

# GaN – ТЕХНОЛОГИЯ НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ СВЧ-МИКРОСХЕМ

Несмотря на достижения арсенидгаллиевой технологии монокристаллических СВЧ-микросхем, получаемые в последнее время результаты уже не вполне отвечают новым потребностям военной радиоэлектроники и стремительно развивающихся систем беспроводной связи. Для этих систем нужны монокристаллические усилители с высокими рабочими частотами, мощностью, КПД и линейностью.

Поэтому в последнее десятилетие ведутся поиски новых широкозонных материалов с более высокими, чем у GaAs, пробивными электрическими полями, большими подвижностью электронов и скоростью насыщения носителей, более высокой теплопроводностью. И здесь наибольшие успехи достигнуты в исследовании материалов, процессов изготовления и создания приборов на основе нитрида галлия (GaN). Параметры таких приборов оказались столь впечатляющими, что ведущие промышленные страны в целях совершенствования будущих информационных систем и систем национальной безопасности сочли необходимым сформировать государственные программы развития этого направления. Рассмотрим программы разработки GaN МИС СВЧ и GaN-транзисторов в трех главных мировых промышленных центрах – США, Европе и Японии.

И. Викулов, к.т.н.,  
Н. Кичаева

## ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ GaN-ТЕХНОЛОГИИ США

Американская программа, получившая название "Технологической инициативы в области широкозонных полупроводников" (Wide Bandgap Semiconductor Technology Initiative – WBGSTI), проводится по решению и под руководством DARPA – Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США. Программа ориентирована на разработку приборов военного назначения, хотя и не исключает двойное применение ее результатов. WBGSTI во многом аналогична программе 90-х годов MIMIC, направленной на развитие GaAs МИС СВЧ. Ее конечная цель – улучшение характеристик, прежде всего, систем вооружения. В программе участвуют исследовательские лаборатории всех трех видов вооруженных сил США: BBC (AFRL), Армии (ARL) и ВМС (NRL). В число исследуемых широкозонных материалов входят SiC, GaN и AlN.

Программа включает три фазы развития. Сообщения о первой фазе появились в 2004–2005 годы [1, 2]. Наиболее важными ее результатами стало создание высококачественных SiC-подложек диаметром 75 мм (табл.1) и разработка технологии эпитаксиального выращивания AlGaIn/GaN-структур для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT).

В ходе работ по улучшению характеристик GaN эпитаксиальных структур, выращиваемых молекулярно-лучевой эпитаксией (МБЕ) и осаждением из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD), был достигнут значительный прогресс в воспроизводимости активных слоев с высокой подвижностью носителей и в получении однородных характеристик материала по пластине (табл.2).

Вторая фаза программы проводится в 2005–2007 годы. Третья запланирована на 2008–2009 годы. В задачи второй и третьей фаз программы WBGSTI входят:

- глубокий анализ физики отказов структур на основе широкозонных полупроводников с целью реализации высоконадежных приборов и МИС;
- разработка и внедрение физических моделей приборов, гарантирующих точный расчет их параметров;



**Таблица 1. Параметры подложек, полученные в ходе выполнения первой фазы программы WBGSTI**

Материал подложки*	Размер пластины, мм		Плотность дефектов, см <sup>-2</sup>		Удельное сопротивление, Ом·см	
	В начале программы	Окончание I фазы	В начале программы	Окончание I фазы	В начале программы	Окончание I фазы
SiC	50	75	>80**	5**	<10 <sup>5</sup>	>10 <sup>11</sup>
GaN	15×15	50	>10 <sup>9</sup>	7·10 <sup>6</sup>	<10 <sup>2</sup>	>10 <sup>9</sup>
AlN	27	25	<10 <sup>4</sup>	<10 <sup>3</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>

\*Все подложки – полуизолирующие, \*\*Микропоры/см<sup>2</sup>.

