

Усилители мощности S-диапазона частот на основе нитрид галлиевых транзисторов АО «ПКК Миландр»

С.В. Тарасов^{1,2}, М.М. Полуни¹, Д.В. Колесников¹, Г.И. Глушков¹, Е.Н. Бормонтов²

¹АО «ПКК Миландр», г. Москва, Зеленоград, Россия

²ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж, Россия, tarasov.s@milandr.ru

Аннотация — В работе представлены результаты разработки усилителей мощности непрерывного режима работы с рабочим напряжением питания 50 В на основе СВЧ нитрид галлиевых транзисторов компании АО «ПКК Миландр». Полученные результаты подтверждают, что разработанные транзисторы и усилители мощности на их основе не уступают импортным аналогам, и могут быть предложены отечественным компаниям и производителям радиоэлектронной аппаратуры в рамках импортозамещения.

Ключевые слова — нитрид галлия, СВЧ транзистор, непрерывный режим работы, S-диапазон усилитель мощности.

I. ВВЕДЕНИЕ

Транзисторы на основе широкозонных гетероструктур AlGaIn/GaN (HEMT) увеличивают область применения в мощных передающих СВЧ устройствах, ввиду их очевидных преимуществ перед узкозонными полупроводниками. Основное преимущество — высокая удельная мощность (> 10 Вт/мм в X-диапазоне и до 30 Вт/мм в лабораторных образцах), что на порядок превышает удельную выходную мощность GaAs транзисторов [1]. Среди других преимуществ GaN изделий более широкая полоса рабочих частот и высокий коэффициент полезного действия стока. Большинство компаний изготавливают GaN HEMT на подложках карбида кремния с затворами длиной 0,25 мкм (для приборов с рабочей частотой до 16 ГГц) и 0,45 мкм (для приборов с рабочей частотой до 6 ГГц).

II. СВЧ GAN ТРАНЗИСТОРЫ

В рамках внутренней работы разрабатывается серия мощных СВЧ GaN транзисторов с рабочим напряжением питания 50 В. Основная цель заключается в разработке и производстве СВЧ GaN транзисторов и устройств на их основе для L-, S-, C-диапазонов частот, которые по своим техническим характеристикам не уступали бы импортным аналогам от известных мировых производителей СВЧ GaN HEMT (Wolfspeed, Qorvo, Ampleon, Integra, Sumitomo, Microsemi, AMCOM).

Для L-диапазона частот изготовлены макетные образцы транзисторов с выходной импульсной

мощностью 5 Вт, 10 Вт, 25 Вт, 50 Вт, 70 Вт, 100 Вт, 120 Вт, 150 Вт, 200 Вт, 250 Вт, 500 Вт, 600 Вт, 1000 Вт и 1200 Вт. Данные транзисторы предназначены для замены импортных транзисторов таких компаний как Integra, Qorvo, Wolfspeed, Ampleon, Microsemi. Для каждого типа транзистора будет разработан и изготовлен тестовый усилитель мощности, что позволит потенциальным заказчикам и потребителям сократить время разработки и перейти к опробованию транзисторов в составе своей аппаратуры. Уже сейчас специалистами нашей компании подготовлен к отправке отечественному потребителю 25 Вт тестовый усилитель мощности для диапазона частот 3.4...3.8 ГГц.

Для S-диапазона частот разработана также широкая номенклатура СВЧ GaN транзисторов с улучшенными тактико-техническими характеристиками для отечественных изделий. Выходная импульсная мощность составит от 5 Вт до 1000 Вт. Данные приборы будут способствовать производству как преусилителей, так и самих усилителей мощности, не прибегая к использованию импортных комплектующих.

Для C-диапазона частот подготовлена линейка СВЧ GaN транзисторов, которые в том числе будут применяться для создания отечественного оборудования сетей 5G.

III. ТЕСТОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Разработки усилителей мощности на основе СВЧ GaN транзисторов с рабочим напряжением 50 В для S-диапазона частот являются продолжением исследовательских работ, проводимых нашей компанией [2]. Для проверки соответствия транзисторов требованиям технического задания были разработаны узкополосные тестовые усилители мощности на частоту 3.1 ГГц, работающие в непрерывном режиме. Процесс разработки усилителей можно разбить на три основных этапа:

1. разработка схемы включения и формирования смещения;
2. разработка согласующих цепей;
3. проверка стабильности усилителя мощности.

