

# Мощный внутрисогласованный СВЧ-транзистор на основе GaN для перспективного телекоммуникационного оборудования и других применений

В. Бельков<sup>1</sup>, П. Куршев<sup>2</sup>, И. Семейкин<sup>3</sup>, А. Цоцорин<sup>4</sup>

УДК 621.382.32 | ВАК 2.2.2

АО «НИИЭТ» разработан компактный мощный СВЧ-транзистор на основе нитрида галлия для диапазона 6–6,4 ГГц, обладающий высоким потенциалом применения для перспективных телекоммуникационных систем. Новый прибор отличается не только улучшенными характеристиками, но простотой применения благодаря в том числе малой частотной неравномерности коэффициента усиления по мощности и высокому входному импедансу.

**Р**ост скоростей передачи данных в современных телекоммуникационных системах, а также увеличение абонентской емкости стационарных точек доступа и базовых станций мобильной связи приводят к необходимости использования более высоких частот. Новое поколение 6E стандарта Wi-Fi (802.11ax) в дополнение к применяемым в настоящее время диапазонам 2,4 и 5 ГГц будет работать в диапазоне 6 ГГц. В этом же диапазоне работают различные телекоммуникационные системы «точка-точка» и «точка-мультиточка» других стандартов. Кроме того, в России в феврале этого года было начато тестирование оборудования сотовых сетей 5G+ также в диапазоне 6–7 ГГц [1], который находится в верхней части FR1 и может обеспечить дополнительные частоты при недоступности «золотого диапазона» 3,4–3,8 ГГц.

Таким образом, часть С-диапазона в области 6 ГГц является перспективной для оборудования гражданской связи и телекоммуникаций нового поколения, а следовательно, можно ожидать высокую потребность у разработчиков аппаратуры в СВЧ ЭКБ для этого диапазона.

Понимая потребность потребителей в высоких и стабильных характеристиках СВЧ ЭКБ, ее миниатюризации, а также в удобстве ее применения, АО «НИИЭТ» разработал мощный внутрисогласованный СВЧ-транзистор для работы в диапазоне частот 6,0–6,4 ГГц, воспользовавшись возможностями, которые предоставляет применение в качестве материала таких транзисторов нитрида галлия. Особенностью нового прибора является

малая частотная неравномерность коэффициента усиления по мощности и высокий входной импеданс, что существенно облегчает применение данного транзистора в многокаскадных усилителях мощности радиопередающих устройств.

## ПРЕИМУЩЕСТВА НИТРИДА ГАЛЛИЯ КАК БАЗОВОГО МАТЕРИАЛА МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Нитрид галлия (GaN) представляет собой полупроводниковый материал, обладающий рядом свойств, которые делают эффективным его использование для изготовления, прежде всего, таких приборов, как силовые и СВЧ-транзисторы. Среди характеристик, которые

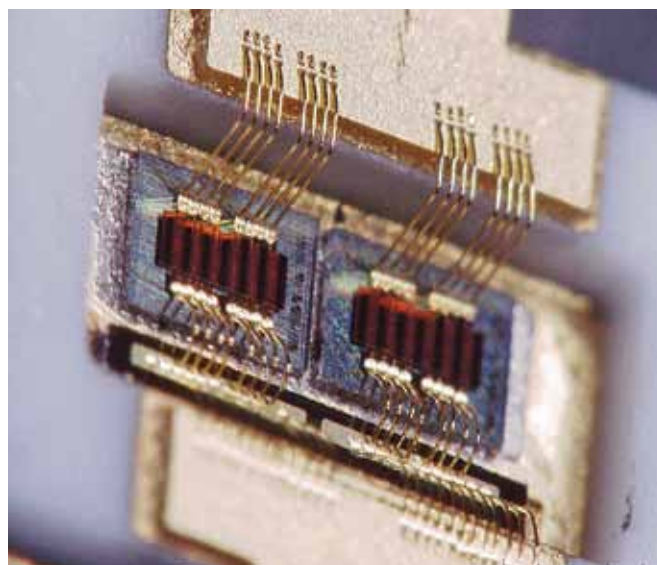


Рис. 1. Конструкция транзистора ПП9170Е

<sup>1</sup> АО «НИИЭТ», инженер-технолог.

