

## Фазостабильный 200-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона

**Борисов О. В., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Редька Ал. В., Ушаков А. В.**

Представлены результаты проектирования и изготовления мощного твердотельного импульсного усилителя мощности на GaN транзисторах. Приведены результаты теплового моделирования СВЧ модуля. Усилитель мощности имеет внутренний 5-разрядный цифровой аттенюатор, устройство отключения по температуре. Полоса рабочих частот  $\Delta F = 9,0-10,0$  ГГц, коэффициент усиления  $K_{ур} \geq 30$  дБ, фазовая нестабильность  $\Delta\Phi \leq \pm 5$  град, выходная импульсная мощность  $P_{зdB} = 200$  Вт при длительности импульса  $\tau = 25...250$  мкс и скважности  $Q \geq 4$ .

### Введение

Твердотельные СВЧ усилители мощности на основе транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) во многих радиотехнических системах определяют их важнейшие тактико-технические характеристики, такие как излучаемую и потребляемую мощности, ширину полосы рабочих частот, габариты, массу, надёжность [1]. Вследствие того, что транзисторы из нитрида галлия могут работать при более высоких температурах и напряжениях, чем транзисторы из арсенида галлия, они являются более привлекательными для применения в усилителях мощности СВЧ. В то время как GaAs транзисторы имеют удельную плотность мощности около  $P_{\text{вых уд}} \sim 1,5$  Вт/мм, серийно выпускаемые GaN HEMT обладают  $P_{\text{вых уд}} = 5-12$  Вт/мм [2]. Эти преимущества при работе устройств в импульсном режиме проявляются тем сильнее, чем короче длительность импульса и больше скважность [3].

СВЧ транзисторы на нитриде галлия могут работать при повышенных рабочих напряжениях (порядка 50 В и более) и при повышенной температуре окружающей среды (температура рабочей области транзистора может повышаться до 300 °С). Это позволяет поднять выходную мощность транзисторов на порядок и обеспечить температурный режим их работы в модуле СВЧ передатчика без сложных систем охлаждения. Исследования ФГУП «НПП «Пульсар» показали, что использование импульсного режима питания GaN HEMT позволяет при сохранении параметров надёжности повысить рабочие напряжения питания и выходную мощность. Эти преимущества GaN транзисторов при работе устройств в импульсном режиме проявляются тем сильнее, чем короче длительность импульса и больше скважность [3].

За последние 10 лет развития GaN технология стала предпочтительной технологией для всех новых радиоэлектронных изделий СВЧ и миллиметрового диапазонов, включая радары, спутниковые и сотовые системы связи, устройства радиоэлектронной борьбы. Кроме того, GaN усилители начинают заменять лампы бегущей волны (ЛБВ) в радарх и передатчиках с выходными уровнями мощности до единиц киловатт [2].

### Постановка задачи

Разрабатываемый усилитель мощности предназначен для применения в качестве выходного усилителя мощности СВЧ передающего тракта и должен иметь следующие технические характеристики: диапазон частот 9,0-10,0 ГГц; выходную импульсную мощность 100-200 Вт; длительность импульса 25-250 мкс; минимальную скважность 4; входную мощность 70-200 мВт; неравномерность коэффициента усиления  $\pm 2$  дБ; полосу частот сигнала 6-100 МГц; виды сигнала АИМ, ЛЧМ, ФКМ; неравномерность

разности фаз внутри радиоимпульса не более  $20^\circ$ ; глубину регулировки выходной мощности не менее 20 дБ.

Управление аттенюатором, модулятором и усилителем в целом производится по согласованному протоколу связи.

