

Применение GaN устройств в условиях космического пространства

Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев

Представлены и обоснованы основные преимущества нитрида галлия по сравнению с традиционными полупроводниковыми материалами СВЧ электроники. Приведены примеры планирования и реализации космических программ ведущих мировых держав в части использования GaN технологий. Показано, что разработка устройств на базе СВЧ GaN HEMT открывает новые перспективы для радиоэлектронных систем и является очевидным прорывом в индустрии спутниковой связи и локации.

Ключевые слова: нитрид галлия, GaN HEMT, радиоэлектронные системы, СВЧ электроника.

Application of GaN devices in space environment

Y.V. Kolkovsky, V.M. Minnebaev

The main advantages of gallium nitride compared to traditional semiconductor materials of microwave electronics are presented and justified. The planning and implementation examples of the leading world powers space programs regarding the use of GaN technology are given. It is shown that the development of devices based on microwave GaN HEMT opens new perspectives for electronic systems and is an obvious breakthrough in satellite communications and location industry.

Keywords: gallium nitride, GaN HEMT, electronic systems, microwave electronics.

Введение

Появление в начале 2000-х годов первых транзисторов с высокой подвижностью электронов, изготовленных по нитрид-галлиевой технологии (GaN HEMT), оставило несомненный след в спутниковой индустрии.

Основным достоинством GaN является то, что этот материал имеет жёсткую кристаллическую структуру. Именно поэтому он чрезвычайно устойчив к механическим, тепловым и электромагнитным внешним воздействиям. На начальном этапе развития технологии кристаллическая структура нитрида галлия была очень сильным сдерживающим фактором, поскольку выращивание кристаллов GaN было длительным и дорогостоящим. Тем не менее, в процессе научных исследований и совершенствования производства GaN HEMT и МИС были разработаны более экономичные технологии выращивания гетероэпитаксиальных слоёв на основе нитрида галлия.

Начиная с начала XXI века разработка GaN HEMT прошла большой путь, и сегодня на рынке доступны транзисторы и МИС в разных частотных диапазонах для различных применений. GaN устройства начали активно применяться в радиоэлектронной аппаратуре, такой как спутниковые системы зондирования Земли, связи и

вещания, РЛС различного базирования, системы широкополосной мобильной связи. Стало возможным, впервые с момента появления микроволновой технологии твёрдых состояний, разрабатывать и производить СВЧ устройства, и в первую очередь усилители мощности, которые превосходят на несколько порядков показатели по надёжности, линейности, плотности энергии и общей эффективности все существующие на сегодняшний день технологии, будь это GaAs, LDMOS или электровакуумные усилительные приборы.

В условиях космоса всё ещё находят применение усилители на лампе бегущей волны (ЛБВ) за счёт высокого КПД. Однако, так как ЛБВ используют дополнения к электронной пушке, которые подвержены износу с течением времени, и нуждаются в крайне высоком напряжении порядка нескольких тысяч вольт (~10 кВ). Их надёжность определена как не идеальная из-за повышенного сокращения электронов и вакуумного пространства в трубке со временем. Твердотельные СВЧ усилители часто считаются наиболее предпочтительным решением. По оценкам экспертов, за счёт своих уникальных возможностей GaN-усилители мощности со временем полностью вытеснят электровакуумные [1, 2].

Основные преимущества нитрида галлия

Разработка устройств на базе СВЧ GaN HEMT открывает новые перспективы и является очевидным прорывом в индустрии спутниковых систем. Основные технические характеристики полупроводниковых материалов представлены в таблице 1.

Уникальные свойства нитрида галлия приводят к достижению качественно лучших результатов, нежели традиционные материалы. Это связано со следующими особенностями GaN:

Высокое напряжение пробоя GaN устройств (до 150-200 В) делает их невероятно устойчивыми и позволяет транзистору работать при напряжениях питания до 50-80 В, за счёт чего значительно возрастает КПД. Более того, для каждого отдельно взятого значения выходной мощности и подаваемого напряжения, уровень тока может быть снижен в сравнении с другими технологиями. Это приводит к повышению надёжности системы электроснабжения, так как ток на выходе снижается в среднем на 75 %. Напряжение питания возрастает с $U_{си} = 10$ В, требуемых для работы GaAs транзисторов, до $U_{си} = 20-80$ В, но не возникает угрозы, что при сбое предохранителя в системе электропитания усилителей, обслуживающий персонал будет поражён током, как это может быть при работе лампового усилителя вследствие высокого напряжения (~10 кВ), которое требуется для функционирования лампы бегущей волны.