А. Разработка схемы смещения

Усилительные ТВПЭ на основе нитрида галлия требуют температурно-скомпенсированной схемы формирования смещения на затворе, для обеспечения стабильного тока покоя стока. Однако ТВПЭ на основе нитрида галлия являются приборами, работающими в режиме обеднения, что накладывает особые, требования на последовательность действий при их включении и выключении. Канал сток-исток у данных приборов открыт при нулевом напряжении смещения (или его отсутствии) на затворе прибора. Кроме этого, необходимо учитывать, что ТВПЭ на основе нитрида галлия могут быть потенциально нестабильны при малых напряжениях сток-исток, вследствие чего необходимо предусмотреть дополнительную защиту от включения пониженного напряжения питания стока.

Разработанная схема формирования смещения затвора и включения питания стока состоит из следующих функциональных узлов:

1. Понижающий линейный преобразователь на микросхеме LT3010-5 Analog Devices.
2. Блок источника отрицательного относительно потенциала «земли» напряжения на микросхеме LTC1261 Analog Devices.
3. Блок формирования температурно-компенсированного напряжения смещения затвора. Для компенсации используется температурная зависимость прямого падения напряжения на двух кремниевых диодах BAS321 Nexperia. Между затвором и схемой включен ФНЧ для развязки СВЧ-сигнала и схемы смещения.
4. Блок включения питания стока (на ключевом транзисторе IRFR5410 Infineon). В цепь блока включения питания стока также включен стабилитрон (на рисунке условно не указан), предотвращающий включение схемы в случае пониженного напряжения.

Схема электрическая принципиальная разработанного блока формирования смещения представлена на рис. 1. Между блоком формирования температурно-компенсированного напряжения и затвором транзистора стоит RC-фильтр нижних частот, развязывающий СВЧ сигнал возбуждения транзистора от цепи формирования смещения.

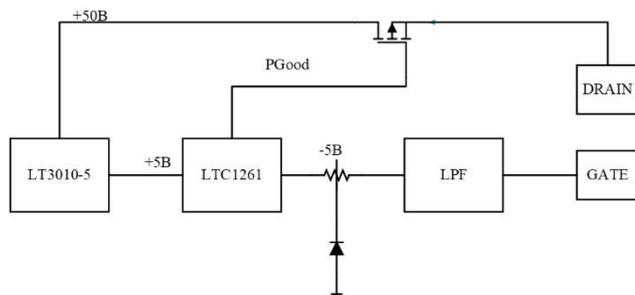


Рис. 1. Схема формирования смещения ТВПЭ на основе нитрида галлия

В. Разработка согласующих цепей

Согласующие цепи по входу и по выходу разрабатывались на основе данных, полученных в ходе load-pull тестирования в импульсном режиме (как показал этап регулировки усилителя, эти данные могут быть применены для разработки усилителя непрерывного режима с минимальной последующей подстройкой).

Так как, согласно требованиям ТЗ, данные усилители являются узкополосными, то в качестве выходных согласующих цепей были применены простые Т-образные звенья на микрополосковых линиях. Во входной согласующей цепи центральное звено Т-образной цепочки было заменено на подстроечный конденсатор. [3]

Входная согласующая цепь рассчитывалась таким образом, чтобы обеспечить минимальный КСВн по входу и, соответственно, максимальный уровень сигнала возбуждения на затворе транзистора. Также, во входной согласующей цепи были предусмотрены посадочные площадки для демпфирующей RC-цепи, предотвращающей выход усилителя в режим самовозбуждения. [4]

Характеристический импеданс для расчета выходной согласующей цепи выбирался на основе пересекающихся контуров постоянной мощности и контуров постоянного КПД транзистора, с требованием обеспечить максимально возможную выходную мощность усилителя в режиме насыщения и КПД не менее 50% на номинальной выходной мощности.

Расчет прототипов согласующих цепей на идеальных линиях передачи и расчет микрополосковых элементов производился в САПР PathWave ADS. Схемотехнический расчет верифицировался расчетом электромагнитного поля согласующих цепей методом конечных элементов.



Рис. 2. Рендер усилителя MLDR196 5N1M1

Согласующие цепи и схема формирования смещения реализованы на подложке RO4003C фирмы Rogers Corp. толщиной 0.508 мм (20 мил), для улучшения электротермоинтерфейса припаянной к радиатору (алюминий с гальваническим покрытием О-Ви). На этапе настройки усилителей подбирались номиналы емкости и сопротивления демпфирующей цепи по входу, для обеспечения стабильности усилителя при всех возможных уровнях сигнала

возбуждения на входе. Рендер 5 Вт усилителя мощности представлен на рис. 2.