### Структурная схема, выбор элементной базы

Отсутствие серийно выпускаемых внутрисогласованных СВЧ транзисторов требуемого диапазона частот и уровня выходной мощности потребовало проведения анализа ЭБ, последующего моделирования каскадов и выбора структурной схемы усилителя мощности. В качестве активных элементов при проектировании внутрисогласованных СВЧ транзисторов использованы кристаллы GaN транзисторов с шириной затвора  $W_{31} = 5$  мм,  $W_{32} = 10$  мм,  $W_{33} = 20$  мм. Предварительный схемотехнический анализ, проведённый в среде Microwave Office, показал, что для реализации заданных технических характеристик потребуются четыре каскада усиления: первый каскад – на транзисторе с  $W_{31} = 5$  мм, второй – на транзисторе с  $W_{32} = 10$  мм, третий и четвёртый – на транзисторах с  $W_{33} = 20$  мм. Структурная схема усилителя мощности представлена на рис. 1.

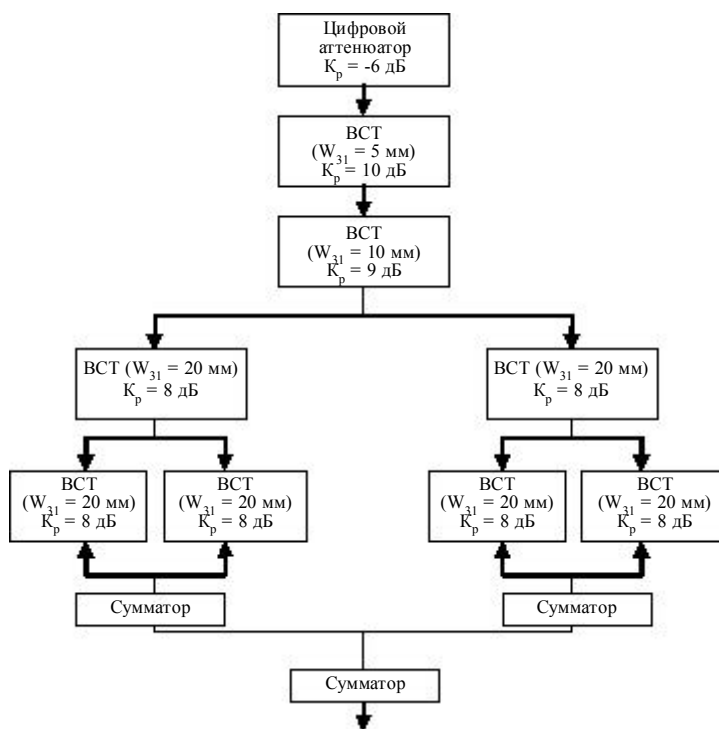


Рис. 1

Структурная схема усилителя мощности

При моделировании цепей согласования использовались нелинейные схемы кристаллов транзисторов. Конструктивно внутрисогласованный транзистор (ВСТ) представляет собой металлическое основание толщиной 1,5 мм, выполненное из сплава МД-40, на котором установлены поликоровые согласующие платы толщиной 250 мкм, согласующая однослойная керамическая ( $\epsilon = 80$ ) затворная ёмкость и медный пьедестал толщиной 150 мкм, на котором установлен кристалл транзистора. Все навесные элементы ВСТ установлены на припой золото-олово. Сварка золотой проволокой  $\varnothing = 30$  мкм осуществляется в автоматическом режиме на установке D3600. Использование

автоматического режима сборки позволяет существенно повысить повторяемость СВЧ параметров ВСТ. Типовые измеренные характеристики ВСТ в импульсном и непрерывном режимах питания представлены в табл. 1.

На рис. 2 представлен внешний вид ВСТ с  $P_{\text{вых имп}} \geq 70$  Вт.