Большие входное и выходное сопротивление транзистора способствуют существенному упрощению согласующих цепей. Таким образом, при создании твердотельного СВЧ усилителя возможно использование преимуществ GaN для

улучшения комплексных показателей устройства в целом, к примеру, большего рабочего диапазона частот, большего коэффициента полезного действия, в зависимости от требований к усилителю.

Высокая удельная плотность мощности позволяет увеличить коэффициент усиления и выходную мощность транзистора. В системе это приводит к снижению количества каскадов усилителя и, как следствие, уменьшению габаритов устройств. К примеру, GaN комплексированные устройства С-диапазона имеют КПД до 48 %, в сравнении с показателями в 25-30 % для GaAs. В результате, кубический объём системы энергоснабжения может быть сокращён в два раза, или для данного значения объёма можно снизить мощность устройства. Так как сбои в энергоснабжении относятся к критическим, это приводит к повышению времени безотказной работы и сокращению затрат электроэнергии.

Высокая рабочая температура (более 200 °С) – это один из важнейших критериев GaN технологии, позволяющий добиться качественного скачка СВЧ устройств. GaAs HEMT устойчиво функционируют при температурах не более 100 °С. Структура кристаллической решётки нитрида галлия и возможность работы GaN транзисторов при высоких температурах (более 200 °С) делает их невероятно устойчивой и надёжной частью СВЧ усилителя. Известно, что при температуре канала выше 175 °С традиционный GaAs полевой транзистор прекращает работать или катастрофически теряет в коэффициенте усиления. GaN устройства при данной температуре могут эффективно работать ещё миллионы часов. С точки зрения надёжности, во всех твердотельных

Таблица 1

Технические характеристики полупроводниковых материалов

Полупроводник	Диэлектрическая постоянная (ϵ)	Ширина запрещённой зоны, эВ	Подвижность электронов, $см^2/V \times c$	Скорость насыщения, $см/c$	Критическое поле, МВ/см	Тепловая проводимость, Вт/см \times К
Ge	16,0	0,67	3900	$0,7 \times 10^7$	0,3	0,6
Si	11,8	1,1	1300	$1,0 \times 10^7$	0,3	1,5
GaAs	12,8	1,42	6000	$1,0 \times 10^7$	0,4	0,5
SiC	10,0	3,26	700	$2,0 \times 10^7$	4,5	4,5
GaN	9,0	3,42	1500	$1,5 \times 10^7$	1,9	1,7
алмаз	5,5	5,45	2200	$2,7 \times 10^7$	9,9	22,0

силовых и СВЧ устройствах транзисторы являются основным источником теплового излучения и до 90 % всех сбоев приходится именно на них [1]. Таким образом, использование GaN позволяет существенно упростить требования к теплоотводу, что особенно актуально для усилителей мощности.

Повышенная устойчивость к радиационным воздействиям, что особенно важно для применения в условиях космоса. Благодаря повышенной устойчивости к радиации, GaN-усилители мощности уже сейчас готовы вытеснить электровакуумные приборы из сегмента усилителей мощности сигналов искусственных спутников земли (ИСЗ) – раньше подобное было просто невозможным! Это даст возможность улучшить энергетические параметры спутника на 5-10 дБ, что позволит работать абонентским терминалам с антеннами существенно меньшего диаметра и сделает качественный скачок в спутниковом широкополосном доступе в Интернет. Более того, использование GaN даёт уникальную возможность перекрыть весь диапазон передачи ИСЗ одним устройством без разделения на транспондеры и без защитных интервалов, необходимых вследствие ограниченной линейности ламповых усилителей. GaN-усилители мощности – это идеальное решение для спутников нового поколения [2]. По устойчивости к радиационным воздействиям GaN превосходит и GaAs, а кроме того, может отлично противостоять электромагнитным импульсам:

