

# ТРАНЗИСТОР НА GaN

## ПОКА САМЫЙ "КРЕПКИЙ ОРЕШЕК"

Транзисторы на нитриде галлия, о создании которых впервые сообщили в начале 1993 года разработчики компании ARA Optics во главе с М.Ханом (M.Khan), существенно расширили возможности приборов СВЧ-диапазона. Эти приборы способны работать в значительно более широком диапазоне частот и при более высоких температурах, а также с большей выходной мощностью по сравнению с приборами на кремнии, арсениде галлия, карбиде кремния или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале. Применение GaN-транзисторов существенно улучшает параметры усилителей, модуляторов и других ключевых устройств современных радиоэлектронных систем. Широкополосные беспроводные сети, вездесущие электрические транспортные средства, совершенные контроллеры энергетических систем, малогабаритные надежные твердотельные радары – все эти системы, как и многие другие, могут быть реализованы и улучшены благодаря применению транзисторов на нитриде галлия. При столь перспективном рынке разработка и совершенствование GaN-технологии становятся приоритетными при постановке НИОКР в области полупроводниковой техники.

С момента появления первого транзистора на GaN [1] в полупроводниковой электронике произошли поистине революционные изменения [2, 3]. И одно из самых важных – возможность создания транзисторов на основе нитридов элементов третьей группы табли-

Таблица 1. Сравнение основных электрофизических параметров наиболее распространенных полупроводниковых материалов, используемых для создания СВЧ-приборов [5]

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Тип перехода	Относительная электропроводность	Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /В·с	Напряженность поля пробоя, МВ/см	Скорость электронов, 10 <sup>7</sup> см/с	Теплопроводность, Вт/см·К	JFM*	Рабочая температура, °С, макс.
Si	1,1	Непрямой	11,8	1350	0,3	1,0	1,5	1	>200
GaAs	1,4	Прямой	12,8	8500	0,4	2,0	0,5	7	>300
GaN	3,4	Прямой	10,4	900	3,3	2,7	1,3	760	<500
AlN	6,2	Прямой	9,5	300	11,7	2,0	2,5	5100	<500
4H-SiC	3,26	Непрямой	10,0	650	2,0	2,0	4,5	180	<500
6H-SiC	3,0	Непрямой	9,7	370	2,4	2,0	4,5	260	<500

\* JFM – фактор качества Джонсона.



В.Данилин<sup>1</sup>, Т.Жукова<sup>1</sup>, Ю.Кузнецов<sup>1</sup>,  
С.Тараканов<sup>2</sup>, Н.Уваров<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГУП "НПП Пульсар"  
<sup>2</sup>МО РФ

цы Менделеева (GaN, AlN, InN – III-нитридов) и их соединений, превосходящих по своим параметрам приборы на таких традиционных материалах, как кремний (Si), твердый раствор кремний-германий (SiGe), арсенид галлия (GaAs), фосфид индия (InP) и даже карбид кремния (SiC) (табл.1, рис.1) [4, 5].

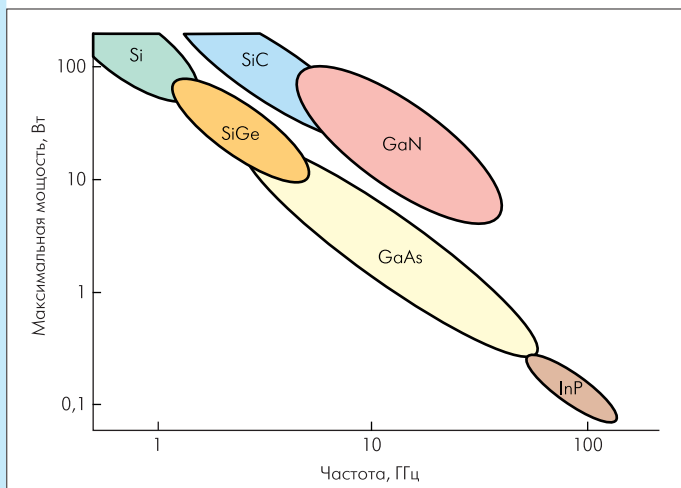


Рис. 1. Зависимость максимальной мощности от частоты для приборов на основе различных полупроводниковых материалов [4]

Сейчас одно из главных направлений СВЧ-полупроводниковой электроники, на котором сосредоточены основные силы разработчиков, – создание AlGaIn/GaN-гетеропереходных полевых транзисторов с затвором Шоттки (ГПТШ) с высокими эксплуатационными характеристиками. Некоторые ведущие компании в области твердотельной СВЧ-электроники уже вплотную подошли к началу серийного производства таких ГПТШ. Однако массовое микроэлектронное производство диктует свои требования к свойствам изделий – они должны быть воспроизводимы с высоким коэффициентом выхода годных (КВГ), характеризоваться долговременной и стабильной работой в заданных эксплуатационных условиях, а также обладать приемлемой себестоимостью. Эти параметры GaN-

приборов зависят от многих факторов: структуры и уровней легирования эпитаксиальных слоев, топологии (конструкции) транзистора, состава слоев металлизации и барьеров Шоттки, метода изоляции "мезаструктуры" (активной области прибора),



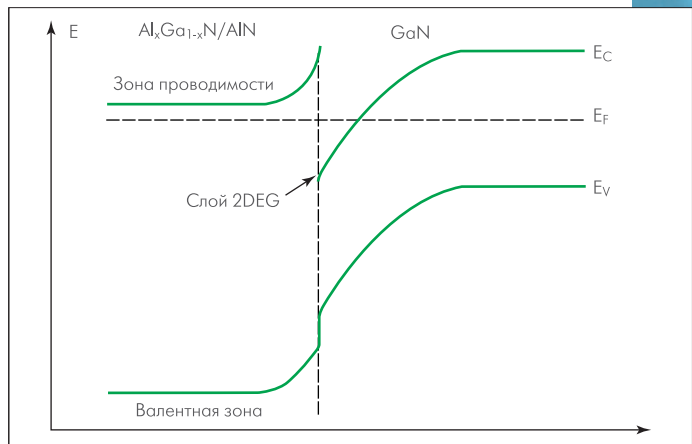
типа подложки и ее теплопроводности, параметров корпуса и т.д. Однако уже можно утверждать, что все преграды так или иначе будут преодолены, и перед ГПТШ на основе нитрида галлия открываются широкие производственные перспективы. Проанализируем основные факторы, предопределившие успех GaN-технологий, однако перед этим очень кратко остановимся на типовой структуре современных GaN ГПТШ.

### ТИПОВАЯ СТРУКТУРА GaN ГПТШ

Структуры современных GaN ГПТШ весьма разнообразны. Рассмотрим наиболее обобщенную структуру GaN ГПТШ (рис.2), помня однако, что реальные структуры могут существенно отличаться от нее по числу слоев, типу их материала, степени легирования и другим параметрам конструкции.

