для повышения подвижности носителей), затем барьерный слой AlGaIn и пассивирующий слой Si_3N_4 . Фотография этой структуры, выращенной на подложке диаметром 200 мм, приведена на рис. 8, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная установка МОС-гидридной эпитаксии является первым отечественным образцом оборудования, доказавшим свою пригодность для выращивания транзисторных GaN гетероструктур

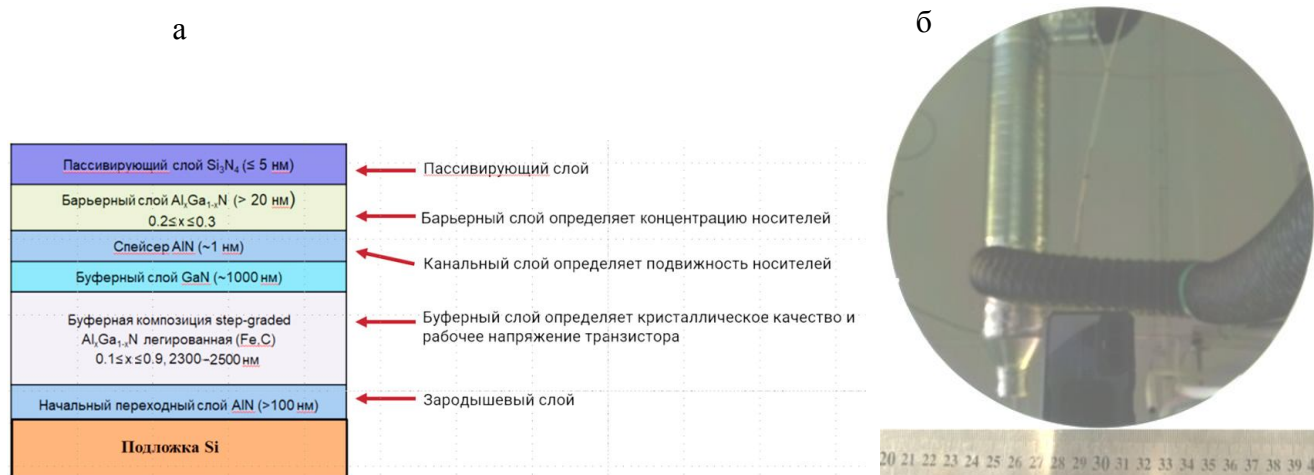


Рис. 8. Схема тестовой транзисторной гетероструктуры (а) и внешний вид тестовой гетероструктуры (б).

на различных типах подложек, в том числе на кремниевых, диаметром до 200 мм. Благодаря оптимизированному малогабаритному реактору, малой продолжительности эпитаксиального процесса и меньшей по сравнению с зарубежными аналогами цене, установка является предпочтительным инструментом для разработки новых технологий, проведения НИОКР, а также для организации опытного производства.

Работа была выполнена в рамках комплексного проекта "Разработка и организация производства промышленно-ориентированного специального технологического оборудования газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений для реализации базовых технологических процессов эпитаксиального роста III-N гетероструктур на подложках диаметром до 200 мм" в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 17 февраля 2016 г. № 109 "Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета российским организациям на финансовое обеспечение части затрат на создание научно-технического задела по разработке базовых технологий производства приоритетных электронных компонентов и радиоэлектронной аппаратуры".

