

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ GAN ТРАНЗИСТОРОВ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

© М. В. Кулиев

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

В данной статье рассматриваются преимущества GaN-транзисторов, обусловившие их интенсивное развитие и широкое применение в современных СВЧ устройствах. В статье приведены параметры GaN-транзисторов, разработанных в последние годы ведущими мировыми компаниями, приведены области использования этих разработок и перспективы развития технологий производства устройств на нитриде галлия.

Ключевые слова: СВЧ транзисторы, нитрид галлия, HEMT

Сведения об авторах: Кулиев Мурад Васифович, аспирант, m.kuliev@mail.ru

OVERVIEW OF TODAY'S GAN TRANSISTORS AND DEVELOPMENT TRENDS

M. V. Kuliev

JSC «S&PE» Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd 27

This article describes the advantages of GaN-transistors that led to their intensive development and wide application in modern microwave devices. The article lists the parameters of GaN-transistors, developed in recent years, leading companies are given the use of these developments and the prospects for the development of gallium nitride devices technologies.

Keywords: microwave transistors, gallium nitride, HEMT

Data of authors: Kuliev Murad Vasifovich, postgraduate, m.kuliev@mail.ru

Введение

Приборы на основе нитрида галлия изучаются с 80-х годов прошлого столетия. Первыми приборами на нитриде галлия стали светодиоды, которые за последние 20 лет нашли широкое применение. Сообщения о создании транзисторов на нитриде галлия впервые появились в 1993 году от разработчиков ARA Optics во главе с М.Ханом [1]. Появление GaN транзисторов существенно расширило возможности приборов СВЧ-диапазона.

Известные мировые производители, такие как Toshiba, Nitrontex, Eudyna,

Срее – сообщают о ведении работ по созданию GaN транзисторов С (4-8 ГГц) и Х (8-12,5 ГГц)-диапазонов частот с выходной мощностью до 80 Вт в непрерывном и до 400 Вт в импульсном режимах [2]. Работы в этом направлении проводятся также в других странах.

Возможности СВЧ-приборов напрямую связаны с электрофизическими параметрами применяемых полупроводниковых материалов. Так СВЧ-приборы L (1-2 ГГц) и S (2-4 ГГц)-диапазонов, как правило, реализуются на кремниевых кристаллах. В С (4-8 ГГц) и Х (8-12,5 ГГц)-диапазонах возможности приборов на

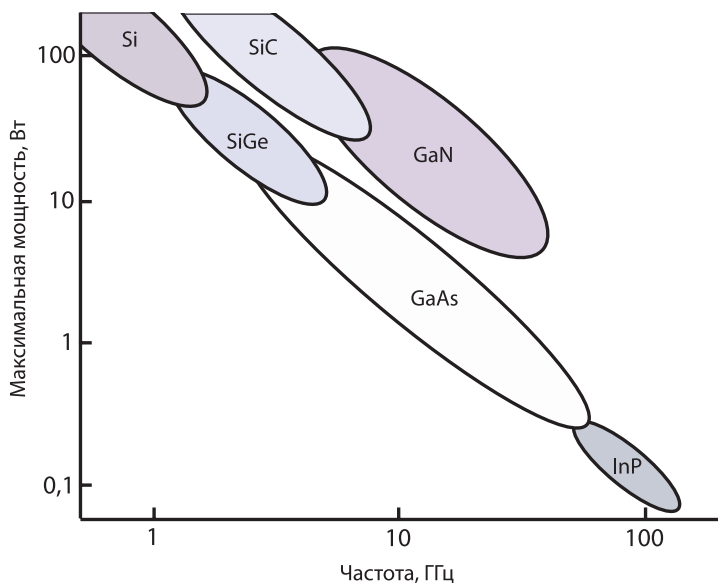


Рис. 1

Достижимые параметры выходной мощности транзисторов, изготовленных на различных полупроводниковых материалах, в зависимости от рабочей частоты

кремнии и арсениде галлия в части мощных СВЧ приборов и аналогово-цифровых схем практически исчерпаны. В этих диапазонах на первый план выходят приборы на нитриде галлия и кремнии-германии (рис. 1) [2].

Основные электрофизические параметры наиболее распространённых полупроводниковых материалов, используемых для создания СВЧ-приборов, приведены в табл. 1 [1].