- демонстрация воспроизводимости процессов изготовления приборов и МИС на основе широкозонных материалов;
- получение высоконадежных приборов и МИС с более высокими параметрами по сравнению с GaAs-приборами и МИС СВЧ- и мм-диапазонов;
- решение тепловых проблем и проблем корпусирования.

Для того, чтобы продемонстрировать возможности широкого применения новых приборов и МИС, в программе предусмотрено три направления работ: создание приемопередающего модуля X-диапазона (8–12 ГГц), разработка мощного усилительного модуля Q-диапазона (40–50 ГГц) и разработка широкополосного мощного усилительного модуля (табл.3).

**Приемопередающий модуль X-диапазона** будет содержать МИС усилителя мощности и маломощного усилителя. Ожидается, что при выходной мощности 10 Вт он по основным параметрам (включая коэффициент шума) и размерам не будет уступать существующим приемопередающим модулям АФАР. Ведущий разработчик – компания Raytheon при участии фирмы Cree (разработчик подложек и приборов на основе SiC).

**Усилитель мощности Q-диапазона** будет включать монолитные микросхемы усилителей, рассчитанные на частоты свыше 40 ГГц. Модуль предназначен для систем спутниковой связи. Разработку, проводимую компаниями Monolithics, Emcore, Boeing, Sirenza Micro Devices, возглавляет компания Northrop Grumman Space Technology.

**Широкополосный мощный усилительный модуль** должен быть сформирован на основе усилительных микросхем с мгновенной полосой частот с десятикратным перекрытием (например, от 2 до 20 ГГц). Модуль предназначен для систем радиоэлектронного противодействия. Руководитель работ фирма TriQuint Semiconductor, в команду которой

**Таблица 2. Результаты разработки технологии эпитаксиального выращивания, достигнутые в ходе первой фазы программы WBGSTI**

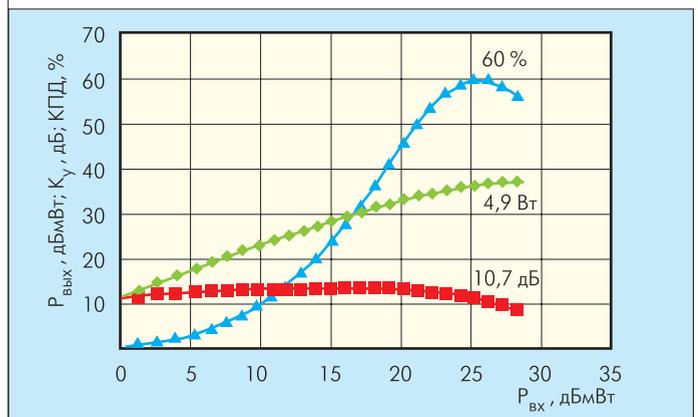
Характеристика	МВЕ		МОСVD	
	Начало программы	Окончание I фазы	Начало программы	Окончание I фазы
Диаметр пластины*, мм	50	75	50	75
Вариации поверхностного сопротивления, %	±5	±2,16	>±10	±1,72
Подвижность Холла, см <sup>2</sup> /В·с	<1000	1443	1500	1719
Однородность электрических параметров, %	Плохая	±2	Плохая	±2,8

\*Данные по 90% используемой площади пластины.

входят компании BAЕ Systems, Lockheed-Martin, III-V, Nitronex и Emcore.

В 2006 году были опубликованы промежуточные результаты разработки приемопередающего модуля и усилительного модуля Q-диапазона (рис. 1 и 2) [3].

Фазы II и III программы освоения широкозонных полупроводников также предусматривают большой объем работ по испытаниям на надежность и оценке отказов, с тем чтобы обеспечить долговременные стабильные параметры выпускаемых приборов и МИС. Особое внимание будет уделено отработке устойчивых технологических процессов изготовления широкой номенклатуры приборов и МИС.



**Рис. 1. Характеристики приемопередающего модуля X-диапазона (промежуточный результат)**

В ходе программы будут разрабатываться и приемлемые по стоимости корпуса для МИС, которые должны в полном объеме поддерживать требуемые параметры и надежную работу МИС при любых внешних воздействиях. Производство корпусов и сборка модулей должны выполнять высокопроизводительные установки с минимальным использованием ручного труда. Кроме того, запланированы работы по тепловому и электромагнитному моделированию характеристик модулей.

