

МОЩНЫЕ GaN-ТРАНЗИСТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ

СЕРГЕЙ ТАРАСОВ, инженер-технолог 1-й категории, **ВЛАДИМИР ДИКАРЕВ**, заместитель начальника отдела, **АНДРЕЙ ЦОЦОРИН**, к.ф.-м.н., начальник лаборатории, АО «НИИЭТ»

В статье представлены результаты моделирования и измерения отечественных нитрид-галлиевых транзисторов. Проведен сравнительный анализ отечественных транзисторов с зарубежными аналогами. При создании структур кристаллов мощных СВЧ-транзисторов были проработаны разные конструктивные варианты.

ВВЕДЕНИЕ

Мощные нитрид-галлиевые СВЧ-транзисторы в настоящее время все более востребованы в качестве современной элементной компонентной базы для применения в перспективных системах связи и радиолокации.

С повышением требований к снижению энергопотребления, уменьшению массы и габаритных размеров современной электронной аппаратуры, повышению тактико-технических характеристик разрабатываемых изделий нитрид-галлиевый транзистор является перспективным прибором, способным заменить мощные LDMOS-транзисторы в наше время.

Нитрид-галлиевые транзисторы на полуизолирующем карбиде кремния имеют ряд преимуществ по сравнению с LDMOS-приборами: малое сопротивление в открытом состоянии, высокое пробивное напряжение сток-исток (свыше 100 В для приборов с рабочим напряжением питания 28 В и 150 В – для приборов с рабочим напряжением питания 50 В), широкий рабочий диапазон частот, высокое значение коэффициента полезного действия стока.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Проект элементарной ячейки GaN-транзисторного кристалла с проектной нормой 0,5 мкм был рассчитан с помощью программного комплекса Sentaurus TCAD. Проект включает в себя моделирование технологии создания GaN-транзисторного кристалла, оптимизацию расчетной сетки для умень-

шения времени расчета и улучшения сходимости проекта, расчет передаточной и выходной характеристик, определение напряжения отсечки ($U_{GS(OFF)}$), пробивного напряжения (U_{DS}). Моделирование физико-технологической модели нитрид-галлиевого транзистора осуществлялось в программной оболочке Sentaurus Structure Editor (SDE). Для расчета электрофизических характеристик использовалась программная оболочка Sentaurus Device.

Для верификации расчетов моделей нитрид-галлиевых транзисторов было проведено контрольное моделирование с использованием экспериментальных данных по тестовым пластинам из реального технологического процесса изготовления нитрид-галлиевых транзисторных кристаллов. На рисунке 1 представлены передаточные характеристики, полученные в результате измерения

транзисторного кристалла на пластине 465 (см. рис. 1а) и моделирования базовой ячейки транзисторного кристалла в программном комплексе Sentaurus TCAD (см. рис. 1б).

Для повышения значений порогового напряжения на затворе в модели элементарной транзисторной ячейки, рассчитанной в Sentaurus TCAD, была оптимизирована толщина барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$. Данный метод в рамках моделирования элементарной транзисторной ячейки позволил получить значения порогового напряжения на затворе около -3 В (см. рис. 2б), что соответствует лучшим зарубежным аналогам. Так например, типовое значение порогового напряжения на затворе транзистора CGH40010 от компании Cree согласно спецификации составляет -3 В [1], а у транзистора TGF2023-02 от TriQuint этот показатель равен $-3,6$ В [2].

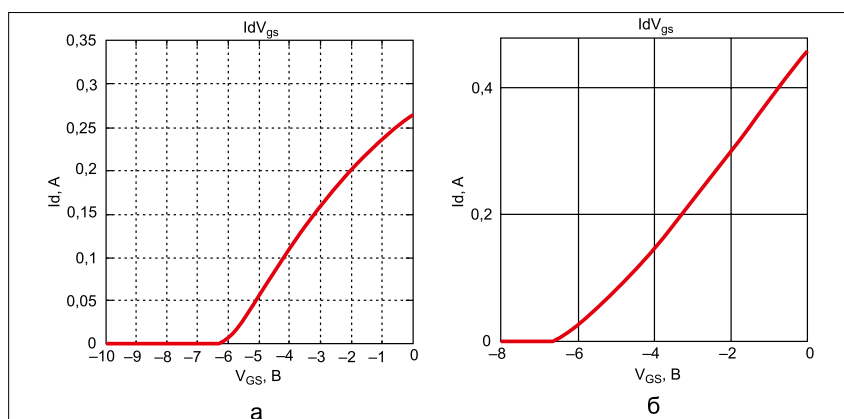


Рис. 1. а) расчетная; б) экспериментальная передаточные характеристики транзисторного GaN-кристалла

