

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.11>

УДК: 681.518.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

В.И. Смирнов^{1,2}, В.А. Сергеев¹, А.А. Гавриков¹, Р.Г. Тарасов³

¹ Ульяновский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

² Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

³ Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Завод Искра»
432030, г. Ульяновск, пр-т Нариманова, д. 75

Статья поступила в редакцию 11 июля 2022 г.

Аннотация. Представлен краткий анализ методов и особенностей измерения тепловых параметров интегральных СВЧ-усилителей мощности на биполярных транзисторах (БТ). Описан аппаратно-программный комплекс, реализующий метод измерения тепловых параметров усилителя по ОСТ 11 0944-96 и оригинальный модуляционный метод. В обоих методах температура активной области кристаллов БТ определяется по изменению некоторого температурочувствительного параметра (ТЧП) БТ при их разогреве импульсной мощностью. Приведены результаты сравнительных измерений теплового сопротивления переход-корпус интегрального СВЧ-усилителя L-диапазона на кремниевых БТ. Оптимальная длительность греющих импульсов в стандартном методе определялась на основе анализа предварительно измеренной переходной тепловой характеристики усилителя. Для исключения влияния переходных процессов при переключении усилителя из режима нагрева в режим измерения, температура кристалла БТ в момент окончания импульса греющей мощности определялась путем интерполяции результатов нескольких измерений ТЧП в

предположении, что кривая остывания кристаллов имеет корневой характер. Показано, что результаты измерения теплового сопротивления переход-корпус интегрального СВЧ-усилителя обоими методами хорошо согласуются между собой.

Ключевые слова: интегральные СВЧ-усилители мощности, тепловые параметры, измерение, модуляционный метод.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-01134.

Автор для переписки: Сергеев Вячеслав Андреевич, sva@ulstu.ru

Введение

СВЧ-усилители мощности на биполярных кремниевых транзисторах (БТ) продолжают активно разрабатываться и 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 БТ, поскольку коэффициент полезного действия усилительных каскадов СВЧ-усилителей мощности существенно меньше единицы. СВЧ-усилители мощности выполняются в виде отдельных модулей и устройств, размещаемых на монтажных платах в металлических корпусах [1, 2]. Такие модули, как правило, включают еще и набор согласующих цепей.

При проектировании и разработке конструкции СВЧ-усилители мощности большое внимание уделяется моделированию и анализу тепловых процессов и тепловых режимов работы модулей в эксплуатационных режимах. Критически важным при этом является выбор материалов платы, припоя и других элементов конструкции. Реальные тепловые параметры модулей СВЧ-усилители мощности могут существенно отличаться от расчетных, поэтому необходим контроль их тепловых параметров на финишных стадиях производства. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых СВЧ-устройств является актуальным и на входном контроле

предприятий-производителей радиоэлектронной аппаратуры с использованием таких устройств.

Для контроля тепловых параметров в процессе разработки СВЧ-усилители мощности используют методы ИК-термометрии [3, 4], рамановской термометрии [5], или спектроскопии фотопроводимости [6]. Эти методы, очевидно, непригодны для полностью готовых изделий. Однако в научной литературе не приводятся и не обсуждаются косвенные методы измерения тепловых характеристик этого класса приборов, не приводятся и результаты таких измерений.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке и апробации методов косвенного измерения тепловых параметров интегральных СВЧ-усилителей мощности на биполярных транзисторах.

1. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус интегральных СВЧ-усилителей

Параметром, который характеризует теплоэлектрические свойства микросхем усилителей мощности, так же как и других полупроводниковых приборов и интегральных схем, является тепловое сопротивление «переход-корпус» R_{Tjc} , определяемое приращением температуры ΔT_j активной области кристалла ($p-n$ -перехода) при рассеивании в нем единичной тепловой мощности:

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

где T_j – температура какого-либо $p-n$ -перехода транзисторов, входящих в состав усилителя; T_c – фиксированная температура корпуса; P – мощность, рассеиваемая в усилителе.