Из таблицы видно, что GaN обладает выдающимися электрофизическими свойствами: сравнительно высокой подвижностью и высокой скоростью насыщения электронов, высокими пробивными напряжением, достаточно высокой теплопроводностью и

высокой рабочей температурой. Благодаря этим свойствам на основе AlGaN/GaN гетероструктур создаются полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), которые отличаются высокими значениями мощности и рабочей частоты [3].

В GaN HEMT используется двумерный электронный газ высокой плотности (2DEG), накопленный в пограничном слое между GaN и AlGaN посредством пьезоэлектрического эффекта и естественного эффекта поляризации. Это даёт возможность реализовать низкое сопротивление канала в открытом состоянии (R_{on}). В сочетании с высоким напряжением пробоя GaN HEMT показы-

Таблица 1

Сравнение основных электрофизических параметров наиболее распространённых полупроводниковых материалов, используемых для создания СВЧ-приборов

Материал	Si	GaAs	SiC-4H	GaN	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, эВ	1.1	1.4	3.2	3.44	5.0
Поле пробоя, МВ/см	0.3	0.4	3.5	3.3	20
Подвижность электронов, см ² /В·с	1450	8500	900	440	4500*
Подвижность дырок, см ² /В·с	480	400	120	200	3800*
Теплопроводность, Вт/м·К	148	54	330	130	2400*

ваает высокий КПД [4]. В результате становится возможным увеличить плотность мощности при высоких рабочих частотах, сокращая размеры пассивных элементов, что позволяет снизить требования к охлаждению всей системы.

На сегодняшний день высокочастотный GaN HEMT широко используется для усилителей мощности передачи в беспроводных системах связи и радиолокационных системах, в которых требуется высокая выходная мощность и высокий коэффициент полезного действия (КПД). Однако следует отметить и недостатки, связанные с применением GaN материалов. Это прежде всего сложность технологического процесса производства GaN HEMT и, как следствие, их высокая себестоимость. Сегодня продолжается процесс совершенствования технологии выращивания GaN-гетероструктур для серийного производства на подложках диаметром 150 мм, что позволит ускорить развитие данного направления, а также существенно снизить себестоимость кристаллов за счёт увеличения выхода годной продукции [5].

Сравнение биполярных кремниевых транзисторов, LDMOS и GaN транзисторов

Кремниевые биполярные транзисторы уже много лет успешно используются в радиолокационных системах S-диапазона, и их будут применять ещё многие годы. Кремний является одним из наиболее благоприятных материалов по эффективной мощности в диапазоне 100-2000 МГц. Технологии производства кремниевых транзисторов и их сборки хорошо апробированы в серийном производстве, и обработка Si-пластин не является сложной. Эта технология хорошо изучена и обеспечивает высокую выходную мощность на частотах S-диапазона и достаточно высокий КПД (порядка 50 %).

В качестве типичного примера можно привести биполярный транзистор IB2729M170, обеспечивающий в импульсном режиме выходную мощность около 190 Вт в диапазоне частот 2,7-2,9 ГГц при КПД порядка 45 % и усилении более 9 дБ [6]. Разработаны и серийно выпускаются

транзисторы и на более высокие частоты (например, транзисторы фирмы Infineon BFG135A на 6,0 ГГц, $P_k = 1000$ мВт и BFG235 на 5,5 ГГц, $P_k = 2000$ мВт в корпусе SOT-223). Однако с увеличением частоты происходит значительное уменьшение КПД.

В свою очередь технология LDMOS также нашла своё применение в радарх S-диапазона. Если сравнивать устройства, выполненные по технологии LDMOS, с устройствами, выполненными по биполярной технологии, по таким важным характеристикам, как усиление, линейность, тепловые режимы, переключающие свойства, число элементов схемы, сразу становится очевидным преимущество первых. Также технология LDMOS обеспечивает чуть более высокое усиление (приблизительно на 2 дБ больше) по сравнению с биполярной, однако максимальная выходная мощность при использовании каждой из описанных технологий приблизительно одинакова.

Приборы по данной технологии выпускаются компаниями Freescale Semiconductor, Sirenza Microdevices, PolyFET, NXP и другими. Отличаются низкой ценой при массовом производстве, высоким КПД, высокой допустимой рабочей температурой кристалла (200 °C). В то же время имеют низкие предельные рабочие частоты (до 3,5 ГГц) и существенно более высокие (на порядок и более), чем приборы других технологий, удельные ёмкости активной структуры, что создаёт серьёзные трудности их широкополосного согласования [7].