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бондарь Д. Нитрид галлия — премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники // Компоненты и технологии. 2018. № 4. С. 134–137. URL: <https://kit-e.ru/nitrid-galliya/>
- Гуминов Н.В., Мьо М.Т., Романюк В.А., Шомухмадов Д.П. Сравнение характеристик GAAS и GAN hemt-транзисторов // Известия вузов. Электроника. 2019. Т. 24, № 1. С. 42–50. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36948530>
- Padwal P. Global GaN Semiconductor Devices Market Size & Share Report 2030. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/379543309_Global_GaN_Semiconductor_Devices_Market_Size_Share_Report_2030
- Акчурун Р.Х., Мармалюк А.А. МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 488 с.
- Лундин В.В., Заварин Е.Е., Сахаров А.Ф., Цацульников А.Ф., Устинов В.М. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 1. С. 5–9. URL: <http://iairas.ru/mag/2017/abst1.php#abst1>
- Великовский Л.Э., Сим П.Е., Демченко О.И. и др. Технология СВЧ транзисторов на основе InAlN/GaN и AlGaIn/GaN гетероструктур // VIII Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ", 2019 г. С. 625–628. URL: https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2019/1/06_09.pdf
- Федотов С.Д., Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Соколов Е.М., Стаценко В.Н. Гетероструктуры Ga(Al)N на сверхвысокоомном эпитаксиальном кремнии диаметром 150 мм для СВЧ и силовой электроники // Наноиндустрия. 2024. Т. 17, № S10-1 (128). С. 150–154. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68016112>
- Su J., Armour E., Lee S.M., Arif R., Papasouliotis G.D. Uniform growth of III-nitrides on 200 mm silicon substrates using a single wafer rotating disk MOCVD reactor // Phys. Status Solidi (a). 2016. Vol. 213, no. 4. P. 856–860. DOI: 10.1002/pssa.201532708
- Бунтов Е. Гетероструктуры на основе нитрида галлия (GaN) и технологии компании OMMIC на их основе // СВЧ электроника. 2017. № 3. С. 48–51. URL: <https://microwave-e.ru/materials/geterostruktury-na-osnove-gan/>

10. *Irvine S., Capper P.* Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE): Growth, Materials Properties, and Applications. E-book. Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications 2019. 584 p. DOI: 10.1002/9781119313021
11. *Di Paolo E.M.* SiC Technology: Materials, Manufacturing, Devices and Design for Power Conversion. Springer, 2024. 320 p. DOI: 10.1007/978-3-031-63418-5

ООО "МОНОЛИУМ", Санкт-Петербург (Заварин Е.Е., Лундин В.В.)

ООО "СОФТ-ИМПАКТ", Санкт-Петербург (Базаревский Д.С.)

АО "Научно-исследовательский институт точного машиностроения", Москва, Зеленоград (Бирюков М.Г., Афонин П.Е., Щуренкова С.А., Пугачев Д.Ю.)

Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург (Цацульников А.Ф., Сахаров А.В., Заварин Е.Е.)

Контакты: Пугачев Дмитрий Юрьевич,
dpugachev@niitm.ru

Материал поступил в редакцию 06.06.2025

EQUIPMENT FOR MOCVD EPITAXY OF GALLIUM NITRIDE ON SILICON SUBSTRATES UP TO 200 mm IN DIAMETER FOR THE PRODUCTION OF TRANSISTOR HETEROSTRUCTURES

M. G. Biryukov¹, P. E. Afonin¹, S. A. Shchurenkova¹, D. Y. Pugachev¹,
A. F. Tsatsulnikov², A. V. Sakharov², E. E. Zavarin^{2,3}, W. V. Lundin³, D. S. Bazarevskiy⁴

¹JSC NIITM, Zelenograd, Moscow, Russia

²STC of Microelectronics RAS, St. Petersburg, Russia

³Monolum Ltd., St. Petersburg, Russia

⁴Soft-Impact Ltd., St. Petersburg, Russia

The advantages of using III-N GaN heterostructures on silicon substrates are considered. The general design, methods for optimizing the deposition process and key characteristics of the developed equipment for metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD) for the implementation of basic technological processes on silicon substrates with a diameter of up to 200 mm for the production of transistor heterostructures are presented. The results of the implemented basic technological processes are shown

Keywords: MOCVD system, transistor heterostructure, gallium nitride on silicon, modeling, basic technological processes