Основной “элемент” GaN ГПТШ, равно как и в остальных ГПТШ, в частности на основе GaAs, – это область двумерного электронного газа (2DEG). Она формируется в зоне гетероперехода между барьерным  $Al_xGa_{1-x}N$ -слоем и нелегированным канальным GaN-слоем. Ширина запрещенной зоны у  $Al_xGa_{1-x}N$  выше, чем у GaN, и в области гетероперехода граница зоны проводимости GaN оказывается фактически ниже уровня Ферми – образуется потенциальная (квантовая) яма (рис.3). Поскольку в монокристаллическом нелегированном GaN нет ни примесных центров рассеяния, ни связанных с ними дефектов, подвижность электронов проводимости в нем оказывается весьма высокой – на уровне до  $2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при комнатной температуре. Таким образом, в канальном GaN-слое непосредственно под гетеропереходом образуется чрезвычайно тонкий слой с высокой плотностью и подвижностью свободных электронов, поэтому его и называют двумерным электронным газом.

Инжекция носителей в потенциальную яму из области барьерного слоя обусловлена двумя факторами. Прежде всего, из-за различной ширины запрещенной зоны GaN и  $Al_xGa_{1-x}N$  в области их контакта образуется достаточно сильное электростатическое поле, инициирующее переход свободных электронов из  $Al_xGa_{1-x}N$  в потенциальную яму. Кроме того, в области контакта GaN и  $Al_xGa_{1-x}N$  (или AlN) из-за несовпадения их кристаллических решеток образуется механическая напряженность. А поскольку кристаллы AlN и GaN сильно поляризованы, возникает пьезоэффект, приводящий к дополнительной инжекции носителей в канал. В результате концентрация электронов проводимости в области 2DEG может превышать  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Отметим, что пьезоэффект столь велик, что его одного зачастую достаточно для обеспечения должной концентрации носителей в канале. Так, если в ГПТШ на основе GaAs барьерный слой обязательно легируют кремнием (т.е. получают  $n-Al_xGa_{1-x}As$ -слой), чтобы обеспечить источник свободных электронов, то в случае нитрида галлия возможно использовать и нелегированный барьерный



**Рис.3. Формирование потенциальной ямы в области гетероперехода  $Al_xGa_{1-x}N / GaN$**

слой  $Al_xGa_{1-x}N$ . Однако в большинстве GaN-структур барьерный слой легирован.

Сочетание высоких подвижности и концентрации носителей в канале вкупе с широкой запрещенной зоной (3,4 эВ при комнатной температуре) и обуславливают уникальное сочетание частотных и мощностных свойств GaN ГПТШ.

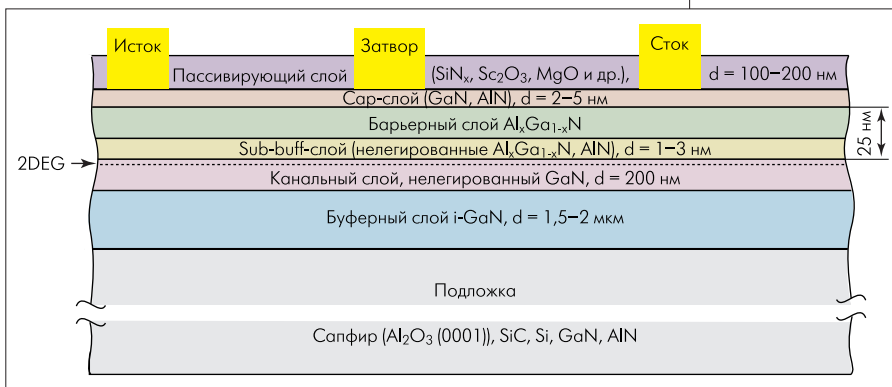
Между барьерным и канальным слоем формируют так называемый sub-buff-слой высокоомного нелегированного AlN или  $Al_xGa_{1-x}N$ , в последнем случае его зачастую именуют спейсером (spacer). Основное назначение этого тонкого (1–3 нм) слоя – предотвратить рассеяние носителей в канале на границе с гетеропереходом.

Верхняя часть барьерного слоя образует с металлом затвора барьер Шоттки, который, как и в обычном полевом транзисторе с барьером Шоттки, управляет проводимостью канала. Структура барьерного слоя может быть неоднородной. В частности, зачастую в ней формируют область с повышенной концентрацией Si (так называемое  $\delta$ -легирование), формируют верхний  $n^+-Al_xGa_{1-x}N$ -слой (для улучшения омического контакта стока и истока и увеличения концентрации носителей в канале) и т.п. Различных вариантов действующих структур уже достаточно много. Для минимизации влияния поверхностных состояний на ГПТШ поверх барьерного слоя формируют так называемый cap-слой (легированный либо нелегированный GaN, AlN, AlGaIn), а также пассивирующий слой, например  $Si_3N_4$  (последний характерен для любых полевых транзисторов).

Канальный слой выращивают на толстом буферном слое – высокоомном GaN-слое, нелегированном или компенсированном (например, железом) так, что концентрация свободных носителей в нем становится ниже  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , т.е. как в собственном полупроводнике. Основное назначение буферного слоя – электрическая

изоляция активных структур на кристалле друг от друга. Кроме того, он должен предотвращать влияние подложки на канал. С технологической точки зрения, буферный слой обеспечивает при эпитаксии плавный переход от подложки к совершенной структуре канала. Зачастую структура буферного слоя оказывается достаточно сложной – в ней формируют несколько различных слоев с обратными переходами, сверхрешетками и т.п.

Основное требование к подложке – это низкая электропроводность и высокая теплопроводность при приемлемых механических и структурных свойствах. Наиболее распростра-



**Рис.2. Типовая структура GaN ГПТШ**

ненные материалы подложек – сапфир, карбид кремния, кристаллический кремний с ориентацией решетки (111), а также GaN и AlN. Однако наиболее теплопроводящие материалы – SiC, GaN и AlN – достаточно дороги, что может стать одним из барьеров (безусловно, преодолимых) на пути массового производства GaN ГПТШ.

**ФАКТОРЫ УСПЕХА GaN-ТЕХНОЛОГИИ**

**Рекордная удельная плотность выходной мощности** – одно из самых выдающихся достижений в области создания СВЧ-приборов нового поколения на GaN (удельная плотность считается на единицу ширины затвора ГПТШ). Сегодня одним из лидеров этого направления – компанией Cree уже создан GaN ГПТШ с затвором длиной  $L_3 = 0,55$  мкм и шириной  $W_3 = 0,246$  мм, выходная мощность  $P_{\text{Вых}}$  которого в непрерывном режиме на частоте 4 ГГц составляет 39 дБм (свыше 7,9 Вт) при коэффициенте усиления по мощности  $K_p = 14$  дБ и КПД добавленной мощности  $\eta_{\text{add}} = 54,8\%$ . Соответственно, удельная выходная мощность прибора  $P_{\text{уд.вых}} = 32,2$  Вт/мм [6]. На частоте 8 ГГц  $P_{\text{уд.вых}} = 30,6$  Вт/мм при  $K_p = 10,7$  дБ и  $\eta_{\text{add}} = 49,6\%$ , что почти в три раза превышает предыдущие рекордные характеристики для ГПТШ. Такие высокие параметры были достигнуты благодаря ряду новых конструктивных решений, позволивших увеличить рабочее напряжение сток-исток до 120 В и максимальную плотность тока в канале  $j_{\text{си}}$  до 1,2 А/мм.