Характеристики типичного LDMOS-транзистора можно проследить на примере ILD2731M140, обеспечивающего в импульсном режиме выходную мощность около 180 Вт в диапазоне частот 2,7-3,1 ГГц при КПД порядка 40,5 % и усилении более 10 дБ [6].

На более высоких рабочих частотах C и X-диапазонах применяются гетероструктурные полевые транзисторы на широкозонных полупроводниках, таких как арсенид галлия и нитрид галлия.

GaAs pHEMT-транзисторы до середины текущего десятилетия были (и пока остаются) самым массовым строительным материалом в классе широкополосных приборов. Существенное снижение стоимости приборов, изготавливаемых по этой технологии с размерами затвора 0,1-0,25 мкм, ставшее следствием промышленного освоения процессов обработки пластин диаметром до 150 мм и достижения высокого процента выхода годных схем, распространило эти приборы практически во все сектора применения от мобильных телефонов и базовых станций до радаров, систем РЭП и систем связи миллиметрового диапазона. Эта технология стала стандартной и сегодня предоставляется практически всеми фирмами, выполняющими услуги по контрактному производству (foundry) МИС СВЧ. Использование этой технологии позволило наладить серийный выпуск монолитных усилителей в диапазонах до 32 ГГц с мощностями до 4-7 Вт. Ведущими компаниями (TriQuint Semiconductor, Excelics, Agilent Technologies, Hittite Microwave, Sumitomo Electric, RFMD, Mimix Broadband, UMS, Transcom и рядом других) выпускаются сотни типов мощных транзисторов и МИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов в виде кристаллов, являющихся сегодня основным «кирпичиком» для построения широкополосных усилителей мощности на частотах выше 2 ГГц. GaAs pHEMT-транзисторы имеют высокое усиление и КПД, высокие граничные частоты, пригодны для работы в классе АВ. Рабочая температура кристалла до 150 °С, удельная выходная мощность до 1 Вт/мм. Мощные транзисторы и МИС по этой технологии выпускаются и рядом российских производителей (АО «НПП «Пульсар», АО «НПП «Исток» им. Шокина», ПАО «Октава») [7].

С другой стороны, GaN-транзисторы позволяют существенно улучшить характеристики проектируемых устройств. Поскольку нитрид-галлиевая структура является полупроводником с широкой запрещённой зоной, то можно использовать повышенное напряжение питания, что, в свою очередь, даёт возможность достичь более высокой плотности мощности. Более высокая плотность мощности обеспечивает низкое зна-

чение ёмкости на единицу выходной мощности, а это значит, что можно создать транзисторы, обладающие большей мощностью при сравнимом частотном диапазоне.

Повышенное напряжение питания означает более высокое сопротивление нагрузки при том же уровне выходной мощности, за счёт этого можно достичь лучшего КПД и упростить схемотехническое решение цепей согласования. Отмеченные преимущества GaN гетероструктур позволяют устранить основную причину, сдерживающую создание твердотельных РЛС С, Х и Ku (12,5-18 ГГц) диапазонов, а именно недостаточный уровень выходной мощности СВЧ транзисторов и твердотельных модулей СВЧ передатчиков, изготавливаемых сегодня на основе гетероструктур GaAs. Однако высокая плотность мощности вызывает проблемы с рассеиванием тепла, что является серьёзным препятствием для использования GaN-транзисторов в непрерывном (CW) режиме, но делает их идеально подходящими для мощных импульсных применений.

Нитрид-галлиевые гетероструктурные полевые транзисторы (GaN HEMT) и МИС на их основе, освоенные к сегодняшнему дню в серийном производстве компаниями Cree Inc., TriQuint Semiconductor, Sumitomo Electric, Nitronex, RFMD, открывают новую страницу в развитии параметров мощных широкополосных усилителей СВЧ диапазона. В этой технологии соединяются преимущества важные для проектирования приборов: высокое напряжение питания (28-50 В) высокий КПД (более 60 %); возможность работы в классе АВ с малой начальной рассеиваемой мощностью; частотный диапазон до 20 ГГц (в лабораторных образцах с длиной затвора от 0,1 мкм до 150 ГГц); высокое усиление; малые ёмкости активной структуры, максимальная из существующих технологий удельная выходная мощность на единицу ширины затвора (более 5 Вт/мм). К разряду недостатков серийных приборов можно отнести «затянутую» динамическую характеристику (снижение коэффициента усиления транзистора начинается

