

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.215

## Методы и особенности измерения теплового сопротивления интегральных СВЧ-усилителей на гетеропереходных биполярных транзисторах

<sup>1</sup>Сергеев В.А., <sup>1,2</sup>Смирнов В.И., <sup>1</sup>Гавриков А. А.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Поступила 11.06.2023, рецензирована 16.06.2023, принята 23.06.2023

**Аннотация:** Описаны метод измерения теплового сопротивления (ТС) полупроводниковых приборов (ППП) по ОСТ 11 0944-96 и оригинальный модуляционный метод, реализованные в разработанном авторами аппаратно-программном комплексе. В обоих методах ППП разогревается импульсной мощностью, а температура его активной области (перехода) определяется по изменению температурочувствительного параметра (ТЧП) – напряжения на ППП при малом токе, пропускаемом через ППП в паузах между импульсами греющего тока. Погрешность измерения ТС стандартным методом сильно зависит от выбора длительности импульсов греющего тока и времени задержки при измерении напряжения на ППП после выключения греющего тока. В модуляционном методе длительность импульсов греющего тока изменяют по гармоническому закону, и по результатам измерения напряжения на ППП при прохождении греющего и измерительного тока определяют модуль теплового импеданса ППП как отношение первой гармоники температуры перехода к первой гармонике греющей мощности. По частотной зависимости модуля теплового импеданса определяют компоненты ТС объекта, при этом существенно снижаются требования к поддержанию температуры корпуса прибора и, как следствие, снижается погрешность измерения ТС. Приведены результаты сравнительных измерений ТС интегральных СВЧ-усилителей (усилительных каскадов) на InGaP/GaP ГБТ стандартным и модуляционным методом при различных значениях амплитуды греющего тока. Показано, что результаты измерения ТС интегральных СВЧ-усилителей обоими методами хорошо согласуются между собой. Установлено что с ростом амплитуды греющего тока происходит уменьшение ТС переход-корпус интегральных СВЧ-усилителей, что обусловлено выравниванием токораспределения в структуре ГБТ при нагреве.

**Ключевые слова:** интегральные СВЧ-усилители мощности, гетеробиполярные транзисторы, тепловые параметры, измерение, модуляционный метод

УДК 621.382.32

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 22-29-01134, <https://rscf.ru/project/22-29-01134/>.

**Для цитирования:** Сергеев В.А., Смирнов В.И., Гавриков А. А. Методы и особенности измерения теплового сопротивления интегральных СВЧ-усилителей на гетеропереходных биполярных транзисторах. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(3):215-222. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.215.

# Methods and features of measuring the thermal resistance of integrated microwave amplifiers on heterojunction bipolar transistors

<sup>1</sup>Viacheslav A. Sergeev, <sup>1,2</sup>Vitaliy I. Smirnov, <sup>1</sup>Andrey A. Gavrikov

<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>  
Ulyanovsk 432071, Russian Federation

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>  
Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Received May 9, 2023, peer-reviewed May 16, 2023, accepted May 23, 2023

**Abstract:** The method of measuring the thermal resistance (TR) of semiconductor devices (SD) according to OST 11 0944-96 and the original modulation method implemented in the hardware and software package developed by the authors are described. In both methods, the SD is heated by pulsed power, and the temperature of its active region (transition) is determined by a change in the temperature-sensitive parameter (TSP) - the voltage at the SD at a low current passed through the SD in the pauses between the pulses of the heating current. The measurement error of the vehicle by the standard method strongly depends on the choice of the duration of the heating current pulses and the delay time when measuring the voltage at the SD after switching off the heating current. In the modulation method, the duration of the heating current pulses is changed according to the harmonic law, and according to the results of measuring the voltage at the SD during the passage of the heating and measuring current, the modulus of the thermal impedance of the SD is determined as the ratio of the first harmonic of the transition temperature to the first harmonic of the heating power. According to the frequency dependence of the thermal impedance module, the components of the vehicle of the object are determined, while the requirements for maintaining the temperature of the device body are significantly reduced and, as a result, the measurement error of the vehicle is reduced. The results of comparative measurements of the TR of integrated microwave amplifiers (amplifying cascades) on InGaP/GaP HBT by the standard and modulation method at different values of the amplitude of the heating current are presented. It is shown that the results of measuring the TR of integrated microwave amplifiers by both methods are in good agreement with each other. It is established that with an increase in the amplitude of the heating current, the TR junction-case of integrated microwave amplifiers decreases, which is due to the alignment of current distribution in the structure of the GBT during heating.