DARPA ожидает, что в результате выполнения программы освоения широкозонных полупроводников в стране будет развернуто производство широкозонных материалов, приборов, монолитных схем и приемопередающих модулей на их основе. Это позволит значительно улучшить характеристики военных и коммерческих систем при приемлемой их стоимости, высокой надежности и стабильных рабочих характеристиках.

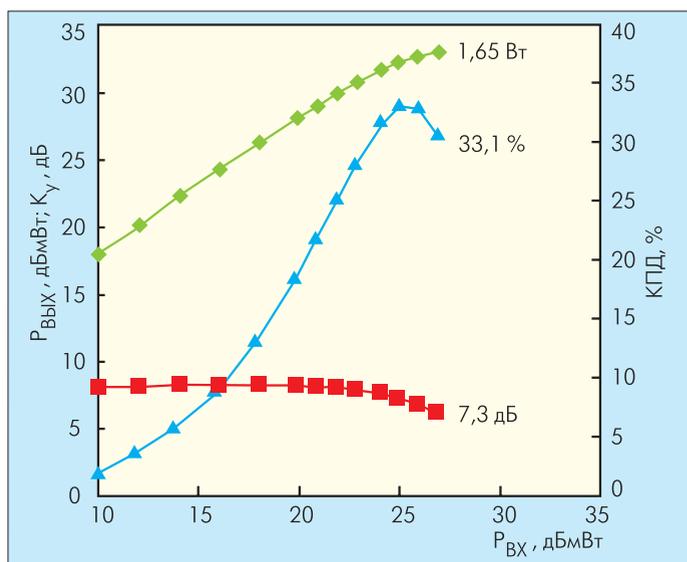


Рис.2. Параметры усилителя мощности Q-диапазона (промежуточный результат)

### ЕВРОПЕЙСКАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ GaN-ТЕХНОЛОГИИ

В Европе проводится крупномасштабный многонациональный проект KORRIGAN, объединяющий усилия ведущих фирм и лабораторий европейских стран. Цель проекта – разработка собственной передовой GaN HEMT-технологии (рис.3) [4].

В задачи проекта входит создание самостоятельной европейской структуры поставок надежных современных GaN-приборов и МИС СВЧ-диапазона, а также промышленных мощностей по их производству для обеспечения всех основных оборонных предприятий Европы. В проекте участвуют 19 промышленных компаний и 10 исследовательских лабораторий семи стран – Франции (семь участников), Италии (семь участников), Нидерландов (два участника), Германии (один участник), Испании (три участника), Швеции (пять участников) и Великобритании (четыре участника) (рис.4). Такой состав участников располагает необходимыми уровнями знаний и опыта во всех ключевых областях полупроводниковой технологии: процессах обработки, производства, проектирования схем, корпусирования и моделирования. Руководит проектом французская компа-

ния Thales Airborne Systems. Стоимость проекта – 40 млн. евро, из которых 29 млн. евро выделяет европейский фонд развития микроэлектронных компонентов.

Чтобы ускорить к 2009 году выход на намеченные рубежи развития GaN-технологии, вся работа разделена на шесть субпроектов: получение высококачественных материалов, изготовление приборов и микросхем, оценка надежности, конструирование с учетом тепловых проблем, испытания в составе систем.

**Материалы.** В технологии GaN HEMT будут использованы подложки карбида кремния (SiC), сапфира и кремния. При этом особое внимание будет уделено объемному росту кристаллов SiC. Важная проблема – диаметр подложки, от значения которого зависят экономическая целесообразность и возможность промышленного освоения GaN-технологии. Будет проанализировано несколько типов структур и методов эпитаксиального выращивания GaN.