Таблица 2

Сравнение характеристик различных типов транзисторов

Прибор	Технология	Рабочая частота, ГГц	Выходная мощность, Вт	КПД %	Усиление, дБ	Напряжение питания, В
IB2729M170	Биполярная (Si)	2,7-2,9	190	45	9,5	36
ILD2731M140	LDMOS (Si)	2,7-2,9	180	40,5	10,5	32
NC4148S-1011	GaAs	10,3-10,7	37	30	6.8	10
NC41628S-910P150	GaN	10	150	43	8,5	44

при выходной мощности существенно меньшей, чем максимальная) и несколько большую цену на единицу мощности, чем у хорошо освоенных GaAs приборов [2, 7].

В табл. 2 приведено сравнение характеристик различных типов транзисторов.

Примеры импортных и отечественных современных GaN транзисторов и их характеристики

На сегодняшний день в мире существует ряд признанных лидеров по разработке и производству электронных компонентов на основе нитрида галлия. В данной статье описаны некоторые современные продукты передовых известных компаний.

Корпорация Infineon Technologies AG специализируется на выпуске мощных MOSFET. В последнее время компания расширила свою линейку мощных MOSFET – StrongIRFET™, и тем самым обеспечила выполнение основных требований по-

требителя: миниатюризация и сокращение энергопотребления. Кроме того, указанные МОП-транзисторы являются весьма прочными и тем способствуют увеличению срока службы электронных устройств.

Испытанная линейка StrongIRFET™ позволяет достичь максимальной эффективности использования энергии в электрических приборах (табл. 3) [8].

Другой известный разработчик и производитель СВЧ-транзисторов – корпорация Microsemi. Корпорация специализируется на разработке и производстве импульсных транзисторов и транзисторов для работы с непрерывной мощностью для первичных и вторичных радиолокаторов, а также систем связи.

Технология производства полупроводников с широкой запрещенной зоной позволяет устройствам работать при больших напряжениях и температурах перехода полупроводникового кристалла, благодаря чему достигается работа устройства

Таблица 3

Сравнительные характеристики транзисторов StrongIRFET

Наименование	Напряжение пробоя, В	Рабочий ток, А	Обратное сопротивление, Ом
IRL7472L1TRPBF	40	375	0,52/0,97
IRL7486MTRPBF	40	209	1,5/2,0
IRL40B209	40	195	1,2/1,6
IRL40B212	40	195	1,9/2,4
IRL40S212	40	195	1,9/2,4
IRL40B215	40	120	2,8/3,5
IRL60B216	60	195	1,7/2,2

Параметры импульсных СВЧ транзисторов

Импульсные приборы класса АВ	Наименование	$P_{\text{вых min}}$, Вт	$P_{\text{вых max}}$, Вт	Усиление min, дБ	V про- боя, В	КПД, %	$I_{\text{раб}}$, мА	Длина импульса, пс
VHF 150-100 MHz SiC SIT с общим затвором	0150SC-1250M	1250	160	9,5	125	60	500	300
UHF 406-450 MHz SiC SIT с общим затвором	0405SC-2200M	2200	440	8	125	55	150	300
1030/1000 MHz Mode-S ELM GaN на SiC HEMT с общим истоком	MDSGN-750ELMV	750	14,1	17,2	50	68	100	2400
1030MHz Mode-S / TCAS / IFF GaN на SiC HEMT с общим истоком	1011GN-1000V	1000	17,8	17,5	50	55	100	10
L-диапазон 1200-1400 MHz GaN на SC HEMT с общим истоком	1214GN-550V*	550	12	16,6	50	55	100	300
S-диапазон 2700-2800 MHz GaN на SiC HEMT с общим истоком	272SGN-500	500	35,5	11,5	65	54	100	100
S-диапазон 3100-3500 MHz GaN на SiC HEMT с общим истоком	3135GN-400V*	380	36	10	50	40	100	300
C-диапазон 4400-6000 MHz GaN на SiC HEMT с общим истоком	4450GN-100	100	9	10,45	60	50	30	100

большой мощности при меньшем размере. GaN транзисторы корпорации Microsemi используют подложку из SiC, благодаря чему достигается лучший теплоотвод, а значит и допустимая мощность устройства. Используются две технологии производства полупроводниковых устройств: GaN на SiC HEMT и SiC SIT. В диапазонах СВЧ, УВЧ и L SiC SIT транзисторы обеспечивают до 2200 Вт выходной мощности при длительности импульса 100 мкс и скважности 10. GaN на SiC транзисторы обеспечивают более 700 Вт выходной мощности для применений в авиационной электронике L-диапазона.