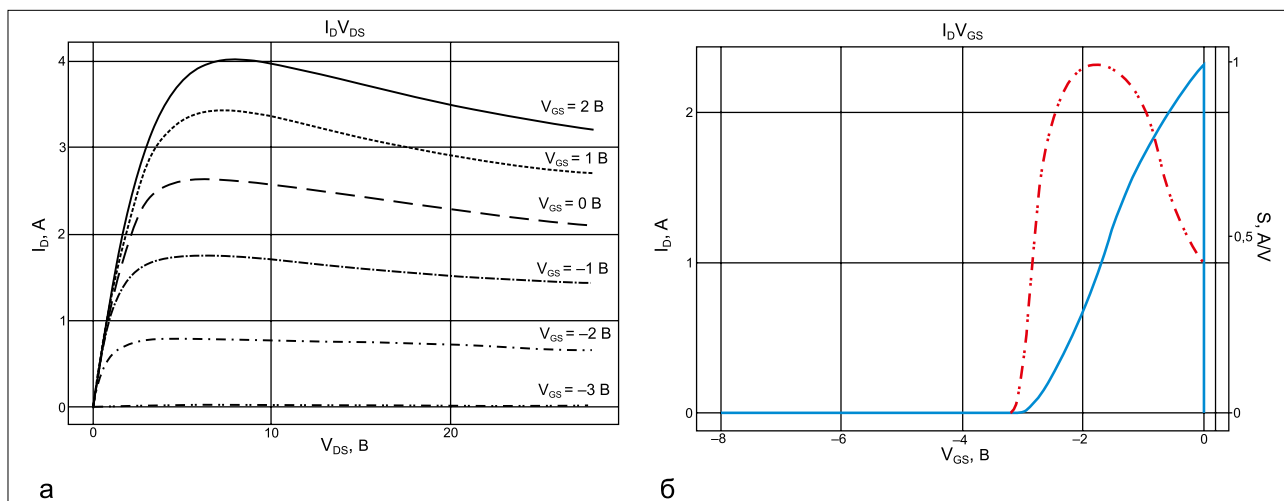


Рис. 2. а) расчетная выходная; б) передаточная характеристики элементарной транзисторной ячейки с периметром затвора 5,6 мкм

С помощью программного комплекса Sentaurus TCAD были смоделированы два варианта повышения пробивного напряжения сток–исток при внесении следующих конструктивно-технологических изменений в топологию транзисторной ячейки:

- 1) топологические изменения в конструкции полевого электрода (Field Plate): Source Field Plate (SFP) и Gate Field Plate (GFP);
- 2) увеличение расстояния между истоковыми–стоковыми омическими контактами с 4,5 до 5 мкм с учетом внесенных конструктивных изменений при формировании полевого электрода.

В первом случае для SFP пробивное напряжение сток–исток ($U_{СИ\text{ПРОБ}}$) составило 110 В ($I_C = 10$ мА, $U_{ЗИ} = -8$ В) и 184 В ($I_C = 10$ мА, $U_{ЗИ} = -8$ В) для GFP. При увеличении расстояния между истоковыми–стоковыми омическими контактами с 4,5 до 5 мкм $U_{СИ\text{ПРОБ}}$ составило 156 В ($I_C = 8$ мА, $U_{ЗИ} = -8$ В) и 237 В ($I_C = 8$ мА, $U_{ЗИ} = -8$ В).

Эпитаксиальные гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием аммиака в качестве источника азота на установке STE3N2 SemiTEq (Россия) на подложках SiC (001) диаметром 2 дюйма [3–5]. Параметры выращенных гетероструктур контролировались с помощью оптической высокоразрешающей микроскопии и бесконтактного измерения эффекта Холла.

Для формирования кристаллов мощных GaN-транзисторов использовался технологический процесс, включающий в себя циклы формирования омических контактов методом электронно-лучевого напыления Ti/Al/Ni/Au и быстрого термического отжига, плазмохимического травления меза-изоляции, формирования затворной металлизации с проектной нормой 0,5 мкм путем последовательного выполнения кон-