Методы измерения теплового сопротивления R_{Tjc} полупроводниковых приборов регламентируются стандартом ОСТ 11 0944-96 [7]. Для биполярных транзисторов, составляющих основу усилителей мощности УМ-1015, используют импульсный режим разогрева объекта измерения, включенного по схеме с общей базой.

Температура кристалла (температура перехода T_j) определяется в паузах между импульсами греющего тока $I_{гр}$ путем измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно зависящего от температуры перехода T_j . В качестве ТЧП для биполярных транзисторов используют прямое напряжение на эмиттерном переходе при протекании через него фиксированного измерительного тока $I_{изм}$ ($I_{изм} \ll I_{гр}$).

Погрешность измерения теплового сопротивления данным методом по оценкам [7] составляет 12 % с доверительной вероятностью 0,95. Такая невысокая точность измерения $R_{Tjс}$ обусловлена двумя причинами. Одной из них является переходный электрический процесс, возникающий при переключении биполярного транзистора из режима разогрева в режим измерения ТЧП. В режиме разогрева транзистора, когда через него протекает ток $I_{гр}$, из эмиттера в базу инжектируются неосновные носители заряда. При переходе в режим измерения ТЧП, когда через эмиттерный переход протекает небольшой по величине ток $I_{изм}$, инжектированные в базу носители заряда рекомбинируют и экстрагируют, что влияет на характер изменения напряжения $U_{ЭБ}$. Возникает переходный электрический процесс, поэтому определять температуру перехода T_j на основе измерения $U_{ЭБ}$ можно только через некоторое время задержки τ_3 .

Стандартом рекомендован следующий порядок действий. Спустя время t_1 ($t_1 > \tau_3$) после окончания греющего импульса, производят первое измерение $U_{ЭБ1}$, а спустя время t_2 , повторно измеряют $U_{ЭБ2}$. Значение $U_{ЭБ}$ в момент окончания греющего импульса определяют по формуле

$$U_{ЭБ}(t = 0) = U_{ЭБ1} + \frac{U_{ЭБ1} - U_{ЭБ2}}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \sqrt{t_1}.$$

Данная формула получена в предположении, что изменение температуры активной части кристалла (кривая остывания) описывается корневой зависимостью [8]. Ее использование позволяет по двум измерениям ТЧП определить значение температуры перехода T_j в момент окончания греющего импульса, и уменьшить, тем самым, влияние переходных электрических процессов на результат измерения теплового сопротивления.

Другой причиной, влияющей на точность измерения теплового сопротивления $R_{Tjс}$, является неопределенность задания длительности греющих импульсов. Согласно стандарту [7] оптимальная длительность должна в 3-5 раз превышать тепловую постоянную «переход-корпус» $\tau_{пк}$, но методики измерения $\tau_{пк}$ в стандарте не представлено.

Существенно снизить влияние времени задержки позволяет модуляционный метод, использующий нагрев объекта импульсами греющего тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону [9]:

$$\tau(t) = \tau_{ср}(1 + a \cdot \sin 2\pi ft),$$

где $\tau_{ср}$ – средняя длительность импульсов; a – коэффициент модуляции греющей мощности; f – частота модуляции.

Модуляция греющей мощности вызывает синусоидальные колебания температуры перехода T_j , но со сдвигом по фазе относительно мощности:

$$T_j(t) = T_0 + T_1 \cdot \sin(2\pi ft - \varphi),$$

где T_0 – постоянная составляющая температуры перехода; T_1 – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции f ; φ – фазовый сдвиг между переменными, составляющими температуры перехода и греющей мощности.

Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода и греющей мощности определяет амплитуду теплового импеданса, а отношение мнимой и вещественной части температуры перехода на частоте модуляции – тангенс фазы теплового импеданса. Измеренная зависимость теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности имеет особенности в виде пологих участков и точек перегиба. Выявление этих особенностей позволяет определить компоненты теплового сопротивления объекта, связанными с особенностями его конструкции, например «переход-корпус», «переход-радиатор» [10].