Приборы изготавливались с дополнительным тонким (1–3 нм) sub-buff AlN-слоем, располагаемым на границе с GaN-каналом. Высокоомный буферный слой GaN был легирован железом. Формирование sub-buff-слоя улучшает основные параметры двумерного электронного газа (2DEG) – плотность носителей  $n_s$  и их подвижность  $m_e$ , препятствуя переходу свободных электронов из 2DEG-слоя на поверхностные состояния и объемные дефекты в барьер-

ном слое AlGaIn. В результате в 2DEG-слое произведение подвижности носителей на их плотность достигло  $2,35 \cdot 10^{16}(\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ , что привело к снижению сопротивления канала в открытом состоянии до 2,1–2,3 Ом·мм и подавлению токовой неустойчивости. Как следствие, существенно возросла удельная плотность тока в импульсном режиме (рис.4) [7–11].

К резкому росту отдаваемой мощности приводит и увеличение рабочего напряжения сток-исток, поскольку в режиме усиления класса А выходная мощность пропорциональна квадрату рабочего напряжения  $P_{\text{Вых}} \propto V_{\text{си}}^2$ . Очевидно, что максимальное рабочее напряжение пропорционально напряжению пробоя  $V_{\text{пр.си}}$ . Вот почему  $V_{\text{пр.си}}$  так важно и необходимо увеличивать. Рекордные значения параметров GaN-транзисторов фирм Cree, NEC, Fujitsu получены именно благодаря увеличению рабочего напряжения  $V_{\text{си}}$  до 25–65 В против 7–12 В для GaAs-приборов. Так, разработчиками компании Fujitsu создан транзистор с рабочим напряжением 63 В и выходной мощностью 174 Вт при КПД более 54% (табл.2) [12]. Однако при увеличении напряжения сток-исток возникает ряд сложностей.

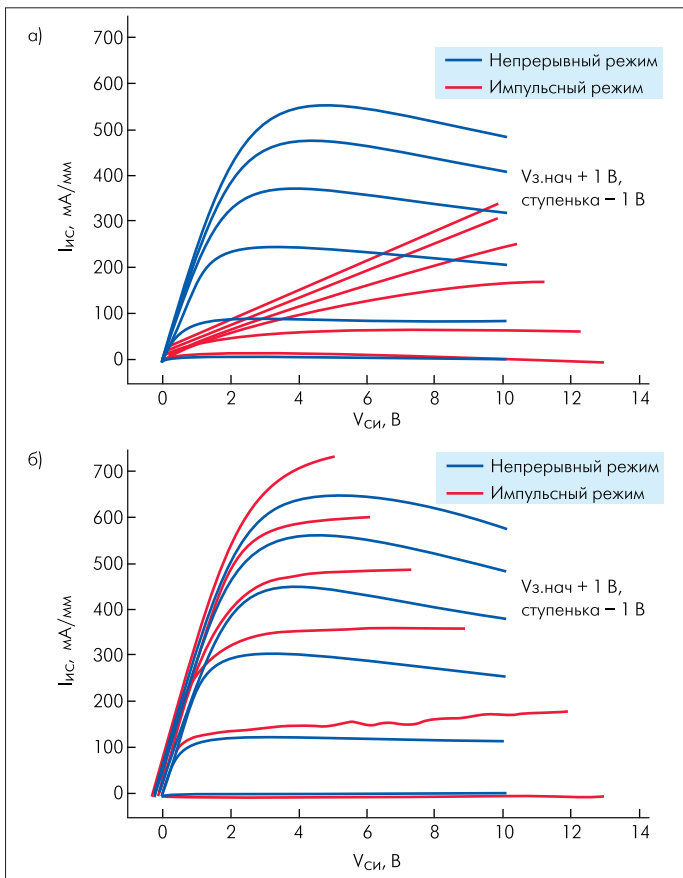
**Таблица 2. Рекордные значения выходной мощности GaN-транзисторов (по состоянию на 2003–2004 год)**

f, ГГц	2	10	30	35	60
Мощность, Вт	170	14	3,6	3,5	0,09
Ширина затвора, мм	25–30	1–1,5	1,05	1,05	0,18
Материал подложки	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Фирма	NEC, Fujitsu	NEC	Cree Lighting	Cree Lighting	Fraunhofer Inst.

Одна из существенных проблем GaN-технологии, препятствующая достижению высоких характеристик, – неустойчивость тока стока при увеличении напряжения стока, отмеченная уже у первых GaN-транзисторов как ПТШ-, так и ГПТШ-типов. Прежде всего разработчики столкнулись с резким падением тока стока при достижении определенных значений  $V_{\text{си}}$ . Явление назвали коллапсом. Кроме того, обнаружилось ухудшение параметров приборов на высокой частоте, даже если они имели великолепные статические характеристики. Эффект получил название “дисперсия крутизны”. Проявился и еще один тип неустойчивости GaN-транзисторов – несоответствие в импульсном режиме выходного сигнала стока входному сигналу на затворе при изменении его значения, так называемый эффект “задержки затворного сигнала” (gate or drain lag).

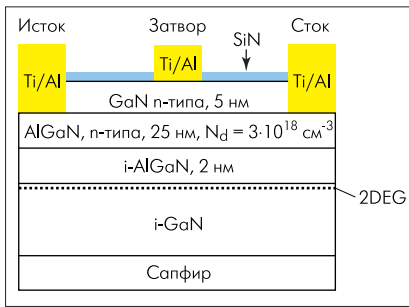
Исследования показали, что все эти эффекты неустойчивости, как и в транзисторах на GaAs, связаны с дефектами материала (ловушечными центрами захвата) как на поверхности в области затвор-сток и затвор-исток, так и в объеме буферного GaN-слоя [13]. Самый простой и эффективный способ борьбы с ловушечными центрами на поверхности – пассивация поверхности готовых транзисторных структур тонкой диэлектрической пленкой  $\text{SiN}_x$  с определенным зарядом, связывающим поверхностные ловушечные состояния (уровень энергии ловушек  $E_1 = 1,8$  эВ). Пассивация пленкой  $\text{SiN}_x$  позволяет на 70–80% решать проблему коллапса. Остальные 20–30% неустойчивостей обусловлены влиянием ловушечных центров в объеме буферного GaN-слоя. Одна из основных причин образования ловушек как на поверхности, так и в объеме – присутствие в структуре углерода ( $E_2 = 2,85$  эВ). В результате пассивации возрастает ток стока, улучшаются высокочастотные свойства. Однако крутизна пассивированных транзисторов снижается.