**Keywords:** integrated microwave power amplifiers, heterobipolar transistors, thermal parameters, measurement, modulation method

UDC 621.382.32

**Acknowledgments:** The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-29-01134).

**For citation:** Vyacheslav A. Sergeev, Vitaliy I. Smirnov, Andrey A. Gavrikov. Methods and features of measuring the thermal resistance of integrated microwave amplifiers on heterojunction bipolar transistors. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(3):215-222e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.215.

## СОДЕРЖАНИЕ

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ВВЕДЕНИЕ (217)</li> <li>2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ (217)</li> <li>3. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ (218)</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ СТАНДАРТНЫМ МЕТОДОМ (219)</li> <li>5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ (220)</li> <li>6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (221)</li> </ol> <p>ЛИТЕРАТУРА (221)</p> |
|---|---|

## 1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-усилители мощности на гетеробиполярных транзисторах (ГБТ) находят широкое применение в различных радиоэлектронных системах, работающих в  $S$ - и  $L$ -диапазонах [1,2]. Одной из ключевых проблем для этого класса приборов является отвод тепла от кристаллов, поскольку коэффициент полезного действия СВЧ-усилителей мощности существенно меньше единицы [1,2]. При этом реальные тепловые параметры модулей СВЧ-усилители мощности могут существенно отличаться от расчетных, поэтому необходим контроль их тепловых параметров как на предприятиях-изготовителях, так и на входном контроле предприятий-производителей радиоэлектронной аппаратуры с использованием таких устройств.

Для контроля тепловых параметров СВЧ-усилители мощности используют методы ИК-термометрии [3,4], рамановской термометрии [5], или спектроскопии фотопроводимости [6]. Эти методы имеют невысокую точность, и очевидно, непригодны для полностью готовых изделий в закрытых корпусах.

Цель данной работы заключалась в апробации методов косвенного измерения тепловых параметров интегральных СВЧ-усилителей мощности на ГБТ стандартным и модуляционным методом при различных токах и в анализе полученных зависимостей.

## 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ

Тепловые свойства полупроводниковых приборов принято характеризовать тепловым сопротивлением (ТС) "переход-корпус"  $R_{Tjc}$ , определяемым как отношение приращения температуры  $\Delta T_j$   $p$ - $n$ -перехода ГБТ к рассеиваемой в нем тепловой мощности:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P},$$

где  $T_j$  – температура  $p$ - $n$ -перехода транзистора, входящего в состав усилителя;  $T_c$  – фиксированная температура корпуса;  $P$  – мощность, рассеиваемая в усилителе.

Согласно ОСТ 11 0944-96 [7] для БТ и ГБТ используют импульсный режим разогрева

объекта измерения, включенного по схеме с общей базой. Температура перехода  $T_j$  определяется в паузах между импульсами греющего тока  $I_{heat}$  путем измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно зависящего от температуры перехода  $T_j$ . В качестве ТЧП для БТ и ГБТ используют прямое напряжение  $U_{cb}$  на эмиттерном переходе при протекании через него малого фиксированного измерительного тока. Погрешность измерения ТС данным методом по оценкам [7] составляет более 12% с доверительной вероятностью 0.95. Одной из причин этого является переходный электрический процесс, возникающий при переключении БТ или ГБТ из режима разогрева в режим измерения ТЧП [8]. Другой причиной является неопределенность задания длительности греющих импульсов, которая согласно стандарту [7] должна в 3-5 раз превышать тепловую постоянную "переход-корпус"  $\tau_{Tjc}$ , но методики измерения  $\tau_{Tjc}$  в стандарте не представлено.