С. Настройка и проверка стабильности усилителей мощности

Настройка и регулировка усилителей проводились с использованием векторного анализатора цепей (анализ КСВн по входу, коэффициента передачи и выходной мощности) и спектроанализатора (контроль стабильности усилителя и отсутствие паразитных спектральных компонент выходного сигнала, обусловленных самовозбуждением).

Обеспечение стабильности производилось подбором номиналов демфирующей RC-цепочки по входу усилителя, так, чтобы, с одной стороны, обеспечить отсутствие самовозбуждения во всем диапазоне сигналов возбуждения усилителя, с другой стороны, оказать минимальное влияние на величину коэффициента передачи.

График зависимости КПД от выходной мощности для усилителя с номинальной мощностью 5 Вт представлен на рис. 3. Мощность снималась до достижения мощности насыщения. Коэффициент усиления на малом сигнале для данного усилителя составляет 19.2 дБ.

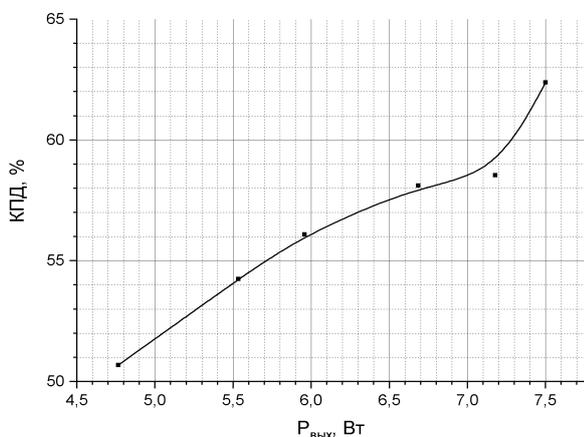


Рис. 3. Зависимость КПД от выходной мощности для усилителя MLDR196 5N1M2 3.1 ГГц в CW режиме

Измерения коэффициента полезного действия стока и выходной мощности в импульсном режиме 10 Вт СВЧ GaN транзистора на частоте 3 ГГц при помощи автоматических Load&Pull тюнеров представлены на рис. 4 и рис. 5. График для усилителя с номинальной мощностью 10 Вт в непрерывном режиме на частоте 3.1 ГГц представлен на рис. 6. Коэффициент усиления на малом сигнале составляет 18.5 дБ. Рендер 10 Вт усилителя мощности представлен на рис. 7.

Измерения коэффициента полезного действия стока и выходной мощности в импульсном режиме 25 Вт СВЧ GaN транзистора на частоте 3 ГГц при помощи автоматических Load&Pull тюнеров представлены на рис. 8 и рис. 9. График для усилителя с номинальной мощностью 25 Вт в непрерывном режиме представлен на рис. 10. Коэффициент усиления на малом сигнале

составляет 17.7 дБ. Рендер 25 Вт усилителя мощности представлен на рис. 11.

Как видно из представленных рисунков, мощность усилителей в насыщении по мощности для приборов 5 Вт и 10 Вт на 50% превышает номинальные значения (7.5 Вт и 15.6 Вт, соответственно) и более чем на 25% превышает номинальное значение (31.5 Вт) для прибора 25 Вт, при сохранении КПД не хуже 50% на номинальном значении мощности.

По результатам включения усилителей в непрерывном режиме так же было выяснено, что падение мощности относительно импульсного режима работы составляет 0.5 дБ.

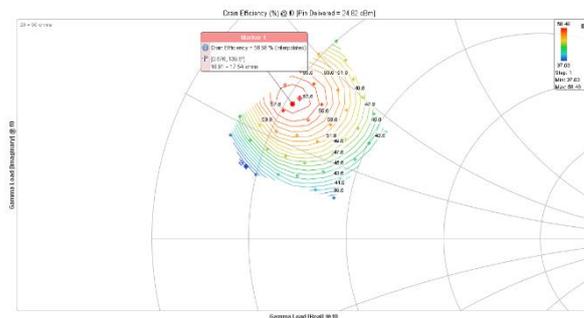


Рис. 4. Измерения коэффициента полезного действия стока 10 Вт СВЧ GaN транзистора в импульсном режиме на частоте 3 ГГц