Для устранения коллапса, ограничивающего рабочее напряжение ГПТШ, можно пассивировать поверхность пластины такими диэлектриками, как  $\text{MgO}$ ,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [11, 14, 15]. Аналогичной цели служит и формирование поверхностных сар-слоев. Так, в упомянутом примере с транзистором компании Fujitsu рекордных ха-



**Рис.4. Выходные характеристики ГПТШ: а) без sub-buff AlN; б) с sub-buff AlN [11]**



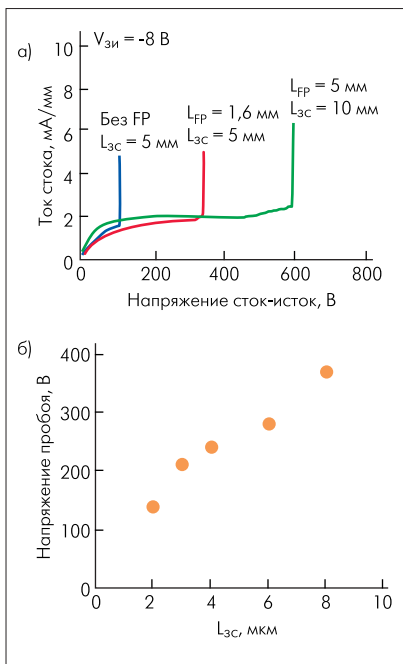


**Рис.5. Структура рекордного GaN ГПТШ компании Fujitsu. Показано углубление под металлизацией омических контактов стока и истока для увеличения пробивного напряжения сток-исток [16]**

характеристик удалось добиться, в том числе, за счет формирования сарслоя GaN, легированного кремнием, и его удаления под металлизацией омических контактов стока и истока [16] (рис.5). Очевидно, по мере совершенствования качества исходного материала GaN-транзисторов подавление коллапса станет еще эффективнее. В целом же борьбу с коллапсом необходимо вести на всех уровнях структуры, от подложки и до поверхностных слоев, одновременно совершенствуя технологию транзисторов (процессов обработки поверхности, пассивации, введения различных оптимизированных сар-слоев, формирования углублений под контакты и затвор и др.).

Чтобы еще больше повысить рабочее напряжение GaN-транзисторов, над пассивирующим слоем SiN<sub>x</sub> в пространстве затвор-сток размещают металлический электрод, соединенный с затвором. С помощью этого метода, названного методом формирования "полевого электрода" (Field-Plate – FP), удалось почти вдвое увеличить рабочее напряжение прибора и устранить коллапс (рис.6). Технология Field-Plate, наряду с пассивацией поверхности кристалла диэлектрической пленкой, уже используется компаниями Cree, NEC и другими при разработке ГПТШ с выходной мощностью более 50–100 Вт в диапазоне 2 ГГц [17, 19].

В полевых транзисторах пробивное напряжение затвор-сток, как правило, ниже теоретически возможного. На краю затвора со стороны стока и на краю сток-источного контакта, обращенного к затвору, напряженность поля значительно выше, чем в пространстве сток-исток.

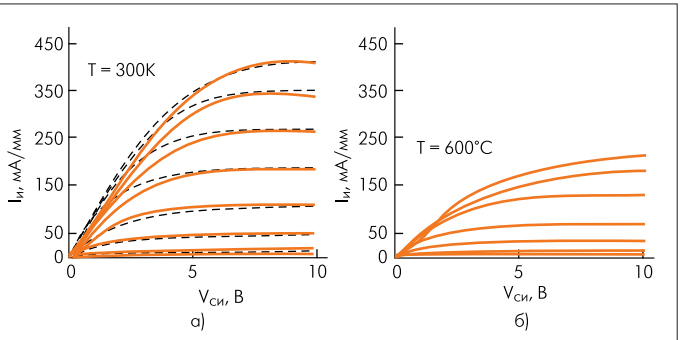


**Рис.6. Результаты применения метода FP для увеличения пробивного напряжения затвор-сток: а) вольт-амперные характеристики AlGaIn/GaN ГПТШ и ГПТШ с полевым электродом [17]; б) зависимость пробивного напряжения транзистора от расстояния затвор-сток [18]**

В таких областях наступает преждевременный пробой. Снизить напряженность поля в краевых областях и тем самым увеличить значение пробивного напряжения (соответственно, и рабочее напряжение сток-исток) ГПТШ можно различными способами. Один из них – углубление областей стока и истока, что уменьшает напряженность поля у края сток-источного контакта. Именно так специалисты компании Fujitsu добились увеличения пробивного (следовательно, и рабочего) напряжения сток-исток (см. рис.5) [16].

Снизить напряженность поля под затвором со стороны стока можно и путем формирования затвора Г-образной формы с расширением в сторону стока (рис.7). Поскольку такое расширение приводит к увеличению емкости затвора и, следовательно, к ухудшению высокочастотных свойств прибора, ширину металлического электрода стремятся оптимизировать. Как правило, для мощных транзисторов она составляет менее половины расстояния между затвором и стоком.

**Высокая рабочая температура** – следующий фактор успеха GaN-технологии. Транзисторы на GaN, ширина запрещенной зоны которого равна 3,397 эВ, должны сохранять работоспособность при температурах до 500–600°C (рис.8) [20]. Максимальная температура стабильной работы GaN-транзисторов компаний Cree, Fujitsu, NEC, изготовленных на 4H-SiC- и 6H-SiC-подложках, превышает 200°C даже при значениях рабочего напряжения U<sub>си</sub> = 65 В [21]. По мере совершенствования качества эпитаксиальных структур и технологии производства рабочая температура GaN-транзисторов, по-видимому, будет увеличена до 350–400°C [21, 22].



**Рис.8. Температурные зависимости характеристик AlGaIn/GaN ГПТШ: а) ВАХ при комнатной температуре; б) ВАХ при 600°C [20]**

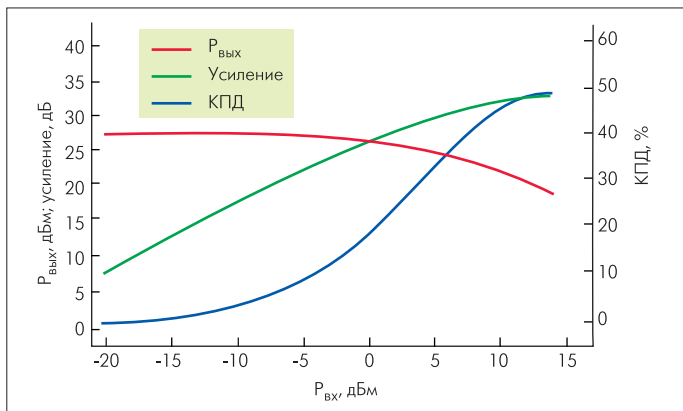
Фирма Nitronex, приложившая огромные усилия по коммерциализации AlGaIn/GaN ГПТШ на более дешевых, но менее теплопроводных кремниевых подложках (по сравнению с SiC), провела серию испытаний этих приборов на надежность при рабочей температуре 200°C (что уже превышает рабочую температуру кремниевых и арсенидгаллиевых транзисторов) [23]. Испытания 45 приборов компании (ширина затвора W<sub>з</sub> = 16 мм, V<sub>си раб.</sub> = 28 В) в течение 1500 ч при T = 200°C показали, что они могут работать с обычным воздушным охлаждением, а также подтвердили возможность устанавливать усилители мощности на них в непосредственной близости к антенне передатчика, исключая тем самым потери в длинном соединительном кабеле.