Эти недостатки отсутствуют в модуляционном методе с нагревом объекта импульсами греющего тока, длительность которых изменяют по гармоническому закону [9]:

$$\tau(t) = \tau_{av} (1 + a \sin 2\pi f t),$$

где  $\tau_{av}$  – средняя длительность импульсов;  $a$ ,  $f$  – коэффициент и частота модуляции греющей мощности. Модуляция греющей мощности вызывает синусоидальные колебания средней за период температуры перехода  $T_j$ , со сдвигом  $\varphi$  по фазе относительно переменной мощности:

$$T_j(t) = T_{j0} + T_m \sin(2\pi f t - \varphi),$$

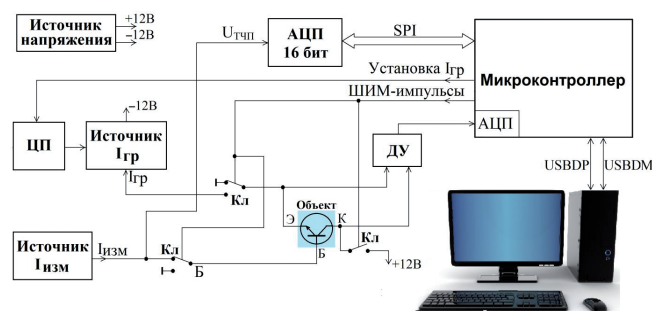
где  $T_{j0}$  – постоянная составляющая температуры перехода;  $T_m$  – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции  $f$ .

Тепловой импеданс определяется как отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода и греющей мощности. Зависимость теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности имеет особенности в виде пологих участков и точек перегиба, определяемых компонентами ТС объекта [10]. Модуляционный метод по сравнению со стандартным методом имеет

ряд преимуществ [11]: он позволяет измерять компоненты ТС, и в этом методе существенно снижены требования по поддержанию температуры корпуса объекта постоянной. Оба метода реализованы в аппаратно-программном комплексе, включающем в себя микропроцессорный измеритель теплового сопротивления, компьютер и специализированное программное обеспечение [11].

### 3. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Модуляционный метод измерения ТС реализован в аппаратно-программном комплексе (АПК), функциональная схема которого представлена на **Рис. 1**. АПК работает следующим образом. Оператор вводит данные о режимах и параметрах измерения, которые посредством USB-интерфейса передаются в измеритель микроконтроллеру. Микроконтроллер совместно с цифровым потенциометром (ЦП) и источником греющего тока  $I_{\text{heat}}$  формирует импульсы с установленными оператором амплитудой, периодом следования и частотой широтно-импульсной модуляции. Импульсы греющего тока, проходящие по цепи коллектор-эмиттер транзистора, нагревают объекта измерения мощностью, изменяющейся по гармоническому закону. Определение амплитуды переменной составляющей мощности производится на основе установленной оператором амплитуды импульсов греющего тока и измеренного напряжения на объекте, которое через дифференциальный усилитель (ДУ) поступает на вход встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя (АЦП).



**Рис. 1.** Функциональная схема аппаратно-программного комплекса.

Воздействие на объект переменной мощности, изменяющейся по гармоническому закону, вызывает изменение температуры активной области кристалла транзистора ( $p-n$ -перехода) по такому же закону, но со сдвигом по фазе относительно греющей мощности. Измерение температуры перехода осуществляется косвенным способом на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого используется прямое напряжение  $U_{\text{eb}}$  между эмиттером и базой транзистора при протекании через эмиттерный переход фиксированного измерительного тока  $I_{\text{meas}}$ . Температура перехода измеряется в паузах между греющими импульсами с временной задержкой относительно их заднего фронта, необходимого для завершения переходных электрических процессов. Измерение температуры перехода производится 16-разрядным АЦП, взаимодействующим с микроконтроллером посредством последовательного периферийного интерфейса SPI (Serial Peripheral Interface). Чтобы обеспечить протекание импульсов греющего тока через транзистор по цепи "коллектор-эмиттер", а в паузах между импульсами – по цепи "база-эмиттер", используются электронные переключатели Кл на полевых транзисторах, управляемые микроконтроллером.