Модуляционный метод по сравнению со стандартным методом обладает рядом преимуществ [11, 12]. В нем существенно снижены требования по

поддержанию температуры корпуса объекта постоянной, что для мощных интегральных усилителей мощности является очень важным фактором. В нем снижено влияние длительности импульсов греющего тока. Модуляционный метод позволяет измерять компоненты теплового сопротивления, связанные с особенностями структуры объекта измерений, по которому распространяется тепловой поток. Но практическая реализация модуляционного метода гораздо сложнее, чем стандартного, поскольку в нем используется нагрев объекта импульсами с изменяющейся по определенному закону длительностью. Оба метода реализованы в аппаратно-программном комплексе, включающем в себя микропроцессорный измеритель теплового сопротивления, компьютер и специализированное программное обеспечение.

2. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов

Функциональная схема аппаратно-программного комплекса представлена на рис. 1. Из компьютера посредством последовательного интерфейса в микроконтроллер ATmega128 передается пакет данных, в котором содержится информация о режимах работы измерителя, алгоритмах функционирования формирователя импульсов греющего тока, параметрах измерения, включающих в себя амплитуду, период следования и скважность греющих импульсов, а также частоту модуляции греющей мощности. С помощью системы коммутации, выполненной на электронных переключателях, через объект пропускаются широтно-импульсно модулированные импульсы (ШИМ-импульсы) греющего тока $I_{гр}$ или импульсы постоянной длительности. Для измерения температуры кристаллов транзисторов, входящих в состав объекта, в паузах между греющими импульсами измеряется ТЧП – напряжение на эмиттерном переходе при протекании через него измерительного тока $I_{изм}$.

Напряжение $U_{ТЧП}$ с помощью внешнего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в цифровой код, поступающий в микроконтроллер. Напряжение между коллектором и эмиттером транзисторов усилителя через

дифференциальный усилитель ДУ поступает на вход встроенного в микроконтроллер АЦП. Обмен данными между микроконтроллером и компьютером осуществляется посредством последовательного интерфейса RS-232 и конвертора «RS-232–USB», выполненного на микросхеме FT-232.

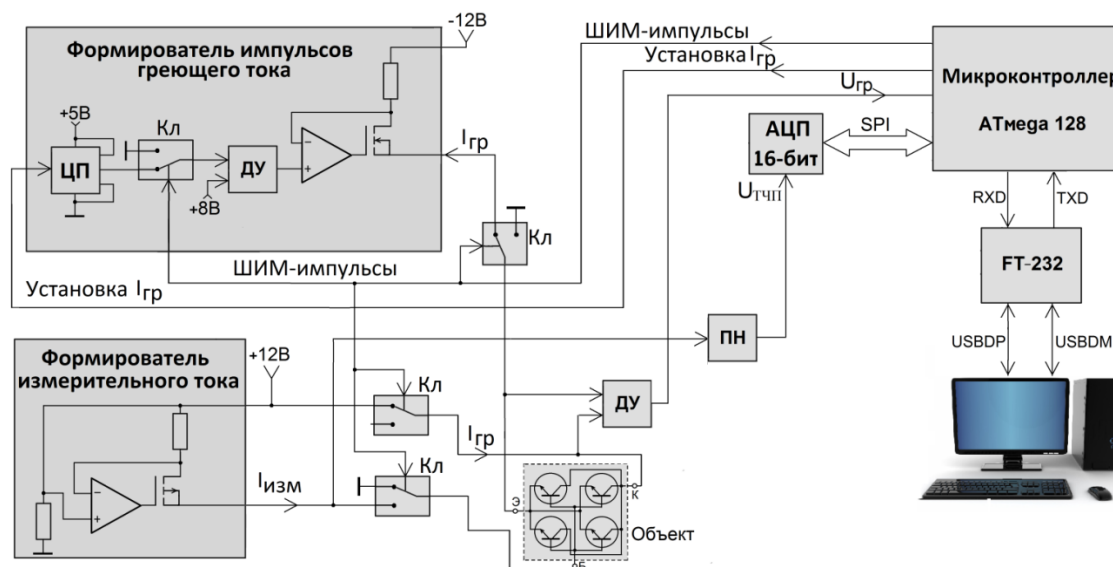


Рис. 1. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса:
 ЦП – цифровой потенциометр; Кл – электронный переключатель;
 ДУ – дифференциальный усилитель; ПН – повторитель напряжения;
 FT-232 – конвертор интерфейса RS-232 в USB

