

УДК 004.074

А. И. СЕМЕНКО, доктор техн. наук, профессор,
Государственный университет телекоммуникаций, Киев;

Б. Н. СЕВЕРГИН,

ООО «Телекомсвязьсервис», Киев;

А. А. ШОКОТЬКО,

компания VICS, Киев;

В. Ф. ЗАЙКА, канд. воен. наук, доцент,

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ СВЧ НА ОСНОВЕ НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Обоснованы преимущества СВЧ усилителей мощности на основе нитрид-галлиевых транзисторов. Приведены характеристики разработанных усилителей мощности С и Ku диапазонов.

Ключевые слова: нитрид галлия; транзистор; интегральная микросхема; усилитель мощности; коэффициент усиления; диапазон частот.

Твердотельные СВЧ усилители мощности являются важным звеном аппаратуры в телекоммуникациях, определяющим главные параметры системы: потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габаритные размеры и массу, долговечность, надежность и стоимость.

Революционным достижением в развитии мощных компонентов СВЧ стало появление широкозонных полупроводниковых материалов, таких как карбид кремния SiC, и нитрид галлия GaN, а также приборов на их основе (табл. 1) [1–5]. Сегодня ведущие компании мира по производству компонентов, применяемых в твердотельных усилителях мощности, развивают прежде всего технологии на основе нитрида галлия GaN.

Совершенствование GaN-устройств на основе GaN-on-SiC HEMT технологии идет в следующих направлениях: увеличение максимальных мощностей, плотности мощности, максимального напряжения, а также верхнего диапазона сверхвысоких частот (перспективные разработки направлены на достижение С, X, Ku диапазонов длин волн); уменьшение стоимости до уровня один доллар за один ватт, повышение надежности, радиационной стойкости с одновременным уменьшением габаритных размеров изделий [2; 3].

Чем больше ширина запрещенной зоны, тем выше допустимая рабочая температура и тем больше сдвинут в коротковолновую область спектр рабочего диапазона частот приборов.

Подвижность носителей тока в значительной мере определяет частотные характеристики полупроводниковых приборов.

Для создания приборов СВЧ применяются полупроводниковые материалы, обладающие высокими значениями подвижности носителей заряда и способные работать при высоких температурах и высоком уровне радиации, что очень важно для космической промышленности.

Все еще проблемными, но постепенно решаемыми задачами GaN-технологии остаются, во-первых, обеспечение теплоотвода от активной структуры кристалла, а во-вторых, выращивание эпитаксиальных структур GaN.

Высокая плотность мощности СВЧ транзисторов, выполненных по GaN-технологии, позволяет существенно уменьшить габаритные размеры и массу твердотельного усилителя.

Коэффициент теплопроводности материала GaN в 8-10 раз выше, чем у GaAs, что позволяет обеспечить лучший и быстрый отвод теплоты от чипа MMIC, а также более высокую плотность мощности [2].

Твердотельные усилители и другие изделия на базе GaN-технологии открывают широкие перспективы для разработки новейших устройств и модернизации уже работающих изделий в важных частотных диапазонах 1...4; 2...6; 6...18; 2...20 ГГц, которые смогут конкурировать с ламповыми приборами СВЧ по выходной мощности, КПД, габаритным размерам, надежности и цене.

GaN-технология постепенно занимает свое место на рынке военных и космических систем и сможет заменить часть GaAs MMIC продуктов в приемопередающих модулях АФАР сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Таблица 1

Электронные свойства полупроводниковых материалов Si, GaAs, InP, 3-4-6H-SiC, GaN

Характеристика	Si	GaAs (AlGaAs/InGaAs)	InP (InAlAs/InGaAs)	3C-SiC*	4H-SiC*	6H-SiC*	GaN (AlGaN/GaN)
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ, при 300 К	1,12	1,42	1,34	2,4	3,26	3	3,39
Подвижность электронов I_n , см ² /(В·с), при 300 К	150	8500	4600	1000	950	500	2000
Критическое электрическое поле E_c , МВ/см, при 300 К	0,02	0,4	0,5	2,0	2,2	2,5	5,0
Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К), при 300 К	1,5	0,55	0,7	3,0...4,0	3,0...4,0	3,0...4,0	1,3
Диэлектрическая проницаемость ϵ	11,6	12,8	12,5	9,7	10	10	9,5
CFoM**	1	8,5	21	–	250	–	660

*3C, 4H, 6H — предполагаемые кристаллические структуры SiC материалов.