<sup>2</sup> АО «НИИЭТ», начальник лаборатории.

<sup>3</sup> АО «НИИЭТ», технический директор.

<sup>4</sup> АО «НИИЭТ», начальник отдела.

определяют перспективность данного материала, – широкая запрещенная зона (3,39 эВ против 1,12 эВ у кремния), высокая критическая напряженность поля (3,3 МВ/см, тогда как у кремния она составляет 0,3 МВ/см) и достаточно высокая дрейфовая скорость насыщения электронов (в 2–3 раза выше, чем у кремния). Благодаря этим свойствам на основе GaN-гетероструктур создаются полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), для которых характерны повышенные показатели энергоэффективности, выходной мощности и коэффициента усиления на высоких рабочих частотах [2].

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНЗИСТОРА ПП9170Е

Транзистор ПП9170Е разрабатывался специалистами АО «НИИЭТ» в рамках научно-исследовательских работ, проводимых институтом. Одним из требований к разрабатываемому прибору было применение стандартного корпуса КТ-81С, вследствие чего использование кристаллов с большим периметром затвора оказалось невозможным. Для преодоления этой проблемы было решено применить схему параллельного включения двух кристаллов с меньшим периметром затвора, ранее разработанных АО «НИИЭТ», обеспечив их согласование посредством встроенных LC-цепей. Конструктивное исполнение полученного транзистора ПП9170Е представлено на рис. 1.

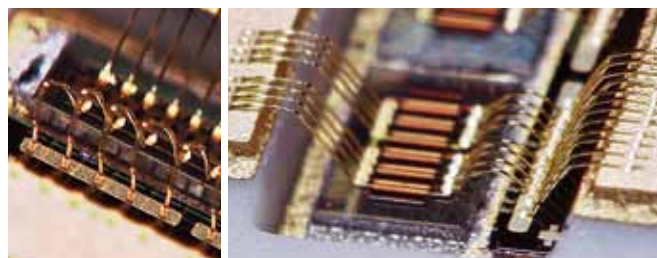


Рис. 2. Конструкция цепей согласования

Согласование транзисторов на основе GaN в широкой полосе упрощается вследствие высокого напряжения питания и малых межэлектродных емкостей [3]. Кроме того, большие запасы по пробивному напряжению сток-исток обеспечивают крайне высокую стойкость к рассогласованию нагрузки транзистора. На основании проведенных расчетов для описываемого прибора была разработана конструкция цепей согласования для стабильной работы в полосе частот от 6,0 до 6,4 ГГц на основе МДП-конденсаторов, выполненных на отдельном кристалле (рис. 2).

### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Основные эксплуатационные параметры разработанного транзистора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения основных параметров транзистора ПП9170Е