Типовые характеристики ВСТ

Базовый кристалл	$W_{31}$	$W_{32}$	$W_{33}$
Рабочая полоса частот (по уровню $\Delta K_{ур} = 1,0$ дБ), ГГц	8,7–10,2	8,8–10,2	9,0–10,0
Коэффициент усиления $K_{ур}$ , дБ	10,0	9,0	8,0
Выходная непрерывная мощность $P_{ВЫХ}$ (при $U_{СИ} = 24$ В), Вт	16,0	32,0	50,0
Выходная импульсная мощность $P_{ВЫХ.ИМП.}$ (при $U_{СИ} = 30$ В, $\tau = 250$ мкс, $Q = 4$ ), Вт	22,0	40,0	70,0

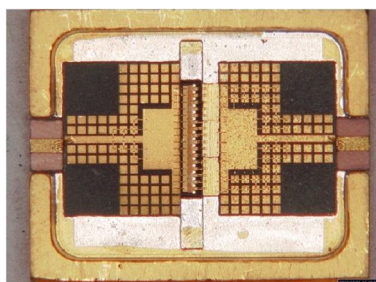


Рис. 2

Внутриогласованный транзистор с  $P_{ВЫХ.ИМП.} \geq 70$  Вт

### Тепловое моделирование

Для конструирования корпуса СВЧ усилителя необходимо провести тепловое моделирование с целью оптимизации взаимного расположения теплонагруженных элементов. Схематичное изображение основания СВЧ усилителя с установленными на нём тепловыми источниками (СВЧ транзисторами) представлено на рис. 3, где указаны потребляемая мощность каждого элемента по постоянному току и скважность.

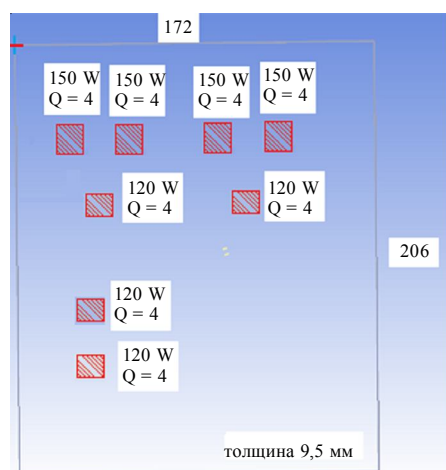


Рис. 3

Схематичное изображение элементов тепловыделения

Граничные условия при расчётах обусловлены условиями эксплуатации и особенностями функционирования СВЧ транзисторов:

- основание корпуса СВЧ усилителя имеет размер 172 x 206 x 9,5 мм и крепится в углу теплоотводящей плиты с габаритами 336 x 336 x 20 мм;

- материал корпуса и теплоотводящей плиты – Д16Т (теплопроводность 164 Вт/(м·К);

- принудительная конвекция отсутствует;

- температура окружающей среды 20 °С;

- время непрерывной работы 5 мин;

- рассеиваемая постоянная мощность в  $Q$  раз меньше, чем показана на рис. 3, что обусловлено импульсным режимом питания СВЧ ВСТ с минимальной скважностью  $Q_{\min} = 4$ .

На рис. 4 показаны результаты теплового моделирования СВЧ усилителя, установленного на теплоотводящую плиту и без неё.

Как показывают расчёты, инерционность массивной теплоотводящей плиты довольно велика и позволяет существенно снизить температуру на корпусе СВЧ усилителя, обеспечив безопасный тепловой режим для GaN транзисторов. Проведённые

впоследствии измерения температуры корпуса усилителя подтвердили достоверность расчётов: измеренная температура корпуса после пяти минут работы составила  $T_{\text{корп}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

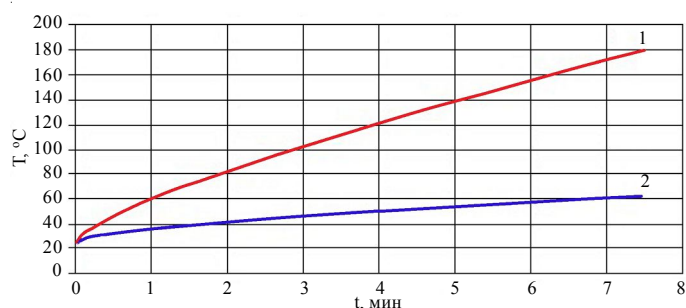


Рис. 4

Зависимость роста температуры от времени основания СВЧ усилителя при отсутствии теплоотводящей плиты (1) и на теплоотводящей плите (2)

скважность  $Q_{\text{мин}} = 4$ ; рабочий ток через нагрузку  $I_{\text{си имп}} = 20\text{ A}$ ; длительность фронта и спада импульса напряжения питания  $\tau \leq 70\text{ нс}$ ; входное напряжение питания  $U_{\text{пит}} = 60\text{ В} \pm 20\%$ .