**CFoM (Combined Figure of Merit) — коэффициент качества материала по отношению к кремнию (Si — Silicon) для мощности и частоты.

Лидером в производстве СВЧ усилителей на основе GaN-технологии является компания **Sumitomo**, созданная в 1897 году.

В настоящее время компания Sumitomo производит следующую продукцию:

- транзисторы GaNHEMTs — для базовых станций, радаров и общего применения;
- монолитные малошумящие интегральные схемы Ku и V диапазонов, мощные интегральные схемы C и V диапазонов;
- мощные усилители GaN на палетах и MMICs;
- конвертеры Ku и Ka диапазонов;
- мультиплексоры Ku и V диапазонов;
- генераторы с широким динамическим диапазоном;
- транзисторы GaAs FETs — большой мощности, мощные и маломощные.

Усилители мощности СВЧ на основе GaN транзисторов имеют существенные преимущества по сравнению с GaAs транзисторами (табл. 2), прежде всего по КПД, выходной мощности, коэффициенту усиления, напряжению питания (до 40 В), предельной температуре кристалла. При этом упрощается конструкция усилителей, уменьшаются габаритные размеры и масса (рис. 1).

Для изготовления усилителей СВЧ авторами использован GaN транзистор **TGF2023-01** [6].

По S-параметрам, представленным на сайте фирмы-производителя, и по параметрам эквивалентной схемы TGF2023-01 были проведены расчеты согласующих цепей при помощи программы Microwave Office.

Таблица 2

Энергетические характеристики усилителей С-диапазона

Технология	Выходная мощность, Вт	Потребляемая мощность, Вт	КПД, %
GaAs	2	33	6
GaAs	5	48	10,4
GaN	2	17	11,8
GaN	5	24	20,8

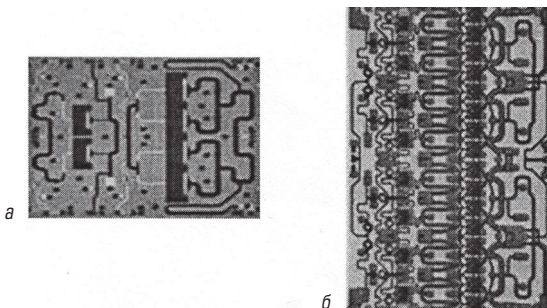


Рис. 1. Конструкция MMIC усилителей:

a – GaN 10 ГГц/40 Вт (18 мм²); **б** – GaAs 10 ГГц/20 Вт (41 мм²)

На основании проведенных расчетов были изготовлены усилители в гибридно-интегральном исполнении. На основании из сплава медь-молибден напаяны платы из поликора толщиной 0,5 мм с входной и выходной согласующими цепями. Между ними установлен кристалл транзистора согласно рекомендации фирмы-производителя на паяльную пасту (золото — 80%, олово — 20%) при температуре 280...300 К. Кристалл транзистора соединен с платами методом сварки золотой проволокой диаметром 25 мкм.

Тестовая плата с усилителем на транзисторе TGF2023-01 изображена на рис. 2. Параметры усилителя: напряжение на стоке транзистора $U_c = 28$ В; ток стока $I_{c,нач} = 0,125$ мА, коэффициент усиления $K_{у,лин} = 15$ дБ, выходная мощность $P_{ВЫХ} = 4,5$ Вт; коэффициент полезного действия КПД = 55%; диапазон частот $f = 5,8...7,2$ ГГц.