Параметр (режим измерения)	Обозначение	Норма		Температура среды, (корпуса), °С
		не менее	не более	
Выходная импульсная мощность, Вт ( $U_{\text{си}} = 45 \text{ В}$ , $f = \{6; 6,2; 6,4\} \text{ ГГц}$ , $P_{\text{вх и}} = 3,2 \text{ Вт}$ )	$P_{\text{вх и}}$	50	–	$(25 \pm 10)$
Коэффициент усиления по мощности, дБ ( $U_{\text{си}} = 45 \text{ В}$ , $f = \{6; 6,2; 6,4\} \text{ ГГц}$ , $P_{\text{вх и}} = 50 \text{ Вт}$ )	$K_{\text{ур}}$	12	–	$(25 \pm 10)$
Коэффициент полезного действия стока, % ( $U_{\text{си}} = 45 \text{ В}$ , $f = \{6; 6,2; 6,4\} \text{ ГГц}$ , $P_{\text{вх и}} = 50 \text{ Вт}$ )	$\eta_{\text{с}}$	45	–	$(25 \pm 10)$
Крутизна характеристики, А/В ( $U_{\text{си}} = 10 \text{ В}$ , $I_{\text{с}} = 2,5 \text{ А}$ )	$S$	2,3	–	$25 \pm 10$
Остаточный ток стока, мА ( $U_{\text{си}} = 120 \text{ В}$ , $U_{\text{зи}} = -10 \text{ В}$ )	$I_{\text{с ост}}$	–	8	$25 \pm 10$
Ток стока насыщения, А ( $U_{\text{си}} = 10 \text{ В}$ , $U_{\text{зи}} = 2 \text{ В}$ )	$I_{\text{с нас}}$	6,7	–	$25 \pm 10$
Входная емкость, пФ ( $f = 1 \text{ МГц}$ , $U_{\text{си}} = 45 \text{ В}$ )	$C_{11и}$	–	25,1	$25 \pm 10$
Проходная емкость, пФ ( $f = 1 \text{ МГц}$ , $U_{\text{си}} = 45 \text{ В}$ )	$C_{12и}$	–	1,6	$25 \pm 10$
Выходная емкость, пФ ( $f = 1 \text{ МГц}$ , $U_{\text{си}} = 45 \text{ В}$ )	$C_{22и}$	–	5,3	$25 \pm 10$

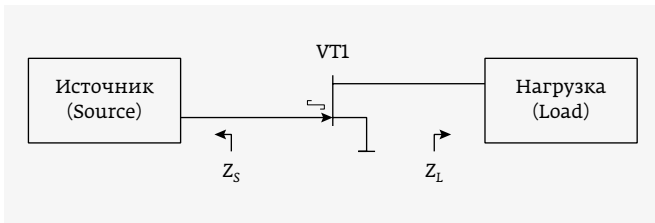


Рис. 3. Схема теста для измерения импеданса источника  $Z_s$  и нагрузки  $Z_L$

Для измерения таких параметров, как выходная импульсная мощность ( $P_{\text{ВЫХ И}}$ ), коэффициент усиления по мощности ( $K_{\text{УР}}$ ) и коэффициент полезного действия стока ( $\eta_c$ ), использовались оптимальные значения импедансов источника ( $Z_s$ ) и нагрузки ( $Z_L$ ), полученные с помощью метода оптимизации полного сопротивления нагрузки Load Pull с векторными приемниками при следующих условиях: напряжение сток-исток  $U_{\text{СИ}} = 45 \text{ В}$ , ток покоя стока  $I_{\text{С0}} = 30 \text{ мА}$ , температура корпуса  $t_k = 25 \pm 10 \text{ }^\circ\text{С}$ , длительность импульса  $\tau_{\text{и}} = 100 \text{ мкс}$ , скважность  $Q = 10$ . На рис. 3 приведена схема теста; стрелками показаны импедансы источника ( $Z_s$ ) и нагрузки ( $Z_L$ ) со стороны транзистора.

В пределах диапазона частот, для работы в котором предназначен разрабатываемый транзистор, были выбраны три тестовые частоты:  $f_1 = 6000 \text{ МГц}$ ,  $f_2 = 6200 \text{ МГц}$  и  $f_3 = 6400 \text{ МГц}$ , для каждой из которых были определены оптимальные значения импеданса нагрузки  $Z_L$  и соответствующие им значения входного импеданса транзистора  $Z_{\text{ИН}}$ . Оптимальный импеданс источника  $Z_s$  рассчитывался из того факта, что его значение является комплексно сопряженным  $Z_{\text{ИН}}$ .

Полученные значения  $Z_s$ ,  $Z_L$  и соответствующие им измеренные значения  $P_{\text{ВЫХ И}}$ ,  $\eta_c$  и  $K_{\text{УР}}$  приведены в табл. 2. Типовые зависимости параметров транзистора представлены на рис. 4–7.