- **лучшая линейность** в сравнении с GaAs и **очень низкие фазовые шумы**, что особенно важно для сложных видов модуляций. Опыт эксплуатации показал, что линейность GaN выше, чем GaAs, до 2 дБ при работе в одночастотном режиме и до 1,5 дБ в многочастотном режиме;

- **высокая устойчивость к воздействию входной мощности**, что позволяет использовать малошумящие усилители без традиционных для GaAs устройств защиты. Многочисленные исследования подтвердили, что устойчивость к входной мощности у GaN HEMT в 12-18 раз выше, чем у GaAs. Уровень устойчивости GaN МШУ к воздействию помех высокого уровня была доказана неоднократно [3-10].

Сегодня GaN-усилители не только вытесняют с рынка электровакуумные приборы, но также серьёзно конкурируют

с GaAs за счёт меньших габаритов и веса, низкого энергопотребления, расширенного температурного диапазона, высокой надёжности и высокой линейности.

Программы развития GaN ЭКБ и результаты их выполнения

Космические программы требуют долгосрочных вложений, цикл создания продукта замедлен по сравнению с потребительским рынком. Финансовые кризисы существенно влияют на производственную структуру программы, в связи с чем необходим длительный диалог на всех уровнях цепи поставок для поддержания производственных возможностей.

Правительства ведущих держав финансировали исследования нитрида галлия в университетах и промышленных предприятиях в рамках специальных программ: в США – WBGS-TI (Wide Bandgap Semiconductor Technology Initiative), WBGS-RF (Wide Bandgap Semiconductor Radio Frequency), NEXT (Nitride Electronic neXt-generation Technology) и NEXT2, в Европе – KORRIGAN (A Comprehensive Initiative for GaN HEMT Technology in Europe), WIDGAP (FP6 project on outlook for wide bandgap semiconductor technology), в Японии – NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), в России – в рамках Российского фонда фундаментальных исследований и Федеральных целевых программ по развитию электронной компонентной базы. Материалы и приборы разрабатывались для специальных и гражданских применений.

По результатам выполнения различных этапов программ были сформированы дополнительные подпрограммы развития технологий именно в направлении космического применения приборов и устройств.

В 2006 году стартовала программа European Space Agency (ESA) – Европейского Космического Агентства, в которой основное внимание акцентировалось на разработке критически важных технологий в сфере электронных компонентов космического применения и, в частности, GaN – технологии [11]:

- GREAT2 (GaN Reliability Enhancement And Technology Transfer Initiative) нацелена на создание надёжного GaN-процесса, доступного для внедрения в индустриальные проекты;

– EuSiC (High Quality European GaN-Wafer on Silicon Carbide Substrates for Space applications) направлена на разработку и освоение в производстве высококачественных GaN гетероэпитаксиальных структур, выращенных на подложках карбида кремния (SiC) европейского производства;

– Разработка высокопроизводительных процессов для широкозонной технологии, совместимой с кремниевой технологией, преследует цель создания GaN силовых транзисторов на кремниевых подложках;

– Разработка процессов эпитаксиального роста слоёв на основе нитрида галлия необходима, в том числе, и для определения основного европейского производителя эпитаксиальных структур;

– AGAPAC (Advanced GaN Packaging) направлена на создание корпусов, функционирующих при более высоких температурах, и сроки её выполнения согласованы с космической программой ESA;

– PROBA-V (X-band transponder) направлена на необходимость подтверждения лётной квалификации GaN-устройств в составе орбитальной группировки спутников ESA.

К настоящему времени в ряде стран уже получены практические результаты функционирования GaN ЭКБ в условиях космического пространства.

Еще в 2008 году Canadian Space Agency (CSA) – Канадское Космическое Агентство инициировало испытания надёжности GaN транзисторов, изготовленных NRC Lab (Оттава, Канада), в условиях космического пространства на Space Shuttle Endeavour [12]. Проведённые испытания подтвердили, что GaN, являясь чрезвычайно стабильным и химически инертным, становится «идеальным материалом» для космической электроники и электроники больших мощностей.