Блок-схема модулятора питания  $U_{\text{си имп}}$  СВЧ транзисторов представлена на рис. 5.

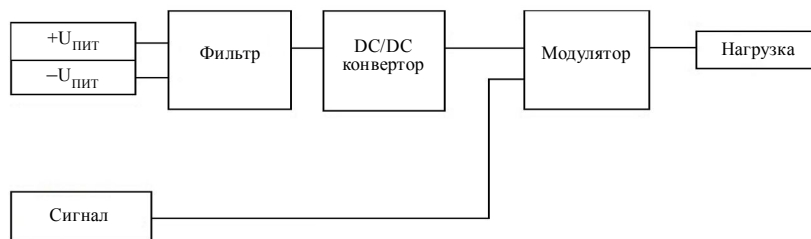


Рис. 5

Блок-схема модулятора питания

Модулятор питания включает:

1. входной фильтр дифференциальных и синфазных помех;
2. DC/DC преобразователь со следующими характеристиками:
  - КПД преобразователя более 90%;
  - высокий рабочий ток ( $I_{\text{раб}} = 10\text{ A}$ ), для реализации которого применены мощные MOSFET транзисторы;
  - малые пульсации выходного напряжения – менее 0,4 % от амплитуды выходного напряжения питания  $U_{\text{си имп}}$ . Для минимизации пульсаций выходного напряжения питания применялись конденсаторы с низким последовательным сопротивлением, включённые параллельно;
3. модулятор, состоящий из двух MOSFET транзисторов, включённых по полумостовой схеме, и драйвера управления затворами данных транзисторов, способного отдать достаточный ток в затворы MOSFET транзисторов для обеспечения быстрых фронта и спада, а также имеющего защиту от сквозных токов.

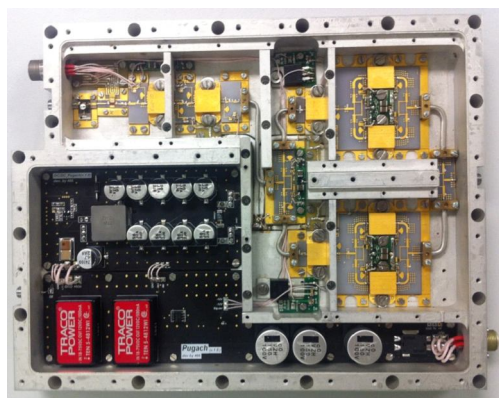
### Результаты измерений

Внешний вид твердотельного импульсного усилителя мощности со снятыми крышками представлен на рис. 6.

### Модулятор питания

Для управления импульсным режимом напряжения сток-исток  $U_{\text{си имп}}$  СВЧ транзисторов был разработан и изготовлен модулятор питания со следующими основными характеристиками [5]: длительность выходной импульса питания  $U_{\text{си имп}}$  в пределах от 25 до 250 мкс; амплитуда напряжения выходного импульса питания  $U_{\text{си имп}} = 30\text{ В}$ ; спад вершины импульса питания  $\Delta U_{\text{си имп}} \leq 0,3\text{ В}$ ; минимальная

Основные параметры изготовленного импульсного СВЧ усилителя мощности представлены в табл. 2.