С помощью АПК можно производить измерения ТС не только модуляционным методом, но и стандартным методом по ОСТ 11 0944-96, использующим нагрев объекта серией импульсов греющего тока с постоянной длительностью. Поскольку длительность греющих импульсов должна быть такой, чтобы кристалл успевал выходить в стационарный температурный режим, а температура корпуса оставалась бы при этом неизменной, то в АПК для определения этой оптимальной длительности предусмотрен специальный режим. Он основан на измерении и анализе переходной тепловой характеристики (ПТХ), то есть зависимости  $Z_t(\tau)$  переходного ТС от длительности  $\tau$  импульсов греющего тока и включает в себя пропускание через объект греющих импульсов с увеличивающейся по логарифмическому закону длительностью. При этом пауза между импульсами в 4-5 раз



превышает длительность импульсов, что вполне достаточно для того, чтобы температура кристалла после каждого импульса возвращалась к исходному значению. После каждого греющего импульса с некоторой временной задержкой производится измерение отклика на это воздействие – изменение температуры перехода. Для определения оптимальной длительности импульсов применяется сглаживание и дифференцирование измеренной ПТХ.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ СТАНДАРТНЫМ МЕТОДОМ

Объектами исследования являлись интегральные СВЧ усилители на основе InGaP/GaP ГБТ типа MMG3014NT1 с предельной частотой 4 ГГц и максимальным рабочим током 300 мА [12]. При измерениях объект подключался к источнику греющих импульсов по схеме с общей базой. Разогрев осуществлялся серией импульсов греющего тока, протекающих по цепи "коллектор-эмиттер". Напряжение  $U_{cb}$ , используемое в качестве ТЧП, измерялось с временной задержкой 40 мкс относительно окончания каждого импульса греющего тока. Температурный коэффициент прямого падения напряжения измерялся стандартным методом и для ГБТ MMG3014 равен  $-1.78$  мВ/К.

Для определения оптимальной длительности импульсов греющего тока вначале измерялась переходная тепловая характеристика (ПТХ) путем пропускания импульсов греющего тока, с изменением длительности  $\tau$  от 0.1 до 300 мс с постоянным по логарифмической шкале шагом 50 импульсов на декаду. Результаты измерения ПТХ представлены в верхнем окне на Рис. 2. Выявление особенностей ПТХ производилось путем вычисления  $[dZ_T/dt]^{-1}$  как функции длительности импульсов  $\tau$ . Результат такой обработки ПТХ представлен в нижнем окне на Рис. 2. Максимум графика в нижнем окне соответствует оптимальной длительности импульса, значение которой для исследуемого ГБТ MMG3014 оказалось равно 5.5 мс. При определенной таким образом длительности импульсов и проводились измерения стандартным методом. Тепловое сопротивление  $R_{Tjc}$  определялось на основе

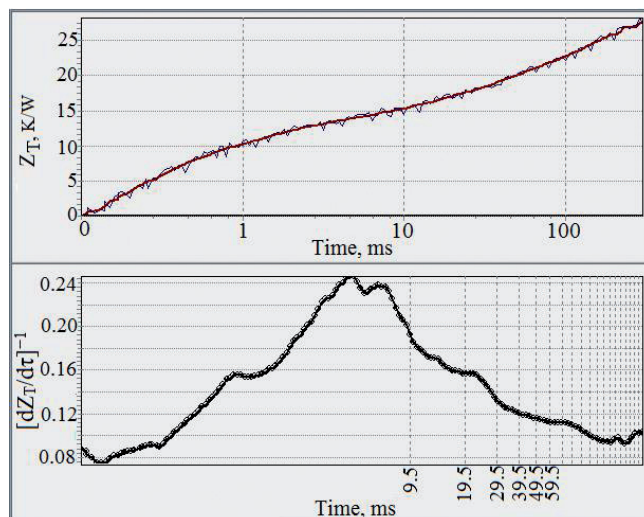


Рис. 2. Переходная тепловая характеристика (вверху) и результат ее обработки (внизу).

вычисления разности температур кристалла до и после греющего импульса с последующим усреднением по всем импульсам. Для устранения влияния на результаты измерения времени задержки использовалась экстраполяция значений ТЧП к моменту окончания каждого греющего импульса; при этом предполагалось, что процесс остывания кристалла объекта описывается корневой зависимостью [8].