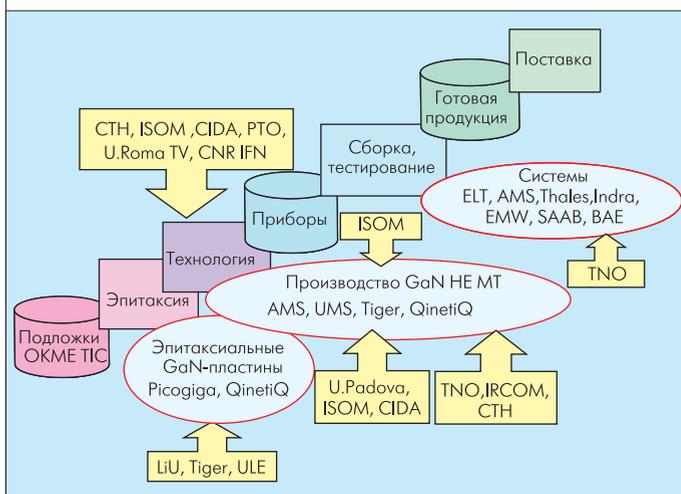


Рис.4. Схема взаимных поставок фирм-участников европейского проекта по GaN

**Технология приборов и микросхем.** Здесь усилия будут направлены на разработку экономически эффективных процессов создания GaN HEMT и МИС СВЧ. Речь идет об общей технологии изготовления активных и пассивных компонентов, проектировании и изготовлении приборов и МИС, создании моделей на основе НЧ- и ВЧ-характеристик разрабатываемых устройств. В целом предполагается использовать подложки из карбида кремния (300 пластин), кремния (50 пластин) и сапфира (60 пластин).

**Надежность.** В этом направлении предстоит провести анализ паразитных эффектов, таких как коллапс тока, возникающий из-за наличия ловушек в подложке; и систематический анализ долговременной надежности GaN HEMT и пассивных схем; изучить механизмы отказов; оценить устойчивость приборов при экстремальных режимах работы.

**Тепловые проблемы и корпусирование.** Цель субпроекта – обеспечить соответствующий тепловой режим при интеграции мощных GaN-приборов в действующие системы.



Рис.3. Основные этапы развития GaN HEMT технологии европейского проекта KORRIGAN

**Таблица 3. Значения целевых параметров основных типов модулей на этапах выполнения второй и третьей фаз программы WBGSTI**

Параметр	Фаза II		Фаза III	
	18 месяцев	36 месяцев	48 месяцев	60 месяцев
	Транзистор	Транзистор	МИС	Модуль
<b>Приемопередающий модуль X-диапазона</b>				
Напряжение стока, В	28	40	48	48
Ширина затвора, мкм	1250	1250	–	–
Рабочая частота, ГГц	8–12	8–12	8–12	8–12
Выходная мощность <sup>1</sup> , Вт	7,94	7,94	15	60
КПД, %	60	60	55	35
Усиление по мощности, дБ	12	12	16	18–20
Выход годных приборов по СВЧ параметрам <sup>2</sup> , %	50	50	50	–
Допустимый разброс выходной мощности <sup>3</sup> , дБ	1,5	1	1	–
Допустимый разброс КПД, %	6	3	3	–
Допустимый разброс усиления в режиме малого сигнала <sup>3</sup> , дБ	1,5	1	1	–
Предельная входная мощность МШУ, Вт	–	–	–	50
Долговременная стабильность мощности <sup>4</sup> , ч	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
<b>Усилитель мощности Q-диапазона</b>				
Напряжение стока, В	25	28	28	28
Ширина затвора, мкм	500	500	–	–
Рабочая частота, ГГц	>40	>40	>40	>40
Выходная мощность <sup>1</sup> , Вт	1,26	1,58	4	20
КПД, %	27	35	37	30
Усиление по мощности, дБ	7	8	7,5	13
Выход годных приборов по СВЧ параметрам <sup>2</sup> , %	20	50	50	–
Допустимый разброс выходной мощности <sup>3</sup> , дБ	1,5	1	1,5	–
Допустимый разброс КПД <sup>3</sup> , %	6	3	6	–
Допустимый разброс усиления в режиме малого сигнала, дБ	1,5	1	1,5	–
Долговременная стабильность мощности <sup>4</sup> , ч	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
<b>Широкополосный усилитель мощности</b>				
Напряжение стока, В	40	40	48	48
Ширина затвора, мкм	400	1250	–	–
Рабочая частота, ГГц	8–12	8–12	2–20	2–20
Выходная мощность <sup>1</sup> , Вт	2,63	7,94	15	100
КПД, %	60	60	30	20
Усиление по мощности, дБ	10	12	9	30
Выход годных приборов по СВЧ параметрам <sup>2</sup> , %	50	50	50	–
Допустимый разброс выходной мощности <sup>3</sup> , дБ	1,5	1	1	–
Допустимый разброс КПД <sup>3</sup> , %	6	3	3	–
Допустимый разброс усиления в режиме малого сигнала <sup>3</sup> , дБ	1,5	1	1	–
Долговременная стабильность мощности <sup>4</sup> , ч	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>