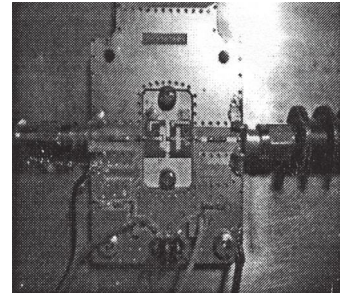


Рис. 2. Усилитель на транзисторе TGF2023-01

Измеренная амплитудно-частотная характеристика усилителя приведена на рис. 3.

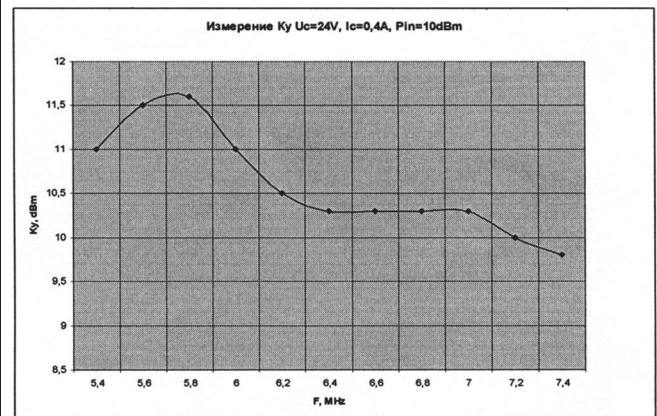


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика усилителя с выходной мощностью $P_{ВЫХ} = 25 \dots 30$ Вт

Параметры усилителей на основе транзистора TGF2023-01 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры усилителей на транзисторе TGF2023-01 ($U_c = 28$ В, $I_c = 0,125$ мА для Ku 0,250 МА)

Диапазон частот	C-band 5,8...7,2 ГГц	X-band 7,9...8,4 ГГц	Ku-band (01x2) 13,75...14,5 ГГц
Коэффициент усиления (линейный режим), дБ	14	13	9
Выходная мощность, дБм	36 ($I_c = 0,250$ МА)	36 ($I_c = 0,250$ МА)	38 ($I_c = 0,250$ МА)

Освоенная технология позволила разработать на основе GaN усилители мощности СВЧ C и Ku диапазонов (табл. 4 и 5) [6].

Внешний вид усилителя мощности диапазона 29...31 ГГц с выходной мощностью 4 Вт при КПД 5,5% иллюстрирует рис. 4.

Разработанные усилители на GaN транзисторах были использованы в качестве выходных каскадов в передатчиках станций спутниковой связи VSAT с выходной мощностью $P_{ВЫХ} = 20$ Вт (рис. 5). Мощность, потребляемая блоком передатчика, составила 75 Вт.

Таблиця 4

Усилители мощности СВЧ на основе нитрид-галлиевых транзисторов S диапазона

Модель	Диапазон рабочих частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Потребляемая мощность, Вт	КПД, %
C-band 2	5,85...7,025	2	16	12,5
C-band 5	5,85...7,025	4	26	19
C-band 10	5,85...7,025	6	50	20
C-band 20	5,85...7,025	8	75	26
C-band 40	5,85...7,025	25	134	29,8

Таблиця 5

Усилители мощности СВЧ на основе нитрид-галлиевых транзисторов Ku диапазона

Модель	Диапазон рабочих частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Потребляемая мощность, Вт	КПД, %
Ku-band 2	13,75...14,5	2	19	10
Ku-band 4	13,75...14,5	4	30	13,3
Ku-band 6	13,75...14,5	6	42	14,2
Ku-band 8	13,75...14,5	8	50	16
Ku-band 25	13,75...14,5	25	230	10,08
Ku-band 40	13,75...14,5	40	280	14,2

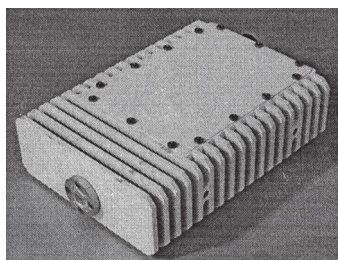


Рис. 4. Внешний вид усилителя мощности диапазона 29...31 ГГц с выходной мощностью 4 Вт при КПД 5,5%