**Удешевление GaN-приборов за счет применения высокоомных подложек Si (111).** AlGaIn/GaN ГПТШ традиционно выращивались на сапфировых подложках с низкой теплопроводностью (λ = 0,35 Вт/см·К) или подложках SiC с высокой теплопроводностью (λ = 4,5 Вт/см·К). Несмотря на выдающиеся показатели, коммерциализации таких приборов препятствует высокая стоимость подложек, ограничение диаметра пластин (что также увеличивает себестоимость транзисторов) и недостаточно высокая теплопроводность сапфира. О массовом использовании подложек на основе монокристаллических GaN и AlN сегодня говорить преждевременно. Компромиссом между стоимостью и теплопроводностью могут служить подложки на основе кремния с кристаллографической ориен-



тацией решетки (111). Они доступны, дешевы, характеризуются достаточно высокой теплопроводностью ( $\lambda = 1,2$  Вт/см·К), не ограничены по диаметру пластин и легко поддаются утоньшению, что упрощает формирование в них сквозных отверстий. Кроме того, они перспективны для изготовления комбинированных схем, сочетающих Si- и GaN-элементы.

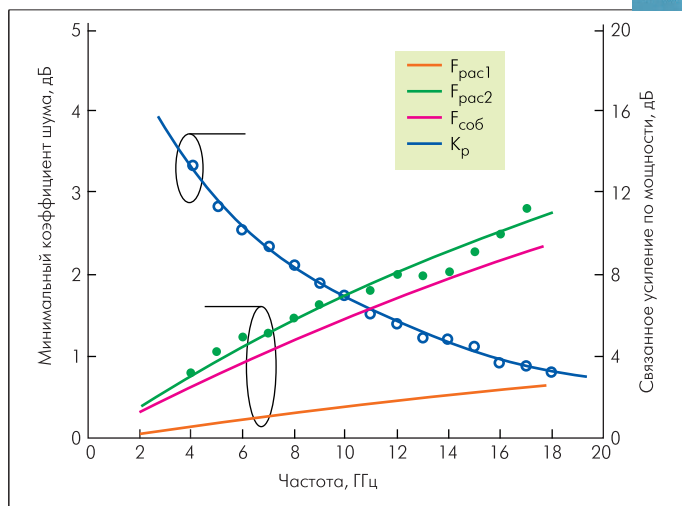
Главная трудность при использовании кремниевых подложек – получение в ходе эпитаксии качественного переходного слоя GaN-Si (111). Она обусловлена сильным различием коэффициента теплового расширения и параметров решетки этих двух материалов. Тем не менее, фирмами Японии, Китая, США, Германии и Франции активно и успешно исследуются возможности применения кремниевой подложки. Так, компания Nitronex (США) запатентовала технологию SIGANTIC, позволяющую выращивать на пластине Si (111) высококачественные эпитаксиальные структуры AlGaIn/GaN. Совместно с фирмой Rockwell Collins ею создан AlGaIn/GaN-транзистор на Si (111)-подложке с  $P_{\text{вых}}$  более 120 Вт на частоте 2 ГГц при  $K_p = 11,2$  дБ и КПД более 39% [24]. На кремниевой подложке фирмой Daimler Chrysler создан AlGaIn/GaN ГПТШ с удельной мощностью 6,6 Вт/мм (1,65 Вт в непрерывном режиме на частоте 2 ГГц) (рис.9) [25], а в Исследовательской лаборатории ВМС США – транзистор с удельной мощностью 12 Вт/мм. Появилось сообщение о получении удельной мощности 7,0 Вт/мм на частоте 10 ГГц [26], что стало рекордом 2004 года для GaN-приборов на кремниевой подложке.



**Рис.9. Выходные характеристики AlGaIn/GaN-транзистора компании Daimler Chrysler размером 2x125 мкм с рабочей частотой 2 ГГц [25]**

**Достижения в разработке малошумящих транзисторов в диапазоне частот 1–25 ГГц** – четвертая причина успеха GaN-технологии. По фактору шума  $K_{ш}$  транзисторы на GaN уже сейчас практически не уступают традиционным приборам на арсениде галлия. Минимальный фактор шума GaN-транзистора с затвором длиной 0,12 мкм составляет 0,53 дБ на частоте 8 ГГц. Для прибора с затвором длиной 0,25 мкм получен  $K_{ш} = 1,02$  дБ на 12 ГГц (рис.10) [27, 28]. К тому же, благодаря высокому пробивному напряжению GaN-транзисторов, в реальных схемах можно обойтись без входных устройств на *p-i-n*-диодах, защищающих от воздействия СВЧ-мощности, но приводящих к увеличению коэффициента шума всего прибора на 1–2 дБ. Таким образом, малошумящие GaN-транзисторы превосходят GaAs-приборы в реальных устройствах и могут успешно конкурировать с ними.

**Создание гибридных и монокристаллических микросхем на GaN-транзисторах** можно считать пятым фактором успеха новой технологии. Один из выдающихся результатов в этом направлении – изготовление монокристаллической микросхемы двухкаскадного усилителя мощности с  $P_{\text{вых.имп}} = 24,2$  Вт,  $K_p = 12,8$  дБ и КПД = 22,2% на частоте 16 ГГц [29].



**Рис.10. Частотная зависимость шумовых характеристик Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>N/GaN ГПТШ с шириной затвора 0,25 мкм [27]**

**Высокие показатели GaN-транзисторов на низких частотах (вплоть до промышленных)** – еще одно достоинство рассматриваемой технологии. Приборы на нитриде галлия, благодаря своим уникальным электрофизическим параметрам, обладают самым низким по сравнению с традиционными транзисторами сопротивлением во включенном состоянии [19]. Это позволит GaN-транзисторам заменить Si- и даже SiC-транзисторы в силовых системах, где требуются приборы со значениями рабочего тока более 29 А и напряжения 600–1000 В и выше. Применение GaN-транзисторов позволит снизить потребление энергии в системах запуска электродвигателей, защиты электросетей от перегрузок и неожиданных отключений, а также обеспечить бесперебойную работу компьютеров (сегодня убытки, связанные с внезапным отключением компьютеров, могут достигать нескольких миллионов долларов). Созданием мощных GaN-транзисторов для систем силовой электроники заняты компании Toshiba, Mitsubishi, Furukawa и другие.

**Разработка метода химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений, усиленного миграцией (MeMOCVD)** [30], – седьмой фактор успеха. Все перечисленные характеристики GaN-приборов были достигнуты главным образом благодаря большому объему работ по исследованию и совершенствованию эпитаксиальных структур на подложках из сапфира, SiC, Si (111), выращиваемых методами осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD), молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE) и хлоридно-гидридной эпитаксии (HVPE). Однако несмотря на впечатляющие результаты, достигнутые к настоящему времени, технология формирования исходных эпитаксиальных структур AlGaIn/GaN на подложках сапфира, SiC и Si (111) методами гетероэпитаксии еще далека от совершенства. Структуры, выращенные методами MOCVD, MBE и HVPE, имеют большую плотность дефектов ( $10^8$ – $10^{10}$  см<sup>-2</sup>). Правда, дефекты в III-нитридах в силу своей природы значительно слабее влияют на параметры, чем дефекты в полупроводниковых соединениях типа A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> (GaAs, InP, GaP), традиционно используемых для изготовления СВЧ-приборов. Но присутствие дефектов сказывается на долговременной работе, особенно в условиях высоких напряжений и повышенных температур.