Для импульсных радаров GaN на SiC транзисторы обеспечивают выходную мощность в 500 Вт для L-диапазона, 500 Вт для S-диапазона и 150 Вт для C-диапазона [9]. Сравнительные характеристики импульсных СВЧ мощных транзисторов представлены в табл. 4

Компания Cree разработала в 2015 году два новых радиочастотных GaN транзистора с высокой мощностью и хорошим КПД при небольших размерах корпуса. Первое устройство – 350-ваттный полно-

стью согласованный GaN HEMT транзистор С-диапазона, превосходит по мощности многие приборы аналогичного класса. Второй прибор – GaN HEMT, отдающий мощность 500 Вт в нагрузку 50 Ом, он является одним из самых мощных полностью согласованных транзисторов S-диапазона среди приборов в корпусах такого же размера.

Эти энергоэффективные транзисторы позволяют создавать экономичные многокиловаттные усилители мощности необходимые для военных радаров, а также для радаров контроля погоды и воздушного трафика. По такому показателю качества, как отношение выходной радиочастотной мощности к площади 50-омного корпуса, 350-ваттное устройство С-диапазона превосходит ближайшие коммерческие транзисторы других производителей приблизительно в 3,5 раза, а 500-ваттные приборы S-диапазона обошли аналогичные приборы на кремнии более чем на 45 %.

При типичной импульсной мощности в режиме насыщения более 400 Вт транзистор CGHV59350 находит применение в системах наземных военных и доплеровских метеорологических радиолокаторов. Полностью согласованный 50-омный GaN HEMT, выпускаемый в стандартном корпусе размером 17,8x22,9 мм, работает в диапазоне частот от 5,2 до 5,9 ГГц и имеет типовой КПД стока 60 %.

Основной областью применения прибора CGHV31500F, отдающего в режиме насыщения импульсную мощность 700 Вт, будут радарные системы управления воздушным движением. Полностью согласованный 50-омный GaN HEMT, предназначенный для диапазона частот от 2,7 до 3,1 ГГц, имеет усиление по мощности 12 дБ и выпускается в стандартном для отрасли металлокерамическом корпусе размером 17,8x22,9 мм [10].

Таким образом, подобные GaN HEMT устройства позволяют решать целый ряд старых проблем радиолокационных систем, использующих традиционные усилители на лампах бегущей волны (ЛБВ). Работающим при напряжении 50 В арсенид галлиевым твердотельным усилителям

не нужны высоковольтные источники питания, необходимые в системах с ЛБВ и являющиеся источником частых отказов. Кроме того, такие твердотельные системы почти моментально готовы к работе, поскольку не требуют разогрева, имеют большую дальность обнаружения и повышенную достоверность распознавания целей.

Компания International Rectifier также разработала серию низковольтных Cascode GaN транзисторных переключателей.

Cascode – это двухступенчатый усилитель, который состоит из активного усилителя и последующего буферного усилителя. По сравнению с одним усилительным каскадом, такая схема может иметь следующие преимущества: высокую изоляцию ввода-вывода, более высокий входной импеданс, высокое выходное сопротивление, более высокий коэффициент усиления или более высокую пропускную способность.

В то же время компания Infineon стремится к разработке требуемых сборок и ИС по технологии поверхностного монтажа (SMD), что позволит в полной мере использовать превосходные характеристики GaN. Коэффициент добротности GaN приборов (FOM) в десять раз превышает самые лучшие кремниевые аналоги, что позволяет значительно повысить эффективность и снизить энергопотребление в системах распределения питания коммуникационного, автомобильного, бытового и вычислительного оборудования.