В США разработкой и производством GaN ЭКБ занимаются более 20 предприятий, среди которых основными следует считать Cree, TriQuint, Northrop Grumman, M/A-COM, Integra, между которыми существует разделение по диапазонам частот, уровню выходной мощности и специализации. «Новое поколение чипов на нитриде галлия произвело революцию на рынке военной и специальной электроники, – сказал Марк Роскер, заместитель директора DARPA по микроэлектронным

технологиям, – ЭКБ на GaN достигла такой степени надёжности и объёмов производства, что позволит в значительной степени заменить их предшественников на арсениде галлия, особенно в мощных приложениях» [13]. Кроме того, Колин Уилан, инженер Raytheon, работающий на технологии GaN, отметил, что радары с синтезированной апертурой (PSA) на основе нитрида галлия могут иметь объём в пять раз меньше аналогичных на основе GaAs или обладать на 50 процентов большей дальностью. В настоящее время NASA направляет усилия инженеров на разработку устройств, объединяющих передовые технологии КМОП с нитридом галлия, с целью создания полностью цифрового СВЧ усилителя мощности. Эта уникальная архитектура устранит классический радиочастотно-интерфейсный подход путём объединения усилителя мощности со смесителями и иными устройствами с цифровым управлением. Успешное развитие этой преобразующей технологии позволит значительно уменьшить размер, вес и потребляемую мощность будущих передатчиков [14]. Кроме того, ведутся исследования реакции двумерного электронного газа (2DEG) на границе нитрида алюминия-галлия (AlGaN) и нитрида галлия (GaN) при высоких температурах и механической деформации. Эти исследования позволяют создать платформу для зондирования механических напряжений (например, давления) в экстремальных условиях. Работоспособность GaN в агрессивных средах будет способствовать продвижению космической техники. Данное исследование способствует исследованиям атмосферы планет с профилем как у Венеры, анализу свойств материалов авиационных конструкций в условиях гиперзвукового полёта и позволит осуществлять зондирование непосредственно в двигателях ракетных систем [15].

Преимущества GaN позволяют улучшить комплексные характеристики приёмных устройств. Возможность выдавать высокую мощность позволяет приёмнику выдерживать высокие показатели входной мощности без снижения усиления. Комбинация стойкости к высокой выходной мощности и низкого коэффициента шума позволяет оптимизировать характеристики МШУ и по минимизации коэффициента шума, и по

уровню интермодуляционных искажений 3-его порядка. В [16] представлены результаты проектирования и сравнение характеристик трёх различных маломощных усилителей (МШУ) для космического применения, которые функционируют в С-, Ku-, и Ka-диапазонах. МИС реализованы на 0,25 μm и 0,15 μm AlGaIn/GaN-технологии. Измеренные значения коэффициентов шума составили 1,2, 1,9 и 4,0 дБ для С-, Ku-, Ka-частотных диапазонов соответственно. Устойчивость МШУ к входному СВЧ сигналу была протестирована генераторами с уровнями 25 Вт, 6 Вт и 5 Вт для С-, Ku-, Ka-частотных диапазонов соответственно. Никакого уменьшения коэффициента усиления не наблюдалось.

В работе [17] представлены результаты посвящённые развитию основанной на нитриде галлия ЭКБ для X-диапазонных приёмопередающих модулей будущих поколений радаров с синтезированной апертурой (РСА). В частности, МИС мощных и маломощных усилителей были изготовлены с использованием процесса 0,25 μm GaN транзистора с высокой подвижностью электронов, предоставленного SELEX-SI (Италия) и обладающего удельной выходной мощностью 4 Вт/мм. Полученные результаты продемонстрировали высокие перспективы среднесрочного применения GaN в следующих поколениях РСА. Работа [17] проводилась в контексте основной научно-исследовательской деятельности спонсируемой Итальянским Космическим Агентством по внедрению новых технологий для РСА космического назначения. В результате представлены:

– МИС МШУ со следующими параметрами: $\Delta F = 8,6 - 10,6$ ГГц, $K_{УР} > 27$ дБ, $K_{ш} < 2,0$ дБ при $T_{ОКР} = 25$ °С, $\Delta K_{ш} = 0,018$ дБ/°С;

– МИС УМ со следующими параметрами: $\Delta F = 8,6 - 10,6$ ГГц, $K_{УР} > 20$ дБ, $P_{ВЫХ} = 12,5$ Вт, КПД = 40 % при $T_{ОКР} = 25$ °С (при этом особенно отмечено, что при моделировании необходимо учитывать эффект дисперсии тока, приводящий к повышению рабочего напряжения $U_{СИ}$ и, как следствие, к снижению КПД).

Первые европейские устройства на основе GaN были отправлены в космос в мае 2013 года в соответствии с проектом PROBA-V. Fraunhofer IAF – Институт прикладной физики твёрдого тела имени Фраунгофера (Фрайбург, Германия) разработал схему усилителя для диапазона

частот 8 – 8,5 ГГц (X-диапазон), Tesat-SpaceCom в сотрудничестве с SCHOTT Electronic Packaging установили GaN усилитель вместе с другими компонентами в герметичный корпус подходящий для космических применений. В связи с длительным сроком службы и радиационной стойкостью полупроводникового материала, такие электронные устройства идеально подходят для экстремальных условий, связанных с аэрокосмической отраслью. Перед космическими испытаниями нитрид-галлиевые МИС доказали свою устойчивость. Устройство было подвержено воздействию низких (до минус 100 °С) и высоких (до +150 °С) температур, вибрации и ударов, а также воздействиям α -, β - и γ -излучения и тяжелых заряженных частиц. Ресурсные испытания, проведённые Fraunhofer IAF совместно с Tesat-SpaceCom, показали, что разработанная МИС нитрид-галлиевого усилителя мощности обладает сроком безотказной работы не менее 20 лет. GaN устройства более компактны, меньше и легче, чем другие решения. Они могут даже заменить электронные лампы, в настоящее время использующиеся для усиления. Это позволит существенно сократить вес и транспортные расходы, которые могут составлять до 30 000 евро за килограмм полезной нагрузки [18]. Кооперационные связи разработчиков GaN усилителя для проекта PROBA-V представлены на рис. 1 [19].



Рис. 1

Цепь поставщиков GaN усилителя для PROBA-V

Полученные МИС требуют гораздо меньше активных систем охлаждения для работы и имеют возможность работать в широком диапазоне частот, пригодны для связи, формирования радиолокационных изображений и других приложений в диапазоне частот 1 - 100 ГГц. Привлекательным для применения в космическом пространстве является то, что GaN полупроводники являются радиационно-стойкими и их срок службы измеряется десятилетиями. Понимая свой потенциал, а также преследуя цели технической независимо-

сти от американских компаний, ESA собрал консорциум европейских компаний и исследовательских институтов для разработки цепочки поставок нитрида галлия, называемый GREAT2 и включающий следующие основные организации [20]:

SiCrystal AG – изготовитель SiC подложек;

EpiGaN – эпитаксиальный рост GaN гетероструктур;

Fraunhofer IAF – исследование GaN гетероструктур и проектирование МИС;

UMS – производитель GaN МИС;

TESAT Spacocom – корпуса для GaN МИС;

Thales Alenia Space, Planeese, EGIDE – разработка корпусов с повышенным тепловым рассеянием, разработка и производство модулей и блоков на основе GaN ЭКБ.

ОАО «НПП «Пульсар» за последние годы разработало ряд GaN HEMT и устройств на их основе [10]. Подавляющее большинство устройств успешно выдержали испытания, в том числе, в составе аппаратуры заказчика. В настоящее время проходят определительные испытания GaN технологии ОАО «НПП «Пульсар» к воздействию протонного и гамма-излучений, а также тяжёлых заряженных частиц.

Выводы

Анализ достижений нитрид-галлиевой технологии во всём мире показывает:

1. GaN-устройства на несколько порядков превосходят показатели по надёжности, линейности, удельной мощности и общей эффективности все существующие на сегодняшний день технологии, будь это GaAs, LDMOS или электровакуумные усилительные приборы.