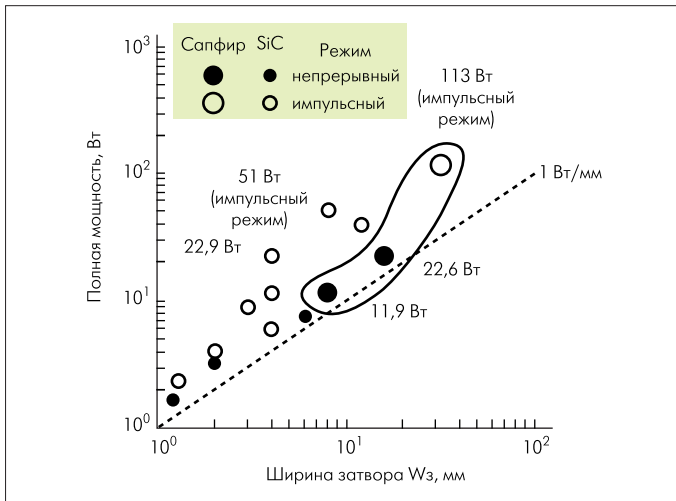
Новый метод Me-MOCVD позволил значительно улучшить кристаллическое совершенство эпитаксиальных структур и снизить плотность винтовых дислокаций до  $3 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup>. С его помощью на подложках диаметром 50, 75 и 100 мм выращены ГПТШ-структуры

с существенно улучшенными параметрами. В частности, удалось уменьшить эффект коллапса и увеличить пробивное напряжение затвор-сток. Используя метод Me-MOCVD и сформировав тонкий барьерный sub-buff-слой AlN, специалисты компании Cree получили эпитаксиальные структуры с подвижностью носителей в 2DEG-слое свыше 2000 см<sup>2</sup>/В·с. Выходная мощность транзисторов с шириной затвора 1 мм, изготовленных на таких структурах, достигла 3,6 Вт на 30 ГГц и 3,4 Вт на 35 ГГц [31].

Совершенствование технологии GaN-транзисторов и улучшение качества исходных эпитаксиальных структур позволили достигнуть в последние годы новых рекордов по максимальной крутизне прибора (до 500 мСм/мм) [32], по граничной  $F_t$  и максимальной  $F_{max}$  частотам до 103 ГГц и 170 ГГц, соответственно [33], а также по удельной плотности тока канала до 2,1 А/мм [34].

Однако высокая плотность дефектов не позволяет производить надежные изделия с большой площадью поверхности кристалла. Поэтому достигнутые рекордные значения удельной отдаваемой мощности 10–30 Вт/мм следует рассматривать скорее как демонстрацию принципиальных возможностей материала. Существенно, что эти показатели получены на приборах с малой шириной затвора – 0,15–1,5 мкм. При этом измерения мощности проводились при  $V_{си} \gg V_{пр.си} / 2$ , что для долговременной и стабильной работы приборов, как правило, не приемлемо.

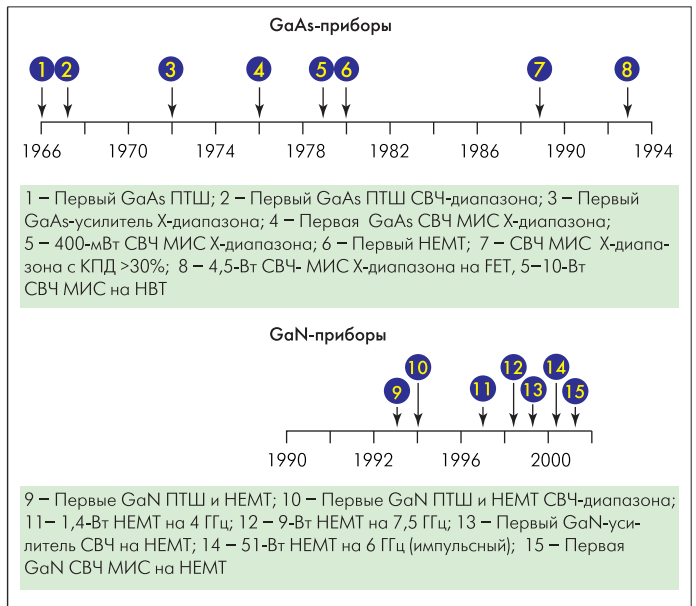
На практике с увеличением ширины затвора как GaN-, так и GaAs-приборов выходная мощность возрастает по нелинейному закону. И если удельная мощность GaN-транзисторов с малой шириной затвора превышает 10 Вт/мм (против 1–1,5 Вт/мм для GaAs-приборов с аналогичной шириной затвора), то с увеличением ширины затвора до 20–40 мкм она падает до 1–3 Вт/мм (рис.11). Но это в пять-десять раз выше, чем у GaAs-приборов (0,2–0,3 Вт/мм) с аналогичной шириной затвора.



**Рис. 11. Зависимость полной выходной мощности от ширины затвора GaN-транзистора с большой шириной затвора [35]**

**ПЕРСПЕКТИВЫ GaN-ТЕХНОЛОГИИ**

Смогут ли приборы на нитриде галлия достигнуть уровня серийного производства и найти применение в высокотемпературной электронике, частично заменив устройства на арсениде галлия и мощные вакуумные приборы? Ответ на этот вопрос уже сегодня может быть оптимистичным, и тому есть несколько причин. Во-первых, аналогичные проблемы уже успешно были преодолены при разработке приборов на арсениде галлия. Кроме того, созданные экспериментальные образцы транзисторов на GaN по удельной мощности в диапазоне частот 1–60 ГГц уже в 10–15 раз превосходят при-

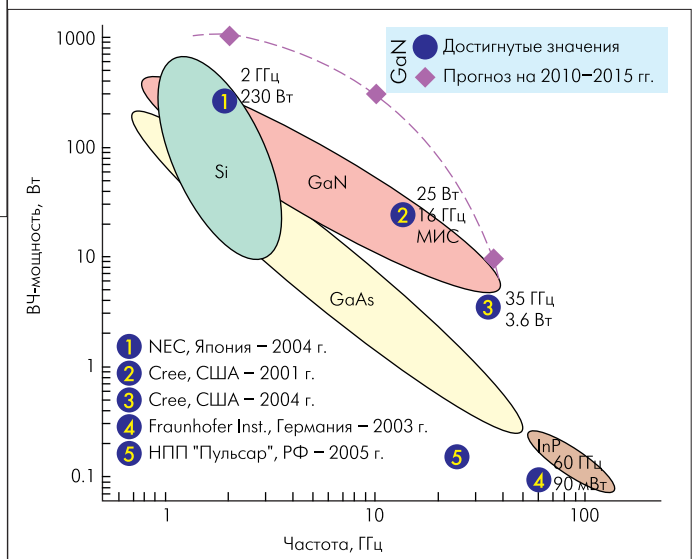


**Рис. 12. Хронология разработок GaAs- и GaN-транзисторов и микросхем [21]**

боры на кремнии и арсениде галлия. Разработаны и маломощные нитрид-галлиевые транзисторы, минимальное значение коэффициента шума которых сравнимо с лучшими показателями GaAs-транзисторов на псевдоморфных структурах (pHEMT). А по темпам развития и совершенствования технологии [36] приборы на III-нитридах в три раза превосходят арсенидгаллиевые приборы (рис. 12).