*Примечание.* 1 – измеряется при компрессии 2 дБ; 2 – часть приборов из всех годных пластин с параметрами, не уступающими целевым; 3 – определяется как стандартное отклонение измеренных значений по 100 приборам/МИС на всех годных пластинах; 4 – снижение выходной мощности на 1 дБ относительно уровня, полученного в начале измерений.

Намечены работы по проектированию оптимальных с точки зрения теплоотвода транзисторных ячеек и по улучшению эффективности теплоотвода за счет снижения теплового сопротивления приборов. Предметом исследования станут перспективные методы сборки и корпусирования мощных приборов с целью их системной интеграции, а также вопросы моделирования окружающей теплопроводящей среды и температуры канала транзисторов для различных конфигураций микросхем.

**Применение разработанных компонентов.** Этот суб-проект предусматривает оценку соответствия GaN-микросхем требованиям действующих военных систем с учетом технических требований к опытным образцам и результатов анализа преимуществ GaN-технологии в целом по достигнутым параметрам и стоимости.

**Опытные образцы.** Эта часть программы посвящена проектированию и испытанию образцов микросхем мощных усилителей S- и X-диапазонов, широкополосных малошумящих

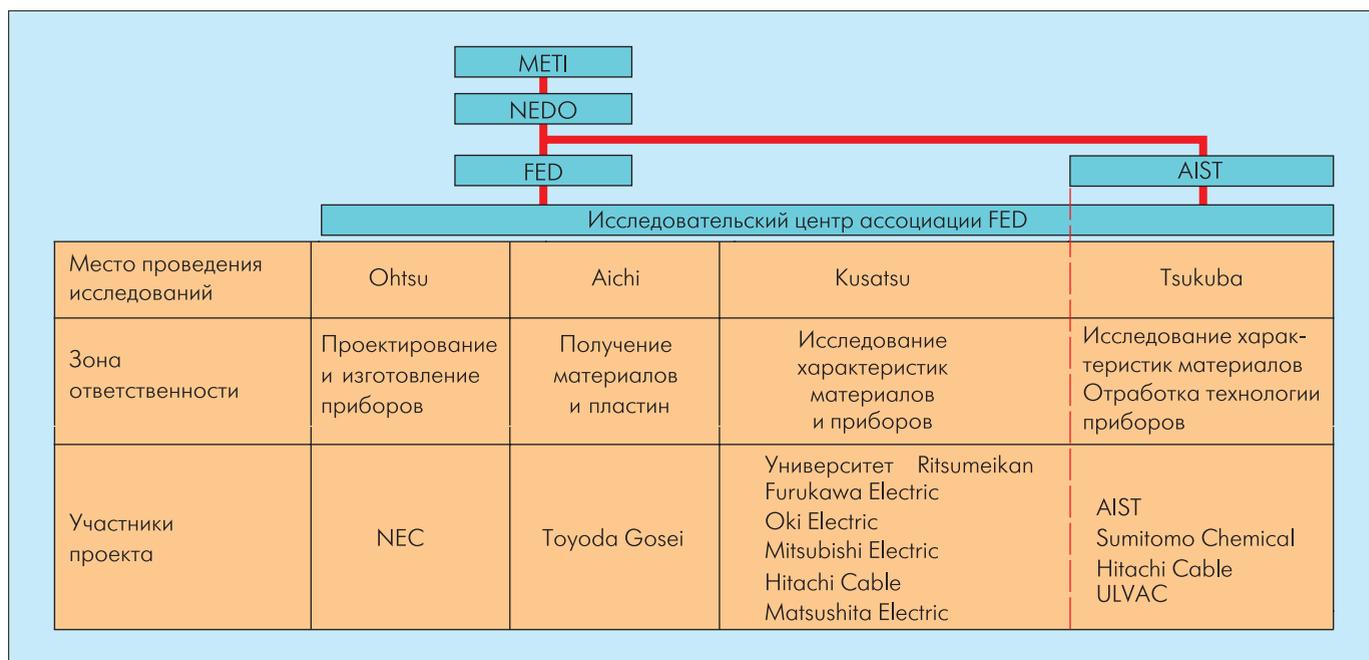


Рис.5. Японский проект развития мощных высокочастотных нитридных приборов (сентябрь 2002 года – март 2007-го)

усилителей и мощных переключателей, выполняющих наиболее критические функции военной аппаратуры в диапазоне частот до 20 ГГц. Будут изготовлены несколько образцов модулей. Завершение проекта KORRIGAN намечено на 2009 год.

### GaN-ПРОЕКТ ЯПОНИИ

В Японии большое значение придается развитию инфраструктуры следующего поколения беспроводных систем, обеспечивающих новые виды услуг в области мобильной и широкополосной связи. Рассматривается возможность применения в этих системах мощных гетероструктурных полевых транзисторов (HFET) на основе AlGaIn/GaN с высокими рабочими частотами [5].