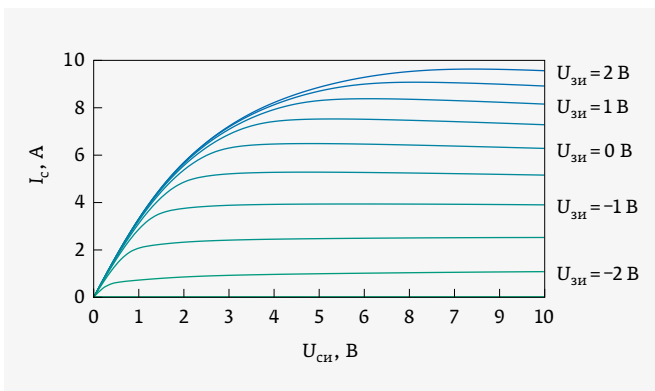


Рис. 4. Типовые выходные ВАХ в схеме с общим истоком

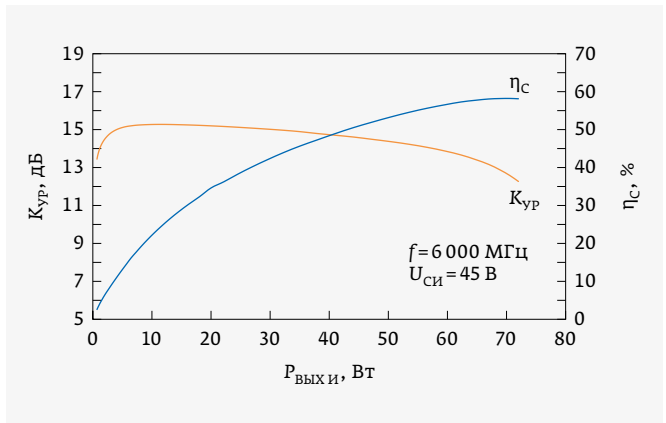


Рис. 5. Типовые зависимости коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия стока от выходной импульсной мощности

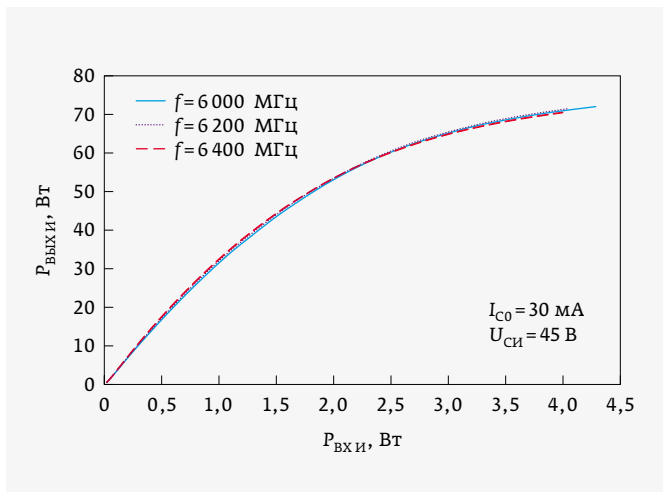


Рис. 6. Типовые зависимости выходной импульсной мощности от входной импульсной мощности на частотах  $f_1 = 6000 \text{ МГц}$ ,  $f_2 = 6200 \text{ МГц}$  и  $f_3 = 6400 \text{ МГц}$