Специализированное программное обеспечение включает в себя управляющую программу для микроконтроллера и программу обработки данных для компьютера. Первая обеспечивает функционирование измерителя согласно установленным оператором режимам и параметрам измерений. Вторая – общее управление процессом измерения и обработку результатов измерений: передачу микроконтроллеру информации о режимах и параметрах измерения; представление информации, переданной от микроконтроллера, в удобной для анализа форме; вычисление модуля и фазы теплового импеданса; определение компонент теплового сопротивления; анализ переходной характеристики; диагностика нештатных ситуаций и ряд других сервисных функций.

3. Измерение теплового сопротивления СВЧ-усилителя стандартным методом

Объектом исследований являлась гибридная интегральная схема СВЧ-усилителя мощности УМ-1015 (производство «АО «НПП «Пульсар», г. Москва), включающая в себя четыре кремниевых кристалла, в которых сформированы мощные биполярные транзисторы. Выходная импульсная мощность усилителя 700 Вт, максимальная рабочая частота – 1,5 ГГц. Кристаллы монтируются на основание корпуса пайкой эвтектикой «золото-кремний». Усилитель кроме биполярных транзисторов содержит также схемы согласования по входу и выходу.

В процессе измерения объект подключался к формирователю греющих импульсов по схеме с общей базой. Разогрев кристаллов биполярных транзисторов осуществлялся серией импульсов греющего тока амплитудой 6000 мА, протекающих по цепи «коллектор-эмиттер». Измерение ТЧП, в качестве которого использовалось напряжения $U_{ЭБ}$, производилось с временной задержкой относительно окончания каждого импульса, равной 40 мкс. Температурный коэффициент напряжения, связывающий температуру T_j с напряжением $U_{ЭБ}$, для УМ-1015 равен 2,058 мВ/К.

Для определения оптимальной длительности импульсов греющего тока предварительно измерялась переходная характеристика. Для этого через объект пропускались импульсы греющего тока, длительность которых возрастала от 1 до 600 мс с постоянным по логарифмической шкале шагом (50 импульсов на декаду). Результат измерения переходной характеристики представлен в верхнем окне на рис. 2.