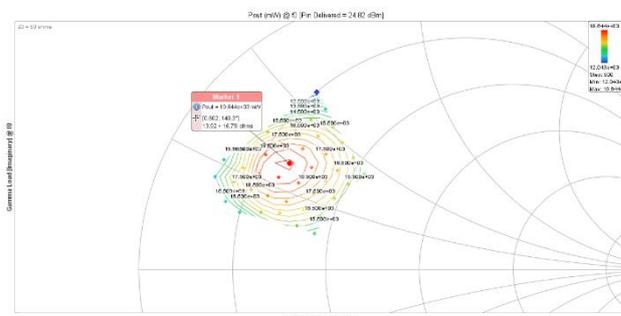


Рис. 5. Измерения выходной мощности 10 Вт СВЧ GaN транзистора в импульсном режиме на частоте 3 ГГц

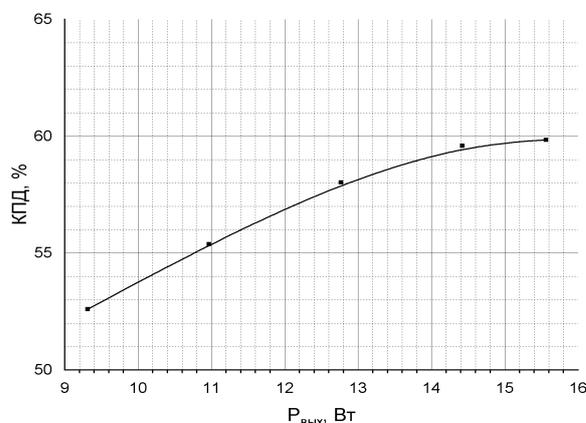


Рис. 6. Зависимость КПД от выходной мощности для усилителя MLDR196 10N1M2 3.1 ГГц в CW режиме

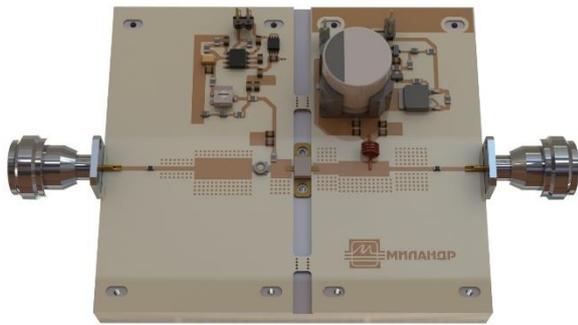


Рис. 7. Рендер усилителя MLDR196 10N1M2

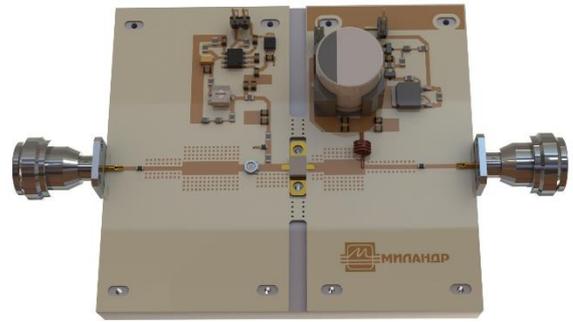


Рис. 11. Рендер усилителя MLDR196 25N1M1

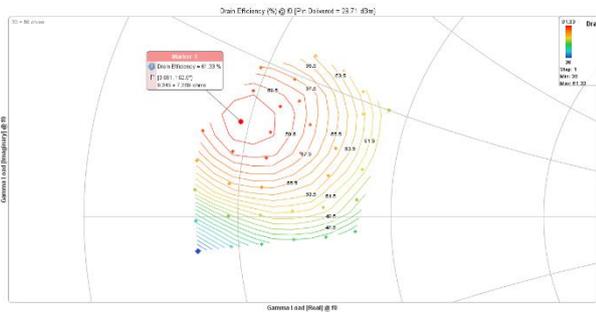


Рис. 8. Измерения коэффициента полезного действия стока 25 Вт СВЧ GaN транзистора в импульсном режиме на частоте 3 ГГц

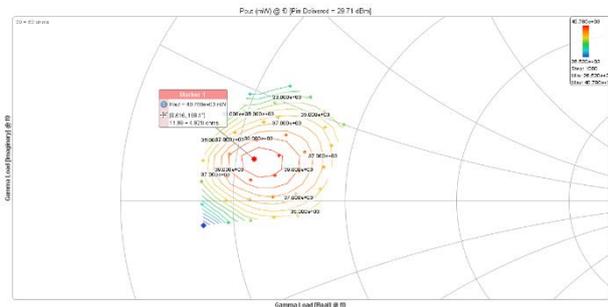


Рис. 9. Измерения выходной мощности 25 Вт СВЧ GaN транзистора в импульсном режиме на частоте 3 ГГц