В 1999 году японская Организация по новым разработкам в энергетике и промышленности (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) поддержала "Региональный консорциумный проект по разработке нитридных полупроводниковых электронных приборов для систем мобильной связи и датчиков". Проект был завершен в марте 2000 года. Были разработаны AlGaIn/GaN HFET, выполненные

на тонких сапфировых подложках, с импульсной мощностью 113 Вт. В сентябре 2002 года дан старт новому, более развернутому пятилетнему проекту разработки приборов этого класса. Финансирует проект Министерство экономики, промышленности и торговли (METI) через две организации: FED (Ассоциация по исследованию и разработке новых электронных приборов) и AIST (Национальный институт по перспективным направлениям науки и промышленных технологий). Координирует разработки Исследовательский центр ассоциации FED. Академический сектор в проекте представлен университетом Рицумейкан (Киото), государственный – институтом AIST.

Основные участники проекта в части разработки приборов и материалов – компании NEC и Toyoda Gosei. По окончании проекта эти две компании намерены довести разработанную технологию до промышленного уровня. Другие компании – Furukawa Electric, Oki Electric, Mitsubishi Electric, Hitachi Cable, Matsushita Electric, Sumitomo Electric и ULVAC – проявляют интерес к фундаментальным исследованиям, связанным с разработкой приборов (рис.5).

В задачи компании NEC входит проектирование и разработка технологии изготовления приборов на диапазоны 2; 5 и 26 ГГц. Компания Toyoda Gosei отвечает за технологию материалов и пластин, в том числе за методы эпитаксиального MOCVD выращивания гетероструктур на пластинах диаметром 50 и 100 мм. Специалисты Университета Рицумейкан совместно с пятью фирмами проводят оценку характеристик материалов и приборов, а также изучают зависимость параметров готовых приборов от свойств исходных материалов. Институт AIST и три другие компании изучают характеристики материалов и разрабатывают новые технологические процессы изготовления приборов.