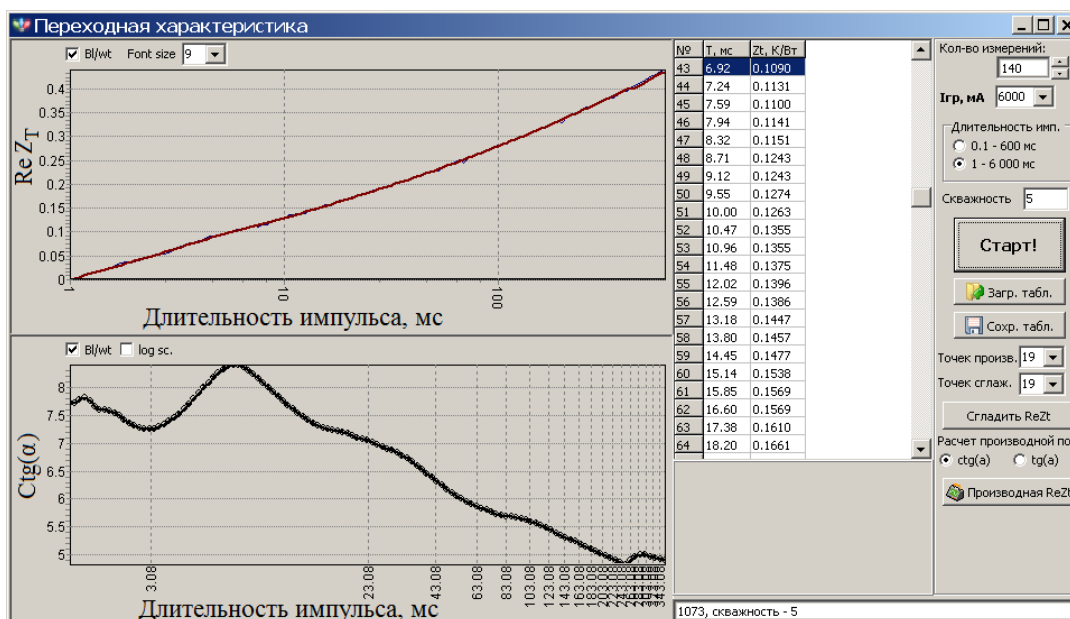


Рис. 2. Переходная характеристика (вверху) и результат ее обработки (внизу)

Выявление особенностей переходной характеристики производилось путем вычисления ее производной. Результат такой обработки показан в нижнем окне на рис. 2. Максимум графика в нижнем окне соответствует оптимальной длительности импульса, значение которой равно 6,92 мс.

Результат измерения стандартным методом при установленной длительности импульсов 6,9 мс представлен на рис. 3. По оси абсцисс отложен порядковый номер измерения ТЧП, которые производились в паузах между греющими импульсами с временной задержкой 40 мкс относительно окончания каждого импульса. Временной интервал между соседними измерениями ТЧП составлял 13 мкс. Тепловое сопротивление определялось на основе вычисления разности температур кристалла до и после греющего импульса с последующим усреднением по всем импульсам. Значение теплового сопротивления «переход-корпус» для микросхемы усилителя мощности УМ-1015 составило 0,324 К/Вт.

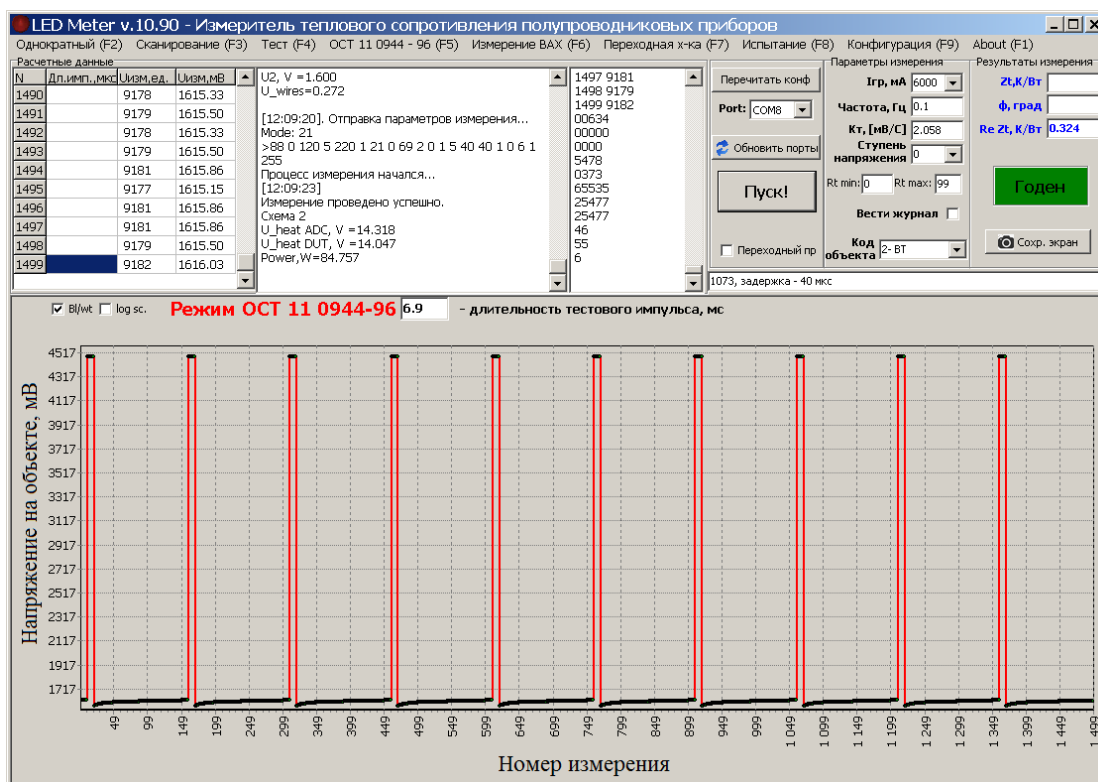


Рис. 3. Результат измерения теплового сопротивления усилителя УМ-1015т стандартным методом