REFERENCES

1. Bondar D. [Gallium nitride — a premier among new materials for semiconductor microelectronics]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2018, no. 4, pp. 134–137. URL: <https://kit-e.ru/nitrid-galliya/> (In Russ.).
2. Guminov N.V., Myo M.T., Romanjuk V.A., Shomakhmadov D.P. [Comparison of GAAS and GAN hemt-characteristics]. *Izvestiya vuzov. Ehlektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2019, vol. 24, no. 1, pp. 42–50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36948530>
3. Padwal P. *Global GaN Semiconductor Devices Market Size & Share Report 2030*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/379543309_Global_GaN_Semiconductor_Devices_Market_Size_Share_Report_2030
4. Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A. *MOS-gidridnaya ehpi-taksiya v tekhnologii materialov fotoniki i ehlektroniki* [MOCVD Epitaxy in Photonics and Electronics Materials Technology]. Moscow, TEKHNOFERA Publ, 2018. 488 p. (In Russ.).
5. Lundin W.V., Zavarin E.E., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Ustinov V.M. [III-N movpe reactors: present and future]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 1, pp. 5–9. DOI: 10.18358/np-27-1-i59 (In Russ.).
6. Velikovskiy L.E., Sim P.E., Demchenko O.I. et al. [Technology of microwave transistors based on InAlN/GaN and AlGaIn/GaN heterostructures]. *Vse-rossiiskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Ehlektronika i mikroehlektronika SVCH"* [Proc. VIII All-Russ. Sci-Tech. Conf.: "Microwave electronics and microelectronics"], 2019, pp. 625–628. URL: https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2019/1/06_09.pdf (In Russ.).
7. Fedotov S.D., Zavarin E.E., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Sokolov E.M., Statsenko V.N. [GA(AL)N heterostructures on 6-inch ultra-high resistivity silicon epiwafers for microwave and power electronics]. *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2024, vol. 17, no. S10-1(128), pp. 150–154. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68016112> (In Russ.).
8. Su J., Armour E., Lee S.M., Arif R., Papasouliotis G.D. Uniform growth of III-nitrides on 200 mm silicon substrates using a single wafer rotating disk MOCVD reactor. *Phys. Status Solidi (a)*, 2016, vol. 213, no. 4, pp. 856–860. DOI: 10.1002/pssa.201532708
9. Buntov E. [Heterostructures based on gallium nitride (GaN) and OMMIC technologies based on them]. *SVCH ehlektronika* [Microwave electronics], 2017, no. 3, pp. 48–51. URL: <https://microwave-e.ru/materials/geterostruktury-na-osnove-gan/> (In Russ.).
10. Irvine S., Capper P., editors. *Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE): Growth, Materials Properties, and Applications*. E-book. Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications, 2019. 584 p. DOI: 10.1002/9781119313021
11. Di Paolo E.M., editor. *SiC Technology: Materials, Manufacturing, Devices and Design for Power Conversion*. Springer, 2024. 320 p. DOI: 10.1007/978-3-031-63418-5

Contacts: Pugachev Dmitriy Yur'evich,
dpugachev@niitm.ru

Article received by the editorial office on 06.06.2025

INTRODUCTION

The most promising direction of microelectronics is the creation of semiconductors based on III-N GaN heterostructures, since they best meet the ever-increasing requirements for the technical characteristics of end products, such as microwave and power transistors [1, 2]. According to analytics [3], the market for products based on GaN semiconductors is growing annually by 22.1% (Fig. 1).

Fig. 1. GaN semiconductor market.

At present, the main industrial method for producing III-N heterostructures is MOS hydride (MOCVD) epitaxy [4], due to its higher productivity compared to molecular-beam epitaxy. At present, there is no industrial production of MOCVD epitaxy installations in Russia. Therefore, the issue of creating domestic installations of a modern technical level for the production of such equipment is becoming increasingly relevant.

The development of the 200 mm MOCVD epitaxy setup was based on the MOCVD epitaxy setups developed at the Scientific and Technical Center of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences and Monolum LLC (patent RU2673515C2) [5]. These setups make it possible to grow III-N heterostructures on substrates up to 150 mm in diameter. Transistors with parameters corresponding to the existing commercial level were created from the transistor heterostructures grown on these setups at enterprises of the Russian electronics industry (JSC NPF Mikran, MIET, JSC NPP Istok named after Shokin, JSC NPP Salyut, FSUE RNIIRS, NRC Kurchatov Institute) [6, 7].

It is worth noting that both the setup described in this article for substrates up to 200 mm in diameter and the above-mentioned setups for substrates of smaller diameters are single-substrate. This corresponds to a pronounced trend of the last decade — the transition from multi-substrate reactors to single-substrate ones when growing complex heterostructures, primarily for electronic applications [8]. This transition is similar to what happened earlier in silicon technology.

ADVANTAGES OF USING GaN HETEROSTRUCTURES AND APPLIED TYPES OF SUBSTRATES

The main advantage of wide-bandgap III-N heterostructures based on AlInGaN is the ability to manufacture microwave and power transistors with high breakdown voltage, current density, and power, which

significantly improves the mass and dimensional parameters of the final products.