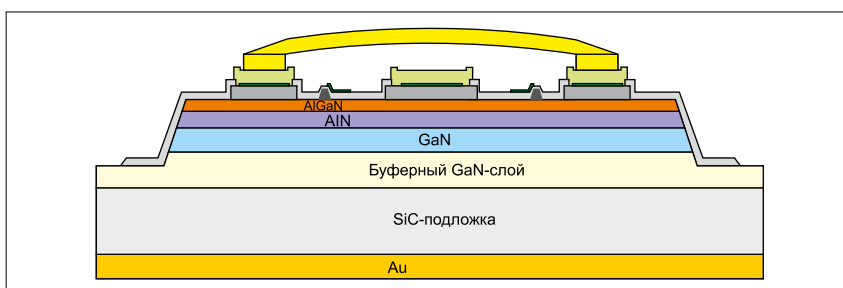


Рис. 3. Схематическое изображение разреза транзисторной ячейки с «воздушными» мостами

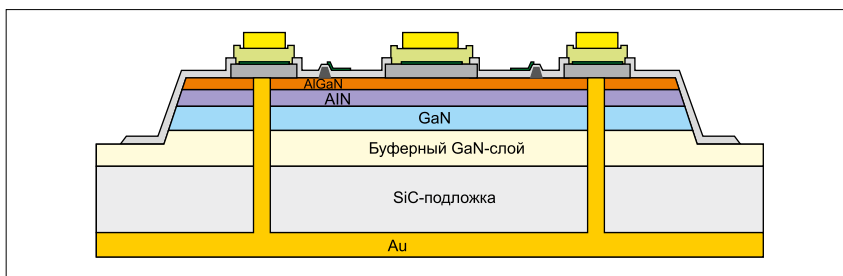


Рис. 4. Схематическое изображение разреза транзисторной ячейки с металлизированными сквозными отверстиями в активной области

тактной УФ-литографии и электронно-лучевого напыления Ni/Au. Пассивация транзисторных структур осуществлялась путем плазмохимического осаждения SiNx. При создании структур кристаллов мощных СВЧ-транзисторов были проработаны разные конструктивные варианты, в т. ч. реализованы блок формирования двухуровневой металлизации, позволившей создать многопальцевые затворы с «воздушными мостами» (air bridges) и полевые электроды (field plate), а также блок формирования сквозных металлизированных отверстий (via holes) как за пределами активной области OSV (outside source via) (см. рис. 3), так и в активной области транзисторной ячейки ISV (inside source via) (см. рис. 4) [6–7]. Межоперационный контроль параметрического монитора (process control monitor, PCM) и выходной контроль электрических параметров транзисторных кристаллов на пластине проводились на полуавтоматическом измерительном

стенде на основе микронзондовой станции Cascade MicroTech и измерительном оборудовании фирмы Agilent.

Основной особенностью используемых гетероструктур является слой AlN толщиной 0,2–0,5 мкм и многослойный переходный слой переменного состава $Al_xGa_{1-x}N$ ($0,3 < x < 1,0$) общей толщиной до 1,2 мкм, обеспечивающие пробивные напряжения межприборной изоляции выше 200 В. Далее следует нелегированный слой GaN толщиной 1000 Å, на верхней границе которого с легированным Si слоем $Al_xGa_{1-x}N$ ($x \approx 0,33$) общей толщиной 250 Å образуется двумерный электронный газ (ДЭГ). Верхним слоем гетероструктуры является нелегированный слой GaN.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе разработанного технологического процесса изготовлены нитрид-галлиевые транзисторы ТНГ103104–12 [8] с выходной мощностью

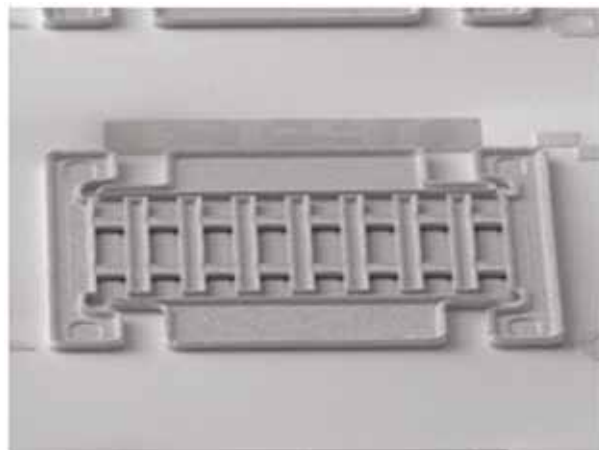
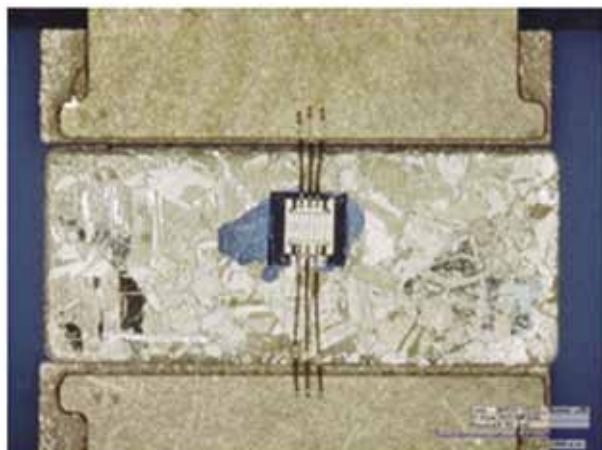