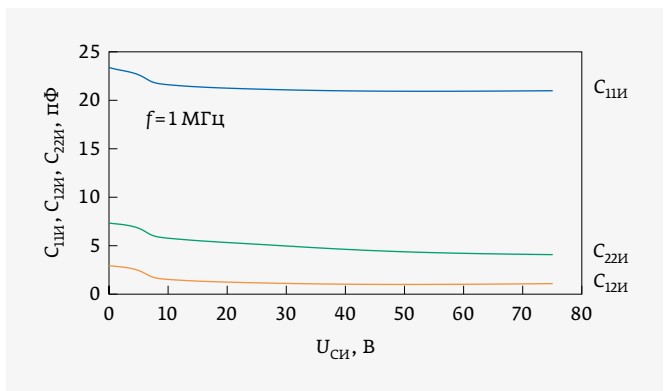


Рис. 7. Типовые зависимости входной, выходной и проходной емкостей от напряжения сток-исток

**Таблица 2.** Результаты тестирования транзистора ПП9170Е методом оптимизации полного сопротивления нагрузки Load Pull

f, МГц	Z <sub>s</sub> , Ом	Z <sub>L</sub> , Ом	K <sub>сж</sub> = 3 дБ		K <sub>ур</sub> , дБ
			P <sub>вых</sub> , Вт	η <sub>с</sub> , %	
6000	7,5–13,5 j	5,7–7,0 j	72,0	58,1	14,4
6200	7,5–14,4 j	5,8–8,2 j	71,5	56,2	14,4
6400	7,5–15,3 j	5,7–9,5 j	70,5	55,4	14,4

Как видно из табл. 2 и рис. 6, коэффициент усиления по мощности K<sub>ур</sub> почти не изменяется во всем рабочем диапазоне частот при заданном уровне выходной импульсной мощности P<sub>вых</sub>. Поэтому зависимости P<sub>вых</sub> от P<sub>вх</sub>, полученные на разных частотах рабочего диапазона, практически сливаются в одну линию. Таких характеристик удалось достичь за счет оптимально подобранной конструкции встроенной входной согласующей цепи.

\* \* \*

В статье приведены основные особенности и технические характеристики разработанного в АО «НИИЭТ» GaN СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов в унифицированном миниатюрном металлокерамическом корпусе КТ-81С. Данный транзистор при своих компактных размерах характеризуется высокими значениями выходной мощности, коэффициента полезного действия

и коэффициента усиления в С-диапазоне. Благодаря специально разработанной внутренней схеме согласования на входе удалось достичь малой частотной неравномерности коэффициента усиления по мощности и высокого входного импеданса. Кроме того, частотная характеристика при оптимальном импедансе нагрузки позволяет говорить о том, что согласование транзистора на выходе не должно вызывать сложностей, поскольку абсолютные значения активного и реактивного сопротивлений, а также их соотношение находятся на приемлемом уровне.

Компактность, технологичность, простота применения и высокие значения эксплуатационных характеристик делают данный прибор достойным представителем новой линейки СВЧ-транзисторов АО «НИИЭТ», обладающим хорошим потенциалом для применения в современной и перспективной СВЧ-аппаратуре, в том числе в оборудовании гражданской связи и телекоммуникаций нового поколения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоршева Н.** В России тестируют первое в мире 5G+ оборудование в диапазоне 6 ГГц // Специальный проект RG.RU. 2 февраля 2022 г. <https://rg.ru/2022/02/02/v-rossii-testiruiut-pervoe-v-mire-5g-oborudovanie-v-diapazone-6-ggc.html>
2. **Тарасов С. В., Дикарев В. И., Цоцорин А. Н.** Мощные GaN транзисторы для применения в перспективных системах связи и радиолокации // Электронные компоненты. 2017. № 7. С. 80–83.
3. **Schweber B.** GaN Power Devices: Potential, Benefits, and Keys to Successful Use // EIU EUROPE. 2018. No 1. PP. 10–13.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



### СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Издание 3-е, исправленное  
В 2-х книгах  
Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В.

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схемотехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе — от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения. Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 18 глав.

Книга 1  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 782 с.,  
ISBN 978-5-94836-605-0  
Цена 1210 руб.

Книга 2  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 702 с.,  
ISBN 978-5-94836-606-7  
Цена 1210 руб.

Цена за два тома 2420 руб.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)