На приборах iP2010 и iP2011 (табл. 5) получены КПД более 90 % при повышении рабочей частоты в 2 раза по сравнению с кремниевыми компонентами. Например, POL преобразователь LTM4602HVV с номинальными параметрами 1 МГц, 10 А почти в 2 раза превышает по габаритным размерам GaN аналог IR с лучшими характеристиками 5 МГц, 12 А. iP2010 имеют входной диапазон напряжений от 7 до 13,2 В и позволяют управлять нагрузкой до 30 А в диапазоне напряжений 0,6...5,5 В. Максимальная рабочая частота приборов составляет 3 МГц. Модули iP2011 имеют аналогичную разводку, однако их

Характеристики переключаемых GaN транзисторов

Наименование	Тип корпуса	Диапазон частот переключения, кГц	Диапазон вход. напр-я, В	Диапазон вых. напр-я, В	Макс. выходной ток, А
iP2010TRPBF	LGA 7,7x6,5 мм	250-3,000	7-13,2	0,6-5,5	30
iP2011TRPBF	LGA 7,7x6,5 мм	250-5,000	7-13,2	0,6-5,5	20

рабочая частота достигает 5 МГц, а выходной ток ограничен 20 А. Включение нескольких моделей в одно семейство с одинаковой разводкой выводов позволит IR гибко удовлетворить спрос заказчиков на компоненты с различным уровнем тока, эффективностью и стоимостью.

Новые приборы выпускаются в LGA корпусах, оптимизированы на минимальные потери мощности и имеют высокоэффективное двухстороннее охлаждение [11].

Из отечественных разработчиков и производителей GaN-транзисторов лидерами являются АО «НПП «Пульсар» и АО «НПП «Исток» им. Шокина».

АО «НПП «Пульсар» проводит исследования и разработку маломощных и мощных СВЧ транзисторов на гетерогетероструктурах AlGaIn/GaN, а также СВЧ модулей и устройств на их основе. На предприятии разработаны СВЧ транзисторы на гетероструктурах AlGaIn/GaN/сапфир отечественного производства.

С точки зрения реализации HEMT AlGaIn/GaN-гетероструктуры выгодно отличаются от структур на базе AlGaAs/GaAs прежде всего шириной запрещенной зоны (E_g). На гетерогранице AlGaIn/GaN возникает большой разрыв зоны проводимости (E_c), что резко уменьшает ток утечки через затвор. Большие значения плотности электронов в канале двумерного электронного газа в сочетании с высокими пробивными полями обеспечивают увеличение плотности СВЧ-мощности в GaN-HEMT более чем на порядок по сравнению с приборами на основе GaAs [12].

Эти транзисторы обладают высоким уровнем устойчивости к ионизирующим факторам.

Разработанные AlGaIn/GaN HEMT по шумовым параметрам уступают традиционным приборам на базе GaAs. Однако существенно более высокие значения пробивных напряжений и работоспособность при более высоких температурах обуславливают лучшую устойчивость к уровню входной мощности. Таким образом, маломощные усилители (МШУ) на GaN транзисторах не уступают по коэффициенту шума МШУ на GaAs транзисторах с диодным устройством защиты, при меньших размерах устройства и более высокой надежности. Так приборы на частоте 10 ГГц при поданом смещении на сток 40 В могут иметь плотность мощности порядка 10 Вт/мм при КПД порядка нескольких десятков процентов в течение долговременной работы на большом сигнале [13].

Для ряда радиолокационных систем, использующих короткоимпульсный режим излучения, применение GaN транзисторов возможно уже сейчас.

Удельная выходная мощность маломощного GaN ПТБШ в импульсном режиме составила $P_{\text{вых.уд}} = 2,6$ Вт/мм, против $P_{\text{вых.уд}} = 1,6$ Вт/мм в непрерывном режиме. Утончение сапфировой подложки до толщины 40-50 мкм позволит увеличить рабочее напряжение $U_{\text{си}}$ до 25-30 В, что приведёт к существенному увеличению отдаваемой СВЧ мощности.

АО «НПП «Пульсар» разработаны и освоены в производстве ряд транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN/SiC.

Один из разработанных транзисторов с шириной затвора 4,6 мкм имеет следующие характеристики: ток стока при нулевом смещении на затворе $I_{\text{си,нас.0 зат.}} = 600$ мА/мм, ток стока при полностью открытым канале на затворе $I_{\text{си,нас.откр.}} = 1100$ мА/мм, крутизна $S = 120$ мС/мм, напряжение насыщения $U_{\text{си,нас}} = +8$ В, напряжения пробоя в рабочих режимах: сток-исток, исток-затвор и сток-затвор более 85 В, коэффициент усиления на частоте 11 ГГц $K_{\text{усил.Р}} = 10$ дБ [13].