Рис. 5. Внешний вид транзистора ТНГ103104-12: а) в металлокерамическом корпусе; б) фото транзисторного кристалла на пластине полуизолирующего карбида кремния

4 Вт для применения в L- и S-диапазонах частот. Ширина затвора транзисторов ТНГ103104-12 составляла 5,6 мм. Следует заметить, что пиковая удельная мощность транзисторов в использованном варианте технологии, измеренная на пластине на тестовых СВЧ-транзисторах малой периферии, достигает 3,8–4,4 Вт/мм при напряжении питания до 28 В. Однако на данном этапе исследований для обеспечения надежности измерения кристаллов мощных транзисторов намеренно использовался конструктивно-технологический запас. Установлено, что основным фактором, ограничивающим эффективное суммирование мощности в приборах большой периферии, на данном этапе стало последовательное уменьшение пробивного напряжения затворов по мере выполнения технологических операций блока формирования воздушных мостов. Так, у приборов малой периферии пробивные напряжения после затворного цикла составляли не менее 80 В, тогда как у кристаллов большой периферии эти значения падали до 35–50 В. В настоящее время проводится оптимизация технологии, уже позволившая увеличить пробивные напряжения до 100–120 В на малых транзисторах и до 60–70 В на транзисторах большой периферии. Еще одним резервом для повышения рабочих напряжений транзисторов является оптимизация конструкции field plate, которая на данном этапе исследования не проводилась.

Монтаж транзисторных кристаллов ТНГ103104-12 осуществлялся в металлокерамический корпус КТ-55 С-1 при помощи серебряносодержащего клея; полученный теплоотвод признан достаточным для данного уровня удельной мощности. Внешний вид транзисторов ТНГ103104-12 со снятой крышкой представлен на рисунке 5а, а транзисторных кристаллов – на рисунке 5б.

Электрические параметры транзисторов были исследованы при помощи стенда для проведения Source- и Load-Pull-измерений мощных СВЧ-транзисторов. Измерения проводились в непрерывном режиме на частотах 1500, 2000, 2700, 2900 и 3100 МГц при

напряжении питания 12,5 В. Данные измерения транзисторов представлены в таблице 1.

Для оценки полученных результатов был проведен сравнительный анализ электрических параметров нитрид-галлиевого транзистора ТНГ103104-12,

Таблица 1. Результаты измерения транзисторов

Тип транзистора	$P_{\text{вых}}$, Вт	f , МГц	$K_{\text{ур}}$, дБ	$\eta_{\text{с}}$, %	$U_{\text{пит}}$, В
ТНГ103104-12	3,3	1500	15	48	12,5
	3,7	2000	14	45	
	3,7	2700	11	43	
	3,7	2900	11	40	
	3,7	3100	11	40	

Таблица 2. Электрические параметры приборов

Наименование параметра	TGF2023-02 ф. TriQuint	ТНГ103104-12 ОАО «НИИЭТ»
L_z , мкм	0,25	0,5
W_z , мм	2,5	5,6
Размер кристалла, мм	0,82×0,92	0,9×0,9
$R_{\text{сш}}$, Ом	0,83	0,6–0,8
Крутизна	0,84	0,77
I_c , мА	250	200–250
$P_{\text{вых}}$ 1 дБ, ($f = 2$ ГГц, $U_{\text{пит}} = 12,5$ В, $I_c = 0,2$ А), Вт	3,5	3,7
$P_{\text{вых}}$ 3 дБ, ($f = 2$ ГГц, $U_{\text{пит}} = 12,5$ В, $I_c = 0,2$ А), Вт	4	≈5
$\eta_{\text{с}}$ 1дБ, ($f = 2$ ГГц, $U_{\text{пит}} = 12,5$ В, $I_c = 0,2$ А), %	52,9	43
$\eta_{\text{с}}$ 3дБ, ($f = 2$ ГГц, $U_{\text{пит}} = 12,5$ В, $I_c = 0,2$ А), %	57	48
$K_{\text{ур}}$ 1 дБ, ($f = 2$ ГГц, $U_{\text{пит}} = 12,5$ В, $I_c = 0,2$ А), дБ	20,4	15,6
$K_{\text{ур}}$ 3 дБ, ($f = 2$ ГГц, $U_{\text{пит}} = 12,5$ В, $I_c = 0,2$ А), дБ	18,4	13,6
Вид межсоединений истоковых шин	вне области OSV и с «воздушным мостом»	вне области OSV и с «воздушным мостом»