Результат измерения ТС СВЧ-усилителя MMG3014 при  $I_{heat} = 200$  мА представлен на Рис. 3. Вне зависимости от установленной длительности импульсов напряжение на вершине импульсов измерялось 10 раз с последующим усреднением. Для определения изменения температуры перехода, вызванного воздействием греющего импульса, значение ТЧП измерялось 10 раз до каждого греющего импульса и 130 раз после него. Интервал между соседними измерениями ТЧП составлял 13 мкс,

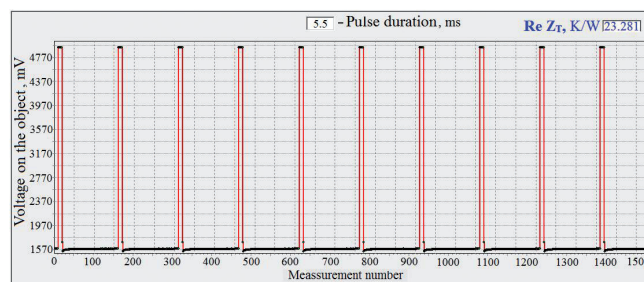


Рис. 3. Форма напряжения на объекте при измерении ТС СВЧ-усилителя MMG3014 стандартным методом при  $I_{heat} = 200$  мА.

что определялось возможностями внешнего АЦП и SPI-интерфейса. Измеренное значение ТС при  $I_{heat} = 200$  мА получилось равным 23.28 К/Вт. Измерения ТС при различных значения  $I_{heat}$  показали, что с ростом амплитуды  $I_{heat}$  значение  $R_{Tjc}$  существенно уменьшается.

### 5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В этом методе объект разогревается последовательностью импульсов греющего тока с заданным периодом следования и изменяющейся по гармоническому закону длительностью. Для определения  $R_{Tjc}$  измерялась зависимость вещественной части  $Re Z_T(f)$  теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности  $f$  (верхнее окно на Рис. 4). Точка перегиба на зависимости  $Re Z_T(f)$  определяется тепловым сопротивлением "переход-корпус"  $R_{Tjc}$ . Для определения этой компоненты строился график зависимости обратной производной  $Re Z_T(f)$  по частоте от  $Re Z_T$  (нижнее окно на Рис. 4). Максимум на графике соответствует компоненте ТС  $R_{Tjc}$ .

Для оценки неоднородности распределения греющего тока по структуре кристалла

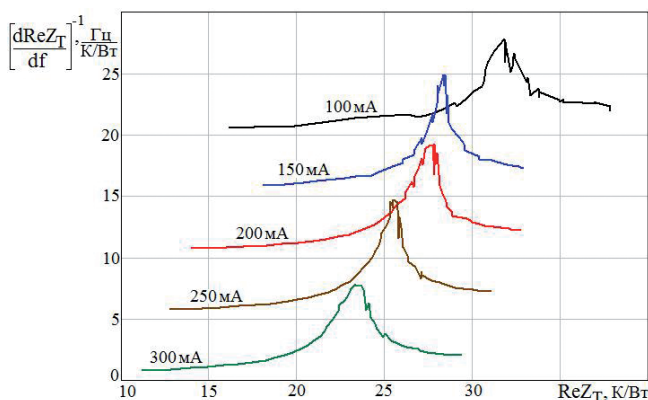


Рис. 5. Зависимость  $(dReZ_T/df)^{-1}$  от вещественной части теплового импеданса  $Re Z_T$  СВЧ-усилителя MMG3014 при различных амплитудах  $I_{heat}$ .

СВЧ-усилителя MMG3014 были произведены измерения зависимости  $Re Z_T(f)$  при различных значениях амплитуды импульсов греющего тока. Результаты обработки полученных зависимостей представлены на Рис. 5. Для удобства восприятия графиков все они сдвинуты относительно друг друга по оси ординат на 5 единиц. Видно, что с увеличением  $I_{heat}$  от 100 до 300 мА максимумы, положение которых относительно оси  $Re Z_T$  определяет тепловое сопротивление  $R_{Tjc}$ , сдвигаются к началу оси абсцисс. Это указывает на то, что с ростом амплитуды импульсов греющего тока значения теплового сопротивления  $R_{Tjc}$  СВЧ-усилителя мощности на ГБТ существенно уменьшаются.