АО «НПП «Исток» разработал транзисторы GaN с длиной затвора 0,5 мкм и периферией 500 и 1500 мкм. В ходе работы были созданы гетероэпитаксиальные структуры GaN на импортных подложках SiC фирмы Cree, разработана технология и изготовлены два типа транзисторов с шириной затвора 500 и 1500 мкм.

В качестве прототипа конструкции транзисторов была использована конструкция GaN транзистора TGF2023-01 фирмы TriQuint Semiconductor с тем отличием, что длина затвора у транзисторов разработки НПП «Исток» составляет 0,5 мкм, а не 0,25 мкм. Это было сделано для того, чтобы можно было использовать в технологии контактную ФЛГ, более дешевую, чем ЭЛГ.

Измерения СВЧ параметров транзисторов GaN с шириной затвора 500 и 1500 мкм производились непосредственно на пластине. Типичные S-параметры транзисторов GaN с шириной затвора 1500 мкм аналогичны S-параметрам транзистора TGF2023-01 с учётом разной длины затворов – коэффициент прямой передачи у последних выше примерно на 2 дБ [14].

Перспективы развития GaN технологии

Сегодня, когда растут требования к снижению энергопотребления и уменьшению габаритов электронной аппаратуры, GaN-транзистор оказался одним из самых перспективных приборов, способных заменить мощные кремниевые полевые транзисторы в компактных импульсных источниках питания, DC/DC-преобразователях, разумных сетях элект-

ропитания, электроприводах. Интерес к транзисторам на нитриде галлия для силовой электроники особенно усилился в последнее время в связи с запуском компаниями International Rectifier (IR) и Efficient Power Conversion (EPC) проектов GaNpowiR и eGaN, соответственно. Появление в 2011 году разработанного молодой start-up компанией Transphorm 600-В GaN-транзистора убедительно доказало возможность конкуренции нитрид-галлиевых транзисторов с высоковольтными МОП-транзисторами и БТИЗ [15].

В дополнение к миниатюризации и экономии энергии, использование технологии, основанной на GaN HEMT, как ожидается, распространится в будущем в широких областях. Расширение этой технологии ожидается при создании сетей покрытия на основе различных функций зондирования. В области технологии зондирования, изучаются различные применения, в том числе в области исследования, биотехнологии и структурного анализа посредством полезного использования высокоскоростных характеристик высокочувствительных GaN HEMT. Интеллектуальная городская система, автомобильно-транспортная система, пищевая промышленность, логистика, сельское хозяйство, промышленность, здравоохранение системы охраны окружающей среды и системы образования являются некоторыми примерами, где эта технология, как ожидается, внесёт свой вклад.

Благодаря своему низкому сопротивлению во включенном состоянии и КПД высокоскоростного переключения, GaN HEMT позволяет миниатюризировать размер устройства и свести к минимуму потребление энергии наряду с низкой стоимостью благодаря дальнейшему совершенствованию технологии GaN HEMT и развитию схемотехники.

Совершенствование GaN технологии позволяет:

- продолжить дальнейшее технологическое совершенствование силовых приборов,
- значительно повысить мощность силового прибора на новых современных материалах, таких как GaN;
- повысить надёжность преобразования энергии на высоких частотах с более высоким КПД.

GaN технология имеет большой потенциал для дальнейшего развития. Устройства на GaN транзисторах предлагают повышенную эффективность, плотность, частоту и лучшее соотношение цена-качество по сравнению с кремниевыми и другими технологиями.