Sapphire, silicon carbide, and silicon substrates are usually used to produce III-N GaN heterostructures [9]. A comparison of the characteristics of substrates for obtaining GaN heterostructures [10] is given in Tab. 1. The most advanced heterostructures are realized on sapphire and silicon carbide substrates. However, sapphire substrates have low thermal conductivity and are not used for microwave and power electronics. SiC substrates, due to their high thermal conductivity and the proximity of the crystal lattice parameters and thermal expansion coefficient (TEC) to nitride structures, allow growing high-quality heterostructures for transistors; however, such substrates are expensive and only recently it has become possible to order SiC substrates with a diameter of 200 mm in limited quantities [11]. It is worth noting that most of the technological lines in the world use SiC substrates with a diameter of 100–150 mm. The development of nitride technologies, accompanied by an increase in the size of substrates, has led to the need to use inexpensive silicon substrates up to 200 mm in size and, consequently, to the development of the corresponding epitaxial equipment.

Tab. 1. Comparison of substrate characteristics for obtaining GaN heterostructures

GENERAL DESIGN AND KEY CHARACTERISTICS OF THE DEVELOPED INSTALLATION

Structurally, the MOCVD epitaxy installation consists of three blocks (Fig. 2): electrical at the top (1), vacuum on the right (2) and the main one in the center (3).

Fig. 2. Composition of the MOCVD installation.
1 — electrical block; 2 — vacuum block; 3 — main block

The main block consists of a gas system (3.1), a glove box (3.2) for loading substrates, a gateway (3.3) and a reactor unit (3.4) (Fig. 3).

Fig. 3. Main block composition (3).
3.1 — gas system; 3.2 — glove box for loading substrates; 3.3 — airlock; 3.4 — reactor unit

Sources of metal-organic compounds (MOCs) are located under the gas system. Substrates are loaded into the reactor manually through the gateway (3.3) and glove box (3.2). The reactor design of the installation includes a port for connecting an automatic loader, which in the future will allow for automatic substrate loading.

The reactor of the setup is horizontal and consists of (Fig. 4): a reactor that has a cold wall (1) and is made of stainless steel; an internal quartz reactor (2); a graphite substrate holder (3); a multi-zone injector (4) into which the working and carrier gases are fed, mixed, and uniformly distributed over the substrate; a heating and rotation system (5), which carries out induction heating and rotation of the substrate with the substrate holder; a pyrometer system (6) for measuring the uniformity of heating and an *in-situ* monitoring system for substrate deflection and deposited layer thickness (7).

Fig. 4. Schematic representation of the reactor unit of the installation.

1 — reactor with a cold wall; 2 — internal quartz reactor; 3 — graphite substrate holder; 4 — multi-zone injector; 5 — heating and rotation system; 6 — pyrometer system; 7 — substrate deflection and deposited layer thickness monitoring system

The reactor unit design of the setup was developed based on patent RU2673515C2, which describes the principle of creating a multi-pass injector with a joint feed of precursors of the third group and ammonia, providing a high growth rate and independent flow control across the width of the reactor to create uniform deposition over a large substrate area (Fig. 5, a).

Fig. 5. Independent flow control across the reactor width for optimal homogeneity (a) and growth rate in the events of uniform and optimized non-uniform feeds (б).

F1–F4 — flows of MO compounds supplied through 7 channels (injection zones)

MO compounds are injected through 7 zones (see Fig. 5, a). The concentration of TMGa in each zone can be independently adjusted. The growth rate is measured by the reflectometric method during the process on 4 radii of 200 mm of the substrate. By changing the concentration of MO compounds, it is possible to adjust the homogeneity of the growth rate directly during the process (Fig. 5, б).

The developed reactor design, for which two patent applications were filed, allows to minimize the number of deposits formed on the equipment and to extend

its service life, which leads to a reduction in the cost of the technological process.

The reactor was developed using computer modeling of mass and heat transfer processes, as well as chemical processes in the gas phase and on all internal surfaces, including the surface of the growing layer. The purpose of the modeling was to optimize the reactor geometry and growth modes to minimize parasitic reactions in the gas phase and deposition on the upper and side walls of the reactor.