На 2004 год в качестве промежуточных результатов было запланировано создание транзисторов мощностью 200, 100 и 5 Вт на частотах 2; 5 и 26 ГГц, соответственно. К концу 2006 года планировалось достичь 200 Вт на 5 ГГц и 20 Вт на 26 ГГц.

В ходе выполнения проекта велись тщательные исследования свойств материала и транзисторов. Большие усилия направлены на изучение влияния дефектов материала подложек как на свойства гетероструктурных слоев, так и на параметры HFET. Важно иметь картину распределения электрического поля и температуры в приборе при реальных рабочих условиях. Такие исследования проводятся группами в Kusatsu и Tsukuba (см. рис.5)

Изучение влияния микропор SiC-подложек на характеристики транзисторов, изготовленных по прецизионной методике, показало, что у транзисторных структур, расположенных на расстоянии менее 40 мкм от полости поры, резко возрастают токи утечки и ухудшается отсечка. С помощью рамановской спектроскопии было также обнаружено, что вблизи микропор в GaN возрастает плотность свободных носителей. Одна из главных причин преждевременных пробоев в приборах – локализация сильного электрического поля между контактами затвора и стока. Поэтому методика наблюдения за электрическим полем прибора в рабочих условиях оказалась очень полезной для улучшения его параметров и надежности.

Для борьбы с коллапсом тока в AlGaIn/GaN HFET на поверхность AlGaIn наносят пассивирующую пленку SiN. Однако при этом снижается пробивное напряжение транзистора. Чтобы компенсировать этот эффект, в область затвора вводят так называемый модулирующий полевой электрод (field modulating plate), позволяющий получать высокие рабочие напряжения и одновременно улучшать коэффициент усиления транзистора.

В ходе выполнения проекта по состоянию на апрель 2006 года получены следующие результаты:

- разработаны HFET с углубленным затвором и модулирующим электродом. Мощность однокристального транзистора в непрерывном режиме на частоте 2 ГГц составила 230 Вт и 156 Вт в импульсном режиме на частоте 4 ГГц;
- реализован усилитель со сложением мощности параллельных транзисторов, имеющих ширину затвора 48 мм. Пиковая мощность насыщения усилителя на частоте 2,14 ГГц составляет 371 Вт при линейном усилении 11,2 дБ. Тем самым показана возможность его успешного применения в аппаратуре базовых станций систем сотовой связи формата W-CDMA;
- создан HFET с двойным модулирующим электродом. Его мощность на частоте 2,15 ГГц составляет 190 Вт при линейном усилении 17,5 дБ. Транзистор испытан в аппаратуре связи формата W-CDMA;

- разработан HFET с затвором T-образной формы длиной 0,25 мкм. Его непрерывная мощность на частоте 30 ГГц равна 5,8 Вт.

Масштабные исследования широкозонных полупроводников, в частности нитрида галлия, проводимые в последнее время передовыми странами, дают основание считать, что в ближайшие годы элементная база полупроводниковой СВЧ-электроники пополнится новыми более мощными и эффективными активными компонентами. Это станет основой для очередного значительного улучшения характеристик радиоэлектронных систем как военного, так и коммерческого назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Via G.D.** et al. A "snapshot" of AlGaIn/GaN HEMT state-of-the-technology. – GaAs Mantech Digest, 2004.
2. **Rosker M.** Wide bandgap semiconductor devices and MIMICs: A DARPA perspective. – GaAs Mantech Digest, 2005.
3. **Rosker M.** et al. Preliminary results from Phase II of the wide bandgap semiconductor for RF applications (WBGS-RF) program. – CS Mantech Conference Digest, 2006.
4. **Gauthier G.** et al. KORRIGAN-A comprehensive initiative for GaN HEMT technology in Europe. – 13<sup>th</sup> GaAs Symposium Digest, 2005, p.361.
5. **Nanishi Y.** et al. Development of AlGaIn/GaN high power and high frequency HFETs under NEDO's Japanese national project. – CS Mantech Conference Digest, 2006.