Так, если в 1996 году рекордные значения удельной плотности мощности составляли  $P_{уд.вых} = 1,1$  Вт/мм, в 1999 году – уже 6,9; а в 2003 году – 30 Вт/мм. Проведенный сотрудниками ФГУП НПП “Пульсар” анализ позволяет прогнозировать, что к 2010–2015 годам показатели GaN-приборов вплотную приблизятся к теоретически достижимым и составят  $P_{уд.вых} = 35–40$  Вт/мм (рис. 13). Все это позволяет надеяться, что имеющиеся технологические трудности удастся преодолеть за достаточно короткий срок, и в ближайшее время будет освоено производство различных типов коммерческих GaN-приборов нового поколения (рис. 13).

Таким образом, несмотря на имеющиеся проблемы формирования высококачественных исходных эпитаксиальных структур



**Рис. 13. Прогноз развития СВЧ-транзисторов на основных освоенных в производстве полупроводниковых материалах**



и технологии изготовления самих транзисторов, разработчикам удалось за 10 лет вплотную подойти к началу коммерческого производства GaN-транзисторов [23]. Уже сегодня экспериментальные образцы GaN СВЧ-приборов (как в виде гибридных, так и монокристаллических микросхем) используются в маломощных и мощных усилителях, фазовращателях, генераторах и т.п. По мнению специалистов компании Raytheon, радиолокационные и связанные системы на GaN-приборах нового поколения появятся уже в 2005–2007 годах [37].

Работы в области GaN-технологий СВЧ-приборов ведутся и в России. В частности, на ФГУП НПП "Пульсар" получены действующие образцы GaN ППТШ на эпитаксиальных структурах ЗАО "Элма-Малахит", продемонстрировавшие на частоте 35 ГГц максимальную выходную мощность 1,4 Вт/мм и КПД 33% при ширине затвора 60 мкм [38]. При соответствующей поддержке данное направление для отечественной электроники может оказаться даже перспективнее развития GaAs-технологий и скорее даст практический результат (например, в плане создания СВЧ-модулей для АФАР), поскольку при одинаковой выходной мощности приборы на основе GaN будут гораздо меньше. Последнее особенно важ-

но для России, где в ближайшие годы не приходится ожидать резкого роста потребности в мощных СВЧ-приборах до уровня современного серийного производства. А без этого трудно надеяться на достижение высоких КВГ. Минимизируя же площадь прибора, при тех же технологических показателях можно добиться существенно увеличения КВГ (равно как и надежности), поскольку резко сократится площадь кристалла, а вместе с ней – и вероятность дефектов. Соответственно снизится и себестоимость изделий, особенно – при использовании кремниевых подложек.

Таким образом, можно заключить, что уже завтра приборы на основе GaN станут столь же привычными, как сегодня Si- и GaAs-транзисторы, и прочно войдут в арсенал разработчиков радиоэлектронной аппаратуры.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Khan M.A., Kuznia J.N., Bhattaral A.R., Olsen D.T. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. – Appl.Phys.Lett., 1993, v.62 (15), p.1786–1787.
2. Данилин В.Н., Докучаев Ю.П., Жукова Т.А., Комаров М.А. Мощные высокотемпературные и радиационностойкие СВЧ-

**НАДЕЖНОСТЬ GaN-ПРИБОРОВ – ОСНОВНОЙ ПАРАМЕТР, ЗА КОТОРЫЙ DARPA ГОТОВО ПЛАТИТЬ ТРОЙНУЮ ЦЕНУ**

Управление перспективных разработок МО США (DARPA) приняло трехцелевую программу, которая должна ускорить создание микроэлектронных устройств на базе GaN-приборов. Согласно обнародованному Управлением плану, первый путь программы (track 1) предусматривает разработку модуля приемника/передатчика X-диапазона (8–12 ГГц); второй путь (track 2) – создание модуля усилителя мощности Q-диапазона (свыше 40 ГГц). Третий путь (track 3) – это изготовление широкополосных усилителей мощности X- и Q-диапазонов с шириной полосы пропускания не менее декады (т.е. от 2 до 20 ГГц).

В рамках работ по первому пути, основным подрядчиком которых является компания Raytheon (в рабочую группу войдут и специалисты фирмы Cree), за первые полтора года планируется изготовить транзисторы с шириной затвора 1,25 мм с выходной мощностью в непрерывном режиме 39 дБм на частоте 8–12 ГГц при рабочем напряжении 40 В, коэффициенте усиления 12 дБ, КПД 60%. Выход годных приборов с пластины должен составить 50%. Гарантированный срок службы прибора – 10<sup>5</sup> ч. В конечном итоге через два с половиной года с начала работ предполагается освоить производство с указанным выходом годных монокристаллической СВЧ-микросхемы (MMIC) усилителя мощности на частоту 8–12 ГГц с выходной мощностью в непрерывном режиме 15 Вт, усилением 16 дБ, PAE 55% и рабочим напряжением 48 В. Первоначальная сумма, ассигнуемая на эти работы, составляет 26,9 млн. долл., но если задачи будут успешно выполняться, финансирование может быть увеличено до 59,4 млн. долларов. По мнению участников этой части проекта, привлечение к работам компании Cree позволит добиться успеха раньше намеченных сроков.

Для компании Northrop Grumman Space Technologies (NGST) – основного подрядчика по работам второго пути – главная задача состоит в освоении крупномасштабного производства созданных в рамках проводимых НИОКР устройств. По программе DARPA, за время ее проведения предполагается поставить, по крайней мере, 384 75-мм пластины. В ходе 18-месячного этапа работ должно быть отлажено производство транзистора с шириной затвора 0,5 мм Q-диапазона с рабочим напряжением 25 Вт, выходной мощностью 39 дБм, усилением 8 дБ и КПД 35%. Выход годных

приборов с пластины 50%, гарантированный срок службы 10<sup>5</sup> ч. Второй, 30-месячный, этап завершится созданием MMIC Q-диапазона, работающей при напряжении 28 В, с выходной мощностью 4 Вт, усилением 7,5 дБ, КПД 37% и выходом годных с пластины 50%. В работах примут участие компании Monolithics, Emcore, Boeing, Sirenza Microdevices. Первоначальные ассигнования составят 16,5 млн. долл., которые при успешном проведении работ могут вырасти до 53,4 млн. долл.