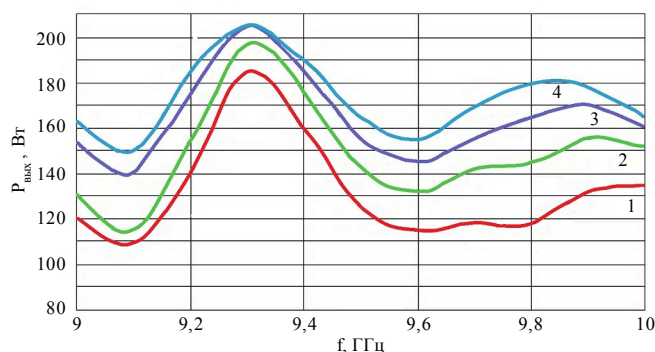


**Рис. 6**  
Внешний вид СВЧ усилителя мощности со снятыми крышками

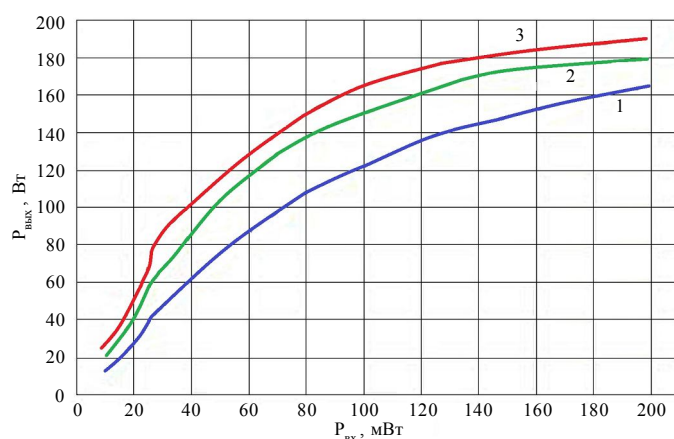
**Таблица 2**

Основные параметры импульсного СВЧ усилителя мощности

Наименование параметра, единица измерения	Измеренное значение
Рабочий диапазон частот, ГГц	9,0-10,0
Выходная импульсная мощность, Вт	150-200
Коэффициент усиления, дБ	не менее 33
Подавление СВЧ сигнала в паузе между импульсами, дБ	не менее 85
Напряжение питания, В	$60 \pm 12$
Ток потребления (при $Q = 4$ ), А	3,9



**Рис. 7**  
АЧХ модуля усилителя мощности:  
1 –  $P_{вх} = 18,5$  дБм; 2 –  $P_{вх} = 20$  дБм; 3 –  $P_{вх} = 21,5$  дБм;  
4 –  $P_{вх} = 23$  дБм



**Рис. 8**  
Выходная импульсная мощность при  $\tau = 100$  мкс,  $Q = 5$   
(1 – холодный запуск; 2 – непрерывная работа 5 мин на теплоотводящей плите; 3 – непрерывная работа 5 мин без охлаждения)

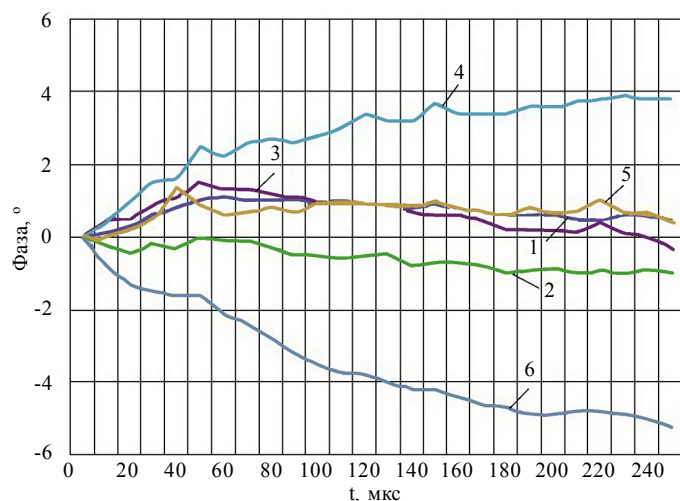
Измеренные зависимости АЧХ СВЧ усилителя при различных уровнях входной мощности представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что неравномерность во всей рабочей полосе частот составляет  $\Delta K_{урF} \leq 2,5$  дБ, а в полосе частот 100 МГц  $K_{ур100МГц} \leq 1,6$  дБ.