Таблица 3. Результаты измерения транзисторов ТНГ40010-28

Тип транзистора	$P_{\text{вых}}$, Вт	f , МГц	Z_s , Ом	Z_L , Ом	$K_{\text{ур}}$, дБ	$\eta_{\text{с}}$, %	$U_{\text{пит}}$, В
ТНГ40010-28	10,94	2500	6,03 – j1,83	15,33 + j2,83	15,39	48,73	28
	10,65	3500	7,20 – j8,11	15,09 – j1,95	12,27	47,18	
	10,30	4000	7,44 – j9,86	16,38 – j3,72	11,12	44,47	

разработанного ОАО «НИИЭТ», и зарубежного транзистора TGF2023–02 фирмы TriQuint (США). Для корректного сопоставления результатов анализа электрических параметров транзисторов измерения проводились в одинаковых условиях (режим работы – непрерывный, $f = 2000$ МГц, $U_{пит} = 12,5$ В). Результаты измерений приборов представлены в таблице 2.

На текущий момент в рамках научно-исследовательской работы «Исследование и разработка мощных СВЧ нитрид-галлиевых транзисторов с выходной импульсной мощностью 10, 30, 100, 250–300 Вт и модулей СВЧ на их основе с рабочей частотой до 3,5 ГГц», шифр «Палитра», выполняемой за счет собственных средств, ОАО «НИИЭТ» разработаны отечественные нитрид-галлиевые транзисторы с выходной мощностью 10 Вт и напряжением питания 28 В. Эти транзисторы выполнены по проектной норме 0,25 мкм с формированием истоковых металлизированных сквозных отверстий в активной области. Монтаж транзисторных кристаллов ТНГ40010–28 осуществляется в металлокерамический корпус КТ-81 С при помощи серебросодержащего клея.

С помощью стенда для проведения Source- и Load-Pull-измерений (методом согласованных нагрузок) мощных СВЧ-транзисторов были исследованы электрические параметры транзисторов. Измерения проводились в непрерывном режиме на частотах 2500, 3500 и 4000 МГц при напряжении питания 28 В. Данные измерения транзисторов представлены в таблице 3.

После усовершенствования и оптимизации топологии элементарной транзисторной ячейки планируется осуществить разработку серии мощных 50-В GaN-транзисторов.

Разработка серии отечественных мощных нитрид-галлиевых транзисторов позволит осуществить работы по импортозамещению зарубежных аналогов, которые в настоящее время применяются в ЭКБ для отечественной аппаратуры.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция и базовая технология создания мощных нитрид-галлиевых транзисторов для применения в L- и S-диапазонах частот.
2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало близкое совпадение, на основании чего можно сделать заключение об адекватности виртуальных моделей транзисторных кристаллов реальным приборам.
3. На основании полученных результатов сделано заключение о возможности применения САПР Sentaurus TCAD для разработки изделий силовой СВЧ-электроники на основе нитрид-галлиевой компонентной базы с заданными характеристиками на базе технологии предприятия-изготовителя.
4. Реализован технологический процесс, включающий в себя формирование всех конструктивных элементов, необходимых для проектирования мощных СВЧ-устройств, в т. ч. усиленной многоуровневой металлизации и сквозных металлизированных отверстий.
5. Полученные экспериментальные GaN-транзисторы в исследованных режимах по основным эксплуатационным параметрам соответствуют зарубежному техническому уровню.
6. Определены направления оптимизации конструкции и технологии экспериментальных GaN-транзисторов с целью адаптации их характеристик с рабочими режимами ЭКБ в используемых и перспективных типах РЭА. ▢

ЛИТЕРАТУРА

1. www.cree.com.
2. www.triquint.com.
3. С. Б. Александров и др. ФТП. 2004. Т. 38.
4. В. В. Волков и др. Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30.
5. Патент РФ N2222845 от 01.04.03.

6. А. Алексеев, Д. Красовицкий, С. Петров, В. Чалый. Компоненты и технологии. 2. 106 (2008).

7. Д. Красовицкий и др. Тезисы докладов 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». Москва. 13–15 июня 2013.

8. Свидетельство о регистрации топологии интегральной микросхемы № 2013630107 от 19 июля 2013.