Главные подрядчики работ по третьему направлению, которые начались в середине февраля 2005 года, – компании TriQuint и BAE Systems. В этих работах также примут участие специалисты фирм Lockheed-Martin, Il-VI, Nitronix, Emcore. На первом этапе должны быть получены такие же результаты, что и по первому направлению. На втором – создана MMIC усилителя мощности на диапазон частот 2–20 ГГц с рабочим напряжением 48 В, выходной мощностью 15 Вт, усилением 16 дБ, КПД 30%. При этом подрядчики должны предоставить заказчику не менее 12 пластин диаметром 75 мм. Первоначальная сумма ассигнований – 15,8 млн. долл., которая может быть увеличена до 31,7 млн. долларов.

Основная задача, которую должна решить программа DARPA, – повышение надежности GaN-устройств. Поэтому особое внимание будет уделено изучению влияния различных типов подложек на характеристики приборов. Предполагается рассмотреть методы применения подложек нитрида галлия (компания BAE Systems), а также подложек кремния, позволяющих получить приборы с большим сроком службы. К работам по программе планируется привлечь крупнейших специалистов в области физического моделирования полупроводниковых приборов – ученых Политехнического института Ренсселара, а также ученых Массачусетского технологического института, активно занимающихся анализом физики отказов.

Программу разработки GaN-приборов невольно сравнивают с программой создания GaAs MIMIC начала 90-х годов. Но представители полупроводниковой промышленности США отмечают, что уровень финансирования этих двух программ различен, и не в пользу GaN.

*Compound Semiconductor, May 2005.*



приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходных структурах AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. – Обзоры по электронной технике. Сер.1. СВЧ-техника, 2001, вып.1.

3. **Ковалев А.Н.** Полевые транзисторы на AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> структурах. – АТИ "ЮНИСАФ"б Москва, 2001.

4. **Gaska R., Yang J.W., Jsinjy A.** et al. Electron transport in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures grown on 6Y-SiC substrates. – Appl.Phys.Lett., 1998, 72(6), p.707–709.

5. **Dimitrov R.** Herstellty und charakterisierung won AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> transistoren dissertation. – Tu Munshen, 2000, ISEN 3-932749-28-6.

6. **Y.-F. Wu, Saxler A, Moore M.** et al. – IEEE Electron Devices Lett., March 2004, v.25, p.117–119.

7. **Shen L, Heikman S., Moran B.** et al. AlGa<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high-power microwave heterostructure FETs. – IEEE Electron Devices Lett., 2001, v.22 (10), p.457–459.

8. Compound Semiconductor, 2002, v.8, N9, p.38.

9. **Wong M.M., Chowdhury U., Sicault D.** et al. – Electron. Lett., 2002, v.38, p.428.

10. **Balmer R.S., Hilton K.J., Nash M.J.** et al. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> microwave HFETs including a thin Al<sub>N</sub> carrier exclusion layer. – Phys. Stat. Sol. (c)0, 2003, N7, p.2331–2334.

11. **Lee J.S., Kim J.W., Lee J.H.** et al. Reduction of current collapse in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure FETs. – Electron. Lett., 2003, v.39, N9, p.750–752.

12. www.siliconstrategies.com, Rawasaki, Jap. – Fujitsu Lab., p.1–3.

13. **Binari S.C., Klein P.B., Kazior T.E.** Proc. IEEE, June 2002, v.90, N6, p.1048–1058.

14. **Tamotsu Hashizume, Shinya Ootomo, Hideki Hasegawa.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based surface passivation and insulated gate structure for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFETs. – Phys. Stat. Sol. (c) 0, 2003, N7, p.2380–2384.

15. **Gillespie J.K., Fitch R.C., Sewell J.** et al. Effect of Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO passivation layers on the output power of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs. – IEEE Electron Device Lett., 2002, v.23, N9, p.505–507.

16. **Kikkawa T., Nagahara M., N.Okamoto** et al. Surface-charge controlled AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> power HFET without current collapse and G<sub>m</sub> dispersion. – IEDM, 2001.

17. **Wataru Saito, Yoshihara Takeda, Maschiko Kuraguchi** et al. High Breakdown voltage AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure MESFETs design and high current density switching behaviour.

18. **Seikoh Yoshidda, Hirotatsu Ishii, Jiang Li** et al. A high power AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure field effect transistor. – Solid State Electronics, 2003, v.47, N3, p.589–592.

19. **Kuzuhara M., Miyamoto H., Ando Y.** et al. High voltage RF operation of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure FETs. – Phys. Stat. Sol. (a) 2003, v.200, N1, p.161–167.

20. **Daumiller I., Kirchner C., Kamp M.** et al. Evaluation of the temperature stability of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure FETs. – IEEE Electron Device Lett., 1999, v.20, N9, p.44–450.

21. **Kemerly R.T., Wallace H.B., Yoder M.N.** Proc. IEEE, 2002, v.90, N6, p.1059–1065.

22. **Takashi Egawa, Gung Yuan Zhao, Hiroyashi Ishikawa** et al. Characterization of recessed gate heterostructure MESFETs on sapphire. – IEEE Trans.on Electron Devices, 2001, v.48, N3, p.603–607.

23. Compound Semiconductor, 2004, v.10, N6.

24. Compound Semiconductors, 2003, v.9, N10, p.13.

25. **Behdash R, Tobler H., Neuburger M.** et al. – Electron lett., 2003, v.39, p.627.

26. **Dumka D.C., Lee C., Tserng H.Q.** et al. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs on Si Substrate with 7 W/mm output power density at 10 GHz. – Electron. Lett., 2004, v.40, N16, p.1023–1024.

27. **Lu W., Rumar V., Piner E.L., Adesida I.** – IEEE Trans. Elec. Devices, 2003, v.50, p. 1069–1074.

28. **Adesida I., Lu W., Kumar V.** – 6 Int. Conf. on Solid\_State and IC Technology Proc., 2001, p.1163–1168.

29. **Palmour J.W. et al.** – IEDM, 2001, December 2–5.

30. Compound Semiconductor, 2005, v.11, N3, p.27,28.

31. **Parikh P., Wu Y., Chavarkar P.** et al. High frequency performance of short gate length Ga<sub>N</sub> HEMTs – challenges, design optimization and results. – IWNS-2004, PM A3.1.

32. Compound Semiconductors, 2003, v.9, N5, p.13.

33. **Bardwell J.A., Liu Y., Tang H.** et al. – Electron. Lett., 2003, v.39, p.564–566.

34. **Chini A., Coffie R. Meneghesso** et al. – Electron. Lett., 2003, v.39, p.625–626.

35. **Ando Y., Okamoto Y., Mieamoto H.** et al. 110-W AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterojunction FET on thinned sapphire substrate. – IEDM Tech. Dig., 2001, p.381–384.

36. Proc. IEEE, 2002, v.90, N6, p.1059–1064.

37. **Laighton D.,** Raytheon RF. MRS Spring 2001. AME 1.3.

38. **Гладышева Н.Б., Дорощев А.А., Матвеев Ю.А., Чернявский А.А.** Исследование СВЧ ПТБШ на основе гетероструктур AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. – Тезисы доклада 4 Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы". 3–5 июля 2005 года, ФТИ им. Иоффе РАН, С.-Петербург.