Зависимости изменения выходной импульсной мощности от входной мощности при различном времени разогрева СВЧ усилителя представлены на рис. 8, из которого видно, что при работе в течение 5 минут вследствие разогрева активной области кристаллов транзисторов происходит снижение выходной мощности. При этом уровень мощности изменяется менее чем на 10 %. При установке модуля на теплоотводящую плиту влияние разогрева на выходную мощность ещё меньше и составляет менее 5 % в диапазоне рабочих частот.

Одной из важнейших характеристик импульсного усилителя является стабильность фазы усиливаемого сигнала во время импульса. Изменение фазы коэффициента усиления GaN

внутрикаскадного транзистора составляет не более  $\pm 2,5$  град за время импульса 200 мкс. Однако известно, что при изменении температуры корпуса изменяются электрические длины межкаскадных цепей согласования, что может привести к существенному изменению фазы СВЧ сигнала. Кроме того, в многокаскадных усилителях набег фазы СВЧ сигнала в активных и пассивных цепях могут суммироваться неблагоприятным образом, приводя к её значительному изменению.

Для измерения изменения фазы СВЧ сигнала за время импульса использован векторный анализатор цепей ZVA14. В процессе работы над модулем были измерены фазовые характеристики. На рис. 9 представлено распределение фазы сигнала в теле импульса длительностью  $\tau_{\text{и}} = 250$  мкс.



**Рис. 9**

Распределение фазы сигнала во время импульса:  
 1 – 9,0 ГГц; 2 – 9,2 ГГц; 3 – 9,4 ГГц; 4 – 9,6 ГГц;  
 5 – 9,8 ГГц; 6 – 10 ГГц

### Заключение

В ходе выполнения проектирования СВЧ импульсного усилителя мощности на GaN НЕМТ были решены следующие вопросы:

1. разработаны три типа внутрикаскадных транзисторов X-диапазона с уровнями выходной импульсной мощности 22, 40 и 70 Вт с полосой рабочих частот  $\Delta F \geq 1,0$  ГГц;

2. разработан модулятор импульсного питания GaN транзисторов, обеспечивающий времена фронта-спада СВЧ импульса менее 100 нс и стабильность напряжения питания  $\Delta U_{\text{си имп}} = 30 \pm 0,3$  В;

3. проведена оптимизация тепловых режимов работы GaN транзисторов в составе СВЧ усилителя;

4. разработан, изготовлен и испытан модуль импульсного СВЧ усилителя мощности X-диапазона с выходной мощностью  $P_{\text{вых имп}} = 200$  Вт и коэффициентом усиления  $K_{\text{ур}} \geq 30$  дБ, обладающий фазовой нестабильностью  $\Delta \Phi \leq \pm 5$  град. За время импульса  $\tau_{\text{и}} = 250$  мкс.

### Литература

1. А. Кищинский. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ диапазона – смена поколений / Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 2. – С. 60-67.
2. Lou Frenzel. What's The Difference Between GaAs And GaN RF Power Amplifiers? – веб-ресурс <http://electronicdesign.com/communications>. – Oct. 18, 2012.
3. И. М. Аболдуев, А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев. Исследование мощных СВЧ GaN полевых транзисторов в импульсном режиме // «Пульсар-2008». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы VI научно-технической конференции. – Москва. – 2008. – С. 24-25.
4. Аболдуев И. М., Гарбер Г. З., Зубков А. М. и др. Импульсный режим работы мощных СВЧ гетеро-полевых AlGaIn/GaN транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1(228). – С. 48-53.
5. Борисов О. В., Глыбин А. А., Ивко А. М., Колковский Ю. В. Модулятор питания для GaN СВЧ усилителя мощности. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – Вып. 1 (226). – С. 71-73.