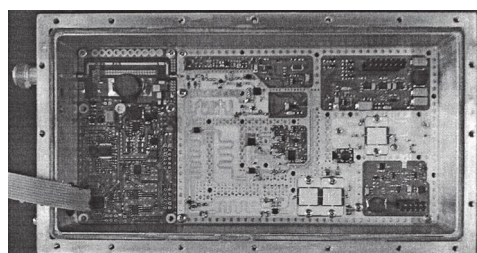


Рис. 5. Передатчик станции спутниковой связи VSAT

Выводы

1. Применение нитрид-галлиевых транзисторов позволяет создавать усилители мощности СВЧ с увеличенными по сравнению с усилителями на основе арсенид-галлиевых транзисторов параметрами, такими как максимальная мощность, максимальное напряжение питания, верхним диапазоном сверхвысоких частот (перспективные разработки направлены на достижение S, X, Ku диапазонов длин волн), надежность, радиационная стойкость. При этом достигается уменьшение габаритных размеров, а также стоимости изделий до уровня один доллар за один ватт.

2. Разработанные усилители мощности S и Ku диапазонов на основе нитрид-галлиевых транзисторов целесообразно использовать в станциях спутниковой связи VSAT, станциях радиорелейной связи, радаров и другой аппаратуре для улучшения ее электрических и эксплуатационных характеристик.

Литература

1. **Майская, А.** Высоочастотные полупроводниковые приборы. Не кремнием и арсенидом галлием единым / А. Майская // Электроника-НТБ.— 2004.— №8.— С. 16–21.
2. **Фармикоун, Г.** Технология мощных СВЧ LDMOS транзисторов для радарных передатчиков L диапазона и авиационных применений / Г. Фармикоун // Компоненты и технологии.— 2007.— №10.— С. 17–21.
3. **Викулов, И.** GaN-микросхемы приемопередающих модулей АФАР: Европейские разработки / И. Викулов // Электроника-НТБ.— 2009.— №7.— С. 90–96.
4. **Кицинский, А.** Твердотельные СВЧ усилители мощности на нитрид-галлия — состояния и перспектива развития / А. Кицинский // Материалы 16-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь: Вебер, 2009.— С. 11–16.
5. **Charles, F.** Campbell and Mathew Roulten. Compact Highly Integrated X-band Power Amplifier Using Commercially Available Discrete GaN FETs Triquint Semiconductor Defense and Aerospace Busines Unit 500 West Renner Road Richardson, Tx 75080 / F. Charles.— United States.
6. **Усилитель** мощности диапазона с выходной мощностью 1 ватт для наземной станции спутниковой системы связи / [Б. Н. Севергин, И. В. Яковлев, П. А. Яцык, А. Н. Балаба] // Материалы 14-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2005.— С. 137–138.

А. І. Семенко, Б. М. Севергін, А. А. Шокотько, В. Ф. Заїка

ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ НВЧ НА ОСНОВІ НІТРИД-ГАЛІЄВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Обґрунтовано переваги НВЧ підсилювачів потужності на основі нітрид-галієвих транзисторів. Наведено характеристики розроблених підсилювачів потужності S та Ku діапазонів.

Ключові слова: нітрид галію; транзистор; інтегральна мікросхема; підсилювач потужності; коефіцієнт підсилення; діапазон частот.

A. I. Semenko, B. N. Severgyn, A. A. Shokotko, V. F. Zaika

MICROWAVE POWER AMPLIFIERS BASED ON THE NITRIDE-GALLIUM TRANSISTORS

The advantages of microwave power amplifiers based on the nitride-gallium transistors are shown. Specifications of developed power amplifiers of S and Ku-bands are given.

Keywords: gallium nitride; transistor; integral microcircuit; power amplifier; gain; frequency band.