Результаты измерений  $R_{Tjc}$  при разных значениях  $I_{heat}$ , полученные модуляционным методом, приведены на Рис. 6. Сплошной линией 1 показан результат обработки значений  $R_{Tjc}$ , полученных модуляционным методом, по методу наименьших квадратов. Линией 2 показан результат обработки значений  $R_{Tjc}$ , полученных стандартным методом. Видно, что характер зависимости  $R_{Tjc}$  от  $I_{heat}$  для обоих методов одинаков, но между измеренными значениями  $R_{Tjc}$  имеется существенное различие. Причиной такого различия является то, что усилитель мощности кроме кристалла, в котором сформирован ГБТ, имеют согласующие элементы, обладающие активным и емкостным сопротивлением. При использовании модуляционного метода объект нагревается последовательностью

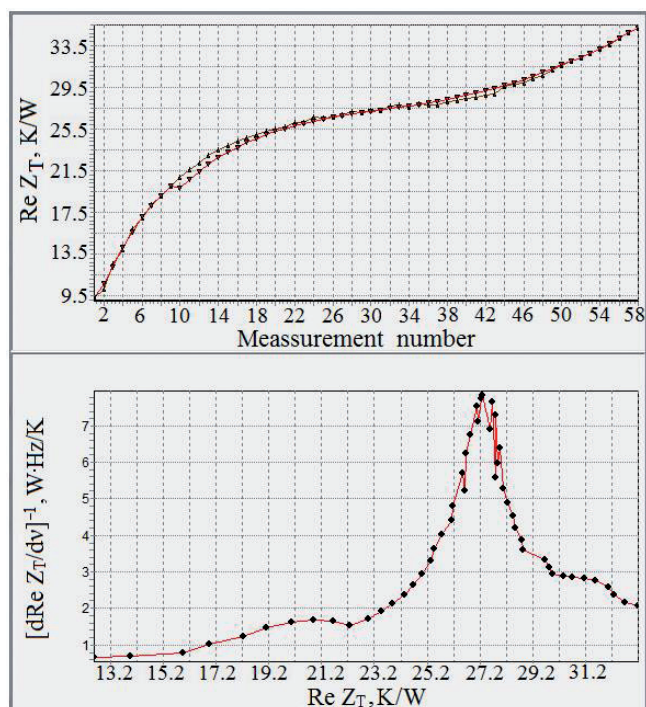


Рис. 4. Частотная зависимость вещественной части  $Re Z_T(f)$  теплового импеданса СВЧ-усилителя MMG3014.

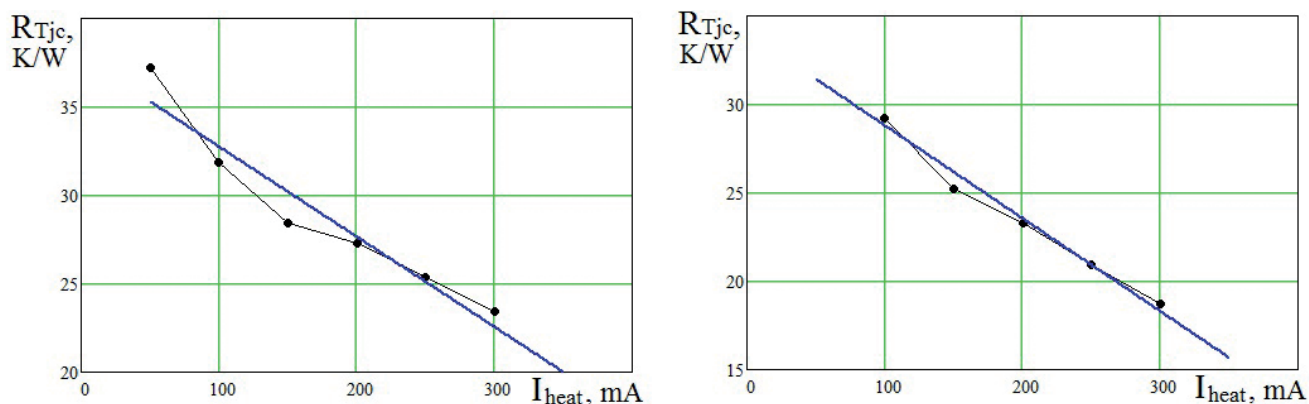


Рис. 6. Зависимость теплового сопротивления СВЧ-усилителя MMG3014, измеренного различными методами, от амплитуды импульсов греющего тока: 1 – стандартный метод; 2 – модуляционный метод.

импульсов с периодом следования около 100 мкс, а при использовании стандартного метода – одиночными импульсами длительностью несколько миллисекунд. Из-за различного характера протекания тока через согласующие емкостные элементы кристалл ГБТ серий коротких импульсов тока нагревается сильнее, чем при нагреве одиночными импульсами.