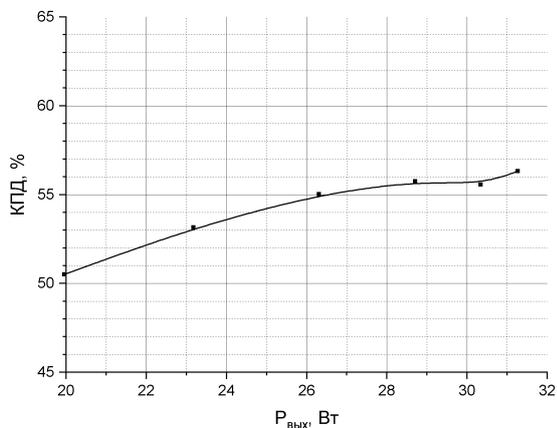


Рис. 10. Зависимость КПД от выходной мощности для усилителя MLDR196 25N1M1 3.1 ГГц в CW режиме

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из полученных результатов, разработанные СВЧ GaN транзисторы и усилители мощности, реализованные на их основе, по своим параметрам (выходная мощность, коэффициент усиления по мощности и коэффициент полезного действия стока) находятся на уровне лучших мировых аналогов. Разработанные изделия могут найти свое применение как в гражданском сегменте рынка, так и в аппаратуре специального назначения.

Следующим этапом развития серии усилителей мощности станет разработка и изготовление 100 Вт УМ S-диапазона и 600 Вт и 1200 Вт УМ для L-диапазона частот.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] AlGaIn/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников. — №43., Выпуск 4. — 2009. — с. с. 561 - 567.
- [2] ВОЗМОЖНА ЛИ ЗАМЕНА ИМПОРТНЫХ СВЧ GAN-ТРАНЗИСТОРОВ ОТ ИЗВЕСТНЫХ МИРОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ АНАЛОГИ?// ЭЛЕКТРОНИКА: НАУКА, ТЕХНОЛОГИЯ, БИЗНЕС. №10(201), 2020. С. 100-105
- [3] Andrei Grebennikov, RF and microwave power amplifier design, McGraw-Hill, 2005.
- [4] Steve C. Cripps, RF power amplifiers for wireless communication, Artech house, 2006.

S-band Power Amplifiers Based on GaN Transistors of JSC «ICC Milandr»

S.V. Tarasov^{1,2}, M.M. Polunin¹, D.V. Kolesnikov¹, G.I. Glushkov¹, E.N. Bormontov²

¹JSC «ICC Milandr», Zelenograd, Moscow, Russia

²Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Voronezh State University», Voronezh, Russia, tarasov.s@milandr.ru

Abstract — Article presents the results of development of continuous mode power amplifiers with 50 V operating supply voltage based on nitride of gallium microwave transistors of JSC «ICC Milandr». The obtained results confirm that the developed transistors and power amplifiers based on them are not inferior to imported analogues, and can be offered to domestic companies and manufacturers of electronic equipment as part of import substitution. The results of measurements of power amplifiers in continuous mode at frequency 3.1 GHz are given.

Keywords — gallium nitride, UHF transistor, CW-mode, power amplifier for S-band.

REFERENCES

[1] AlGaIn/GaN-SVCH HEMT-tranzistory s probivnym napryazheniem vyshе 100 V i s predel'noi chastotoi ysileniya po moshnosti fmax do 100 GGz (AlGaIn/GaN-UHF HEMT

transistors with a breakdown voltage above 100 V and with a power gain limit of f_{max} up to 100 GHz).// *Phizika i tehnika polyprovodnikov*. 2009. №4, vypusk 4. S. 561-567

[2] VOZMOZHNA LI ZAMENA IMPORTNYH SVCH GAN-TRANZISTOROV OT IZVESTNYH MIROVYH PROIZVODITELEI NA OTECHESTVENNYE ANALOGI? (IS IT POSSIBLE TO REPLACE IMPORTED GAN MICROWAVE TRANSISTORS FROM WELL-KNOWN WORLD MANUFACTURERS WITH DOMESTIC ANALOGUES?) TARASOV S., KOLESNIKOV D. GLUSHKOV G., POLUNIN M., RYABYKIN S., TKACHEV A.. *ELECTRONICA: NAUKA, TEHNOLOGIYA, BIZNESS*. №10(201). 2020. S. 100-105.

[3] Andrei Grebennikov, RF and microwave power amplifier design, McGraw-Hill, 2005.

[4] Steve C. Cripps, RF power amplifiers for wireless communication, Artech house, 2006.