Литература

1. Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю., Тараканов С., Уваров Н. Транзисторы на GaN пока самый «крепкий орешек» // *Электроника НТБ*. – 2005. – № 4. – С. 20-28.
2. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера, 2011. – С. 10-18.
3. Jones K. A., Chow T. P., Wraback M., Shatalov M., Sitar Z., Shahedipour F. AlGaIn devices and growth of device structure, *J Mater Sci* (2015) 50, pp. 3267-3307.
4. Joshin K., Kikkawa T., Masuda S., Watanabe K. Outlook for GaN HEMT Technology, *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 2014, vol. 50, № 1, pp.138-143.
5. Lidow A., Strydom J., M. de Rooij, Reusch D. GaN transistors for efficient power conversion. – Second edition. – Wiley, 2015, 250 p.
6. Уолкер Дж., Фармикоун Г., Боуери Ф., Баталья Б. Д. GaN-транзистор Integra Technologies с выходной мощностью 1 кВт для радарных применений S-диапазона // *Компоненты и технологии*. – 2014. – № 1. – С. 84-87.
7. Кишинский А. Широкополосные транзисторные усилители СВЧ диапазона: смена поколений // *Электроника НТБ*. – 2010. – № 2.
8. New infineon power MOSFETs make electrical appliances more compact and durable, *International Rectifier*, 2015.
9. Верхулевский К. Новые возможности с транзисторами на основе GaN компании Microsemi // *Компоненты и технологии*. – 2012. – № 9 (134). – С. 161-164.

10. Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В. СВЧ электроника в системах радиолокации и связи. – М.: Техносфера, 2016. – 728 с.
11. Макдональд Т. Преимущества силовых приборов на базе GaN от International rectifier // *Новости электроники*. – 2010. – № 7. – С. 29-32.
12. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. – М.: Техносфера, 2016. – 328 с.
13. Груздов В. В. Сложные функциональные блоки СВЧ РЭА // *Радиопромышленность*. – 2016. – № 3. – С. 46-53.
14. Попов В. В. Современное состояние и перспективы развития СВЧ-приборов и устройств в ОАО «Светлана» // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 4-8.
15. Бондарь Д. Мощные СВЧ-транзисторы и корпуса для российского и зарубежных рынков // *Электронные компоненты*. – 2013. – № 1. – С. 1-6.

References

1. Danilin V., Zhukova T., Kuznetsov Yu., Tarakanov S., Uvarov N. GaN-based transistors are still the hardest nut to crack. *Elektronika NTB*, 2005, № 4, pp. 20-28.
2. Vasilyev A. G., Kolkovsky Yu. V., Kontsevov Yu. A. *SVCH pribory i ustroystva na shirokozonnnykh poluprovodnikakh* [Microwave devices based on wide-bandgap semiconductors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, pp. 10-18.
3. Jones K. A., Chow T. P., Wraback M., Shatalov M., Sitar Z., Shahedipour F. AlGaIn devices and growth of device structure, *J Mater Sci* (2015) 50, pp. 3267-3307.
4. Joshin K., Kikkawa T., Masuda S., Watanabe K. Outlook for GaN HEMT Technology, *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 2014, vol.50, №1, pp. 138-143.
5. Lidow A., Strydom J., M. de Rooij, Reusch D. GaN transistors for efficient power conversion. – Second edition. – Wiley, 2015, 250 p.
6. Walker J., Farmikone G., Bowery F., Batalya B.D., *Integra Technologies 1kW GaN HEMT for S-band radar applications. Komponenty i tehnologii* [Components and technologies], 2014, № 1, pp. 84-87.
7. Kishchinskiy A. Wideband microwave transistor amplifiers: change of generations. *Elektronika NTB*, 2010, № 2.
8. New infineon power MOSFETs make electrical appliances more compact and durable, *International Rectifier*, 2015.

-
9. Verhulevskiy K. New opportunities with Microsemi GaN-based transistors. *Komponenty i tehnologii* [Components and technologies], 2012, № 9 (134), pp. 161-164.
 10. Belous A. I., Merdanov M. K., Shvedov S. V. *SVCH elektronika v sistemakh radiolokatsii i svyazi* [Microwave electronics for radar and communication systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 728 p.
 11. MacDonald T. Advantages of International Rectifiers' GaN power devices. *Novosti elektroniki* [News electronics], 2010, № 7, pp. 29-32.
 12. Gruzlov V. V., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *Kontrol novykh tekhnologiy v tverdotelnoy SVCH elektronike* [New technology control in solid-state microwave electronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 328 p.
 13. Gruzlov V. V. Complex functional blocks of microwave radio-electronic equipment. *Radiopromyshlennost* [Radioindustry], 2016, № 3, pp. 46-53.
 14. Popov V. V. Current state and development trends of JSC «Svetlana»s' microwave devices. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [], 2014, T. 19, № 4, pp. 4-8.
 15. Bondar D. Microwave power transistors and cases for Russian and foreign markets. *Elektronnye komponenty* [Electronic components], 2013, № 1, pp. 1-6.