На результат измерения теплового сопротивления кроме длительности греющих импульсов оказывает влияние время задержки. Чтобы исключить это влияние, требуется аппроксимировать результаты измерения ТЧП к моменту окончания греющих импульсов. Это можно сделать на основе анализа кривой остывания – зависимости температуры кристаллов T_j от времени в паузах между импульсами. Эксперименты показали, что эта зависимость, носит корневой характер, что подтверждает теоретические расчеты, сделанные в работе [8]. Исключением являются нескольких точек на начальном участке, где проявляются электрические переходные процессы, связанные с инъекцией неосновных носителей заряда и последующим их рассасыванием.

Преобразовав зависимость $T_j(t)$ в зависимость $T_j(\sqrt{t})$, и рассчитав коэффициенты линейной регрессии, можно определить температуру T_j в момент окончания греющего импульса, т.е. в момент времени $t=0$. Результаты такого расчета приведены на рис. 4.

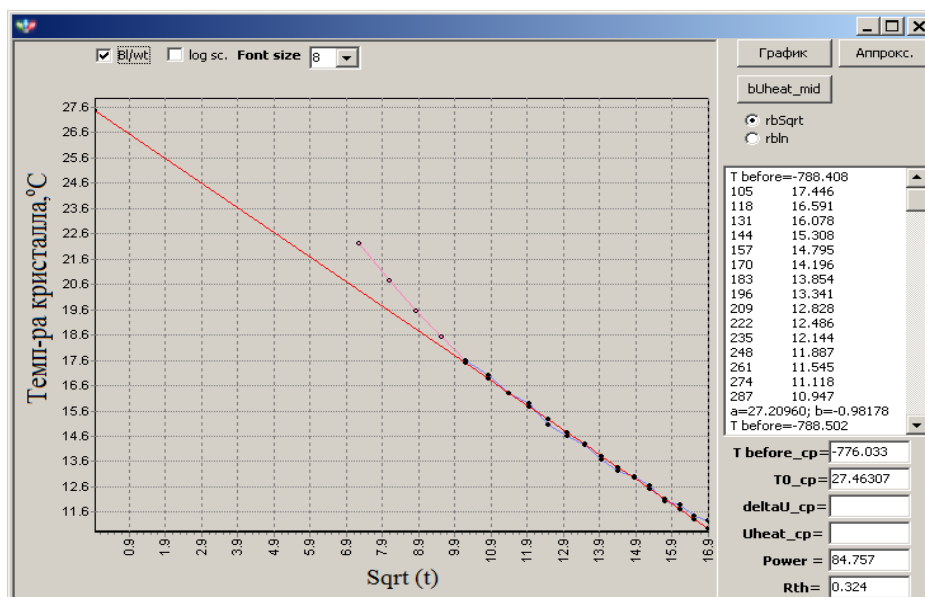


Рис. 4. Линеаризованная зависимость $T_j(\sqrt{t})$ после окончания импульса греющего тока

4. Измерение теплового сопротивления модуляционным методом

В модуляционном методе нагрев объекта измерения осуществляется путем пропуска через него последовательности импульсов греющего тока с фиксированным периодом следования и изменяющейся по гармоническому закону длительностью. На рис. 5 в верхнем окне показана зависимость длительности импульса от его номера, которая определяет временную зависимость греющей мощности $P(t)$ на установленной частоте модуляции 10 Гц. В нижнем окне показана аналогичная зависимость температуры кристаллов $T_j(t)$, которая имеет схожий с $P(t)$ характер, но сдвинута относительно ее по фазе на угол φ . Отношение амплитуд температуры кристаллов $T_j(t)$ и рассеиваемой в объекте мощности $P(t)$ определяет модуль $Z_T(f)$ теплового импеданса на частоте модуляции f , а отношение мнимой $\text{Im } T_j$ и вещественной $\text{Re } T_j$ Фурье-трансформант на частоте модуляции определяет тангенс фазы φ . При установленной частоте модуляции 10 Гц измеренное значение модуля теплового импеданса равно 0,240 К/Вт, а фазы – примерно 15° .