Кроме того из таблицы видно, что тепловое сопротивление  $R_{Tjc}$  СВЧ-усилителя на ГБТ MMG3014 заметно уменьшается с увеличением амплитуды греющего тока. Одним из наиболее вероятных механизмов такого уменьшения является выравнивание токораспределения в гребенчатой структуре ГБТ при нагреве [13,14]. Одной из основных причин неоднородного токораспределения в гребенчатых структурах БТ и ГБТ в активном режиме работы является падение напряжения на сопротивлении токоведущих эмиттерных дорожек металлизации в соотношении с тепловым потенциалом [14]. С увеличением температуры структуры и теплового потенциала влияние падения напряжения на сопротивлении металлизации снижается и неоднородность плотности тока в структуре уменьшается. Таким образом, крутизна токовой зависимости  $R_{Tjc}$  может служить косвенным диагностическим параметром сопротивления токоведущей металлизации и неоднородности токораспределения в структуре ГБТ.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты сравнительных измерений ТС переход-корпус интегральных СВЧ-усилителей (усилительных каскадов) на

InGaP/GaP ГБТ стандартным и модуляционным методом при различных значениях амплитуды греющего тока. Показано, что результаты измерения ТС переход-корпус интегральных СВЧ-усилителей обоими методами хорошо согласуются между собой. Установлено что с ростом амплитуды греющего тока происходит уменьшение ТС переход-корпус интегральных СВЧ-усилителей, что вероятно обусловлено выравниванием токораспределения в структуре ГБТ при нагреве.

Таким образом, крутизна токовой зависимости  $R_{Tjc}$  может служить косвенным диагностическим параметром неоднородности токораспределения в структуре ГБТ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сечи Ф, Буджатти М. *Мощные твердотельные СВЧ-усилители*. Москва, Техносфера, 2015, 416 с.
2. Ретнюк В. Выбор технологии СВЧ-транзисторов для использования в усилителях мощности. *СВЧ-электроника*, 2018, 2:4-6.
3. Сергеев ВА, Ходаков АМ, Тарасов РГ. Расчет и измерение тепловых параметров монолитных интегральных схем СВЧ-усилителей в составе выходных усилителей мощности X-диапазона. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*, 2019, № 8.
4. Mahalingam M, Mares E. Infrared temperature characterization of high power RF devices. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2001, 3:2199-2202.



5. He J, Mehrotra V, Shaw MC. Ultra-high resolution temperature measurement and thermal management of RF power devices using heat pipes. *Proceedings 11th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD'99)*, 1999:145-148.
6. Cinà L, Di Carlo A, Reale A. Thermal Model of High-Power Amplifiers Based on Time-Dependent Temperature Profiles Measured by Photoconductance. *IEEE Transactions on Electron Device*, 2018, 65(5):1739-1744.
7. ОСТ 11 0944-96 ОСТ 11 0944-96. *Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления*. Москва, ГУП НПП Пульсар, 1997, 110 с.
8. Blackburn DL, Oettinger FF. Transient Thermal Response Measurements of Power Transistors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics. Control Instruments*, 1976, 2:134-142.
9. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*, 2018, 80:205-212.
10. Смирнов ВИ, Гавриков АА, Шорин АМ. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация. *Автоматизация процессов управления*, 2017, 2(48):98-105.
11. Смирнов ВИ, Сергеев ВА, Гавриков АА, Тарасов РГ. Сравнительный анализ методов измерения тепловых параметров интегральных СВЧ-усилителей мощности на биполярных транзисторах. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*, 2022, №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug22/11/text.pdf>.
12. Freescale Semiconductor Technical Data: Document Number: MMG3014NT1 Rev. 5, 3/2016.
13. Sergeev VA, Khodakov AM. Two-Section Model of the Current Distribution in Strip Layouts of Bipolar and Hetero-Bipolar Microwave Transistors. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, 67(11):1400-1405.
14. Sergeev VA, Hodakov AM. Thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the current-carrying metallization. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(2):103-110e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.103.

**Сергеев Вячеслав Андреевич**

*д.т.н., проф., член-корр. РАЕН*

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

**Смирнов Виталий Иванович**

*д.т.н., проф.*

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru)

**Гавриков Андрей Анатольевич**

*к.т.н., с.н.с.*

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)