Also, one of the main problems of GaN epitaxy on Si is cracking of the epitaxial layer during cooling of the substrate under the influence of high tensile stresses in the layer due to the difference in thermal expansion coefficients. To overcome this problem, optimization of the basic technological processes was carried out using a complex computer model. Modeling of stresses and dislocations made it possible to optimize the thicknesses and composition of the structure layers in order to avoid cracking of the structure during the process.

Fig. 6, a, shows a graph of the change in the substrate curvature during the epitaxy process before optimization: at room temperature, cracking of the structure occurs. Fig. 6, б — the same graph after optimization: additional stresses created in the growing layers make it possible to compensate for the tensile stress of the GaN layer during cooling.

Fig. 6. Development of curvature of the growing structure during the epitaxial process before (a) and after (б) process optimization.

The key characteristics and features of the developed setup are:

- The number of simultaneously processed substrates: 1×200 mm, 1×150 mm, 3×100 mm, 7×76.2 mm, 13×50.8 mm.
- Multi-zone injection of components into the growth zone to adjust high uniformity of thicknesses and compositions of solid solution layers.
- Control of thickness and deflection of the structure during growth (*in-situ*).
- Deposition of high-resistance GaN buffer layers doped with Fe and C.
- Deposition of a passivating Si₃N₄ coating directly in the epitaxial reactor.
- GaN growth rate up to 30 μm/h.
- Productivity (GaN on Si): up to 2000 epitaxial processes/year.
- Availability of domestic software that ensures control of growth parameters, process safety, and analysis of the state of all elements of the installation.

RESULTS OF IMPLEMENTATION OF BASIC TECHNOLOGICAL PROCESSES

During the implementation of the project, basic technological processes for creating transistor heteroepitaxial structures were developed; the results obtained and the target values set forth in the design of the installation are presented in Tab. 2.

Tab. 2. Epitaxial layer parameters

Fig. 7, a, shows the schematic diagram of the basic structure of undoped GaN. Fig. 7, б, shows a photograph of the epitaxial AlN seed layer. Fig. 7, в, shows a graph of the Al content distribution in the AlGaIn layer. It is evident that the composition inhomogeneity of AlGaIn with an Al content of 15% over the area of the structure was less than 2%.

Fig. 7. Schematic diagram of the basic structure of undoped GaN (a), photograph of the basic structure of the AlN seed layer (б) and a graph of the Al distribution by the AlGaIn composition over the area of the structure on a 200 mm substrate (for AlGaIn with an Al content of 15%) (в).

The transistor structure grown on this setup was measured, the following characteristics were obtained:

- mobility 1500–1600 cm²/(V s);
- carrier concentration 1.1–1.2 10¹³ cm⁻².

This structure had the following design (Fig. 8, a). On the Si substrate, the following layers were grown: a seed layer of AlN, then a buffer layer of Al-GaN of complex composition (determines the crystal quality and operating voltage of the transistor), then a layer of GaN and an AlN spacer (to increase carrier mobility), then a barrier layer of AlGaIn and a passivating layer

of Si₃N₄. A photograph of this structure grown on a substrate with a diameter of 200 mm is shown in Fig. 8, б.

Fig. 8. Schematic diagram of the test transistor heterostructure (a) and the appearance of the test heterostructure (б).

CONCLUSION

The developed MOCVD epitaxy setup is the first domestic sample of equipment that has proven its suitability for growing transistor GaN heterostructures on various types of substrates, including silicon, with a diameter of up to 200 mm. Due to the optimized small-sized reactor, short duration of the epitaxial process, and lower price compared to foreign analogues, the installation is a preferable tool for developing new technologies, conducting R & D, and organizing pilot production.

The work was carried out within the framework of the comprehensive project "Development and organization of production of industrially oriented special technological equipment for gas-phase epitaxy from metal-organic compounds for the implementation of basic technological processes of epitaxial growth of III-N heterostructures on substrates with a diameter of up to 200 mm" in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation of February 17, 2016 No. 109 "On approval of the Rules for the provision of a portion of the costs of creating a scientific and technical ground for the development of basic technologies for the production of priority electronic components and electronic equipment for financial support to Russian organizations from the federal budget".