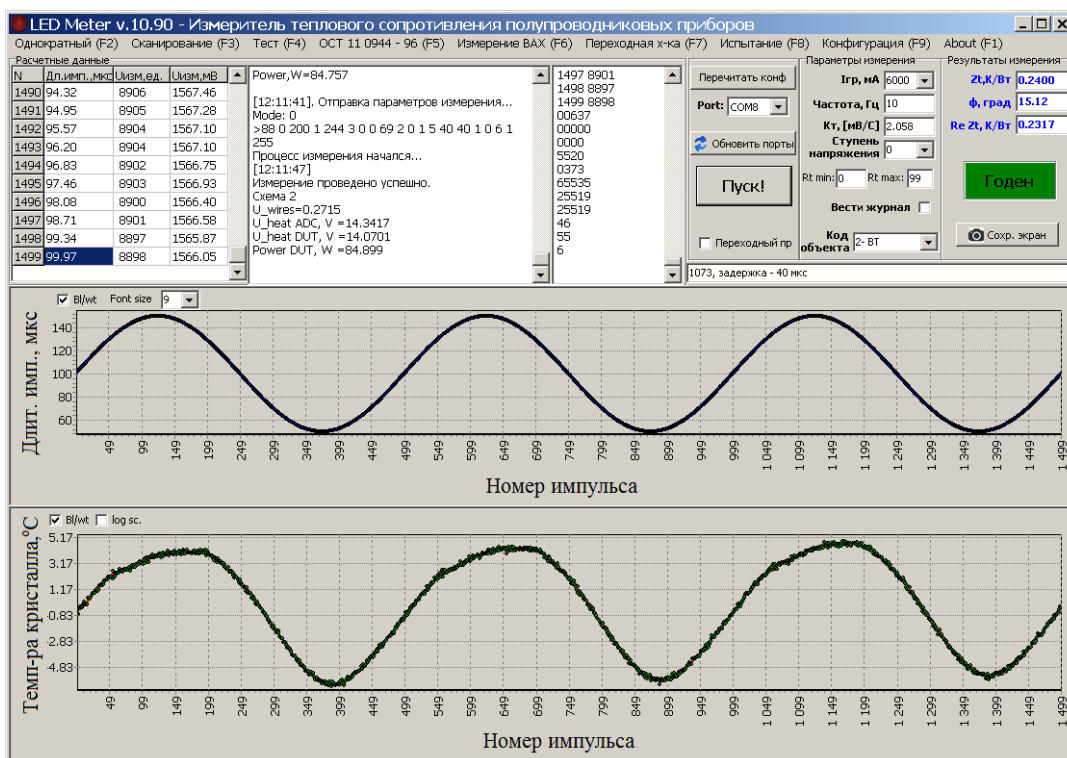


Рис. 5. Осциллограмма температуры кристаллов микросхемы УМ-1015

Для определения теплового сопротивления «переход-корпус» производилось измерение зависимости модуля $Z_T(f)$, фазы $\varphi(f)$ и вещественной части $Re Z_T(f)$ теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности f . Результаты измерения $Re Z_T(f)$ показаны в верхнем окне на рис. 6. В зависимости $Re Z_T(f)$ имеется точка перегиба, связанная с компонентой теплового сопротивления «переход-корпус» R_{Tjc} . Для определения этой компоненты в каждой точке графика производилось вычисление производной dR_{Tjc}/df , после чего вычислялась зависимость $(dR_{Tjc}/df)^{-1}$ от теплового сопротивления R_T . Результат такой обработки представлен в нижнем окне на рис. 6. Максимум на графике соответствует компоненте теплового сопротивления R_{Tjc} . Для исследуемого образца оно получилось равным 0,320 К/Вт, что хорошо согласуется с результатом измерения, полученным стандартным методом.