2. GaN-технологии подтвердили в лётной эксплуатации стойкость к воздействию излучений космического пространства и, следовательно, могут быть использованы в аппаратуре различного назначения, таких как спутниковые системы зондирования Земли, связи и вещания, РЛС различного базирования, системы широкополосной мобильной связи.

Литература

1. C. Damian, D. Gelerman. A new generation of Gallium Nitride (GaN) based Solid State Power Amplifiers for Satellite Communication // Copyright Advantech Wireless Inc., 2012.

2. Лаврентьев М. Новое поколение твердотельных усилителей мощности GaN HEMT в системах спутниковой связи и вещания /

М. Лаврентьев, Д. Галерман // Первая миля. – 2013. – № 2. – С. 18-22.

3. D. Krausse, et al. Robust GaN HEMT Low-Noise Amplifier MMICs for X-band Applications // Proceedings of the 12th GAAS Symposium, Amsterdam, 2004.

4. S. Cha, et al. Wideband AlGaIn/GaN HEMT Low Noise Amplifier For Highly Survivable Receiver Electronics // IEEE MTT-S Digest 2004.

5. J. C. de Jaeger, et al. Noise Assessment on AlGaIn/GaN HEMTs on Si or SiC substrates: Application to X-band Low Noise Amplifiers // Proceedings of the 13th GAAS Symposium, Paris, 2005.

6. M. Rudolph, et al. Analysis of the survivability of GaN Low-noise Amplifiers // IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques. – Vol. 55. – January 2007.

7. M. Micovic, et al. Robust Broadband (4-16GHz) GaN MMIC LNA // Proceedings of the CSICS 2007.

8. J. P. B. Janssen, et al. X-band AlGaIn/GaN MMICs with over 41 dBm Power Handling // Proceedings of the CSICS 2008.

9. M. Rudolph, et al. Highly Rugged 30 GHz GaN Low-Noise Amplifiers // IEEE Microwaves Wireless Components Lett. – Vol. 19. – No. 4. – Apr. 2009.

10. Груздов В. В. СВЧ электроника на основе нитрида галлия – основное направление создания радиоэлектронных систем / В. В. Груздов, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – Вып. 2 (231). – С. 88-101.

11. Mikko Nikulainen. The development of EEE components for future space projects // EESA, February 2010.

12. Semiconductors in space: the final frontier. – URL: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca> (дата обращения: 08.08.2008).

13. D. Majumdar. GaN Revolution. – URL: <http://www.defensenews.com> (дата обращения: 28.02.2011).

14. Matthew LaRue. High Power Transmitter Technologies for Ultra Wideband Multi-Function RF Operation. – URL: <http://www.nasa.gov> (дата обращения: 03.05.2014).

15. Caitlin Chapin. Micro-Scale Gallium Nitride Pressure Sensors for Advanced Harsh Environment Space Technology. – URL: <http://www.nasa.gov>. (дата обращения: 05.03.2014).

16. E. M. Suijker, M. Rodenburg, J. A. Hoogland, M. van Heijningen, M. Seelmann-Eggebert, R. Quay, P. Brückner, F.E. van Vliet. Robust AlGaIn/GaN Low Noise Amplifier MMICs for C-, Ku- and Ka-band Space Applications // Proceedings of the CSICS 2009. – P. 129-132.

17. A. Barigelli, W. Ciccognani, S. Colangeli and other. Development of GaN based MMIC for next generation X-Band space SAR T/R module // Proceedings of the 7th European Microwave Integrated Circuits Conference, 29 - 30 Oct 2012, Amsterdam. – P. 369-372.

18. New semiconductor technology flies into space. – URL: <http://www.iaf.fraunhofer.de> (дата обращения: 11.08.2013).

19. Proba-V debuts new semiconductor technology for space. – URL: <http://www.esa.int> (дата обращения: 03.05.2013).

20. A. R. Barnes, F. Vitobello. GaN component technology development in Europe – current status and perspectives // Proceedings of the ESCCON 2013, 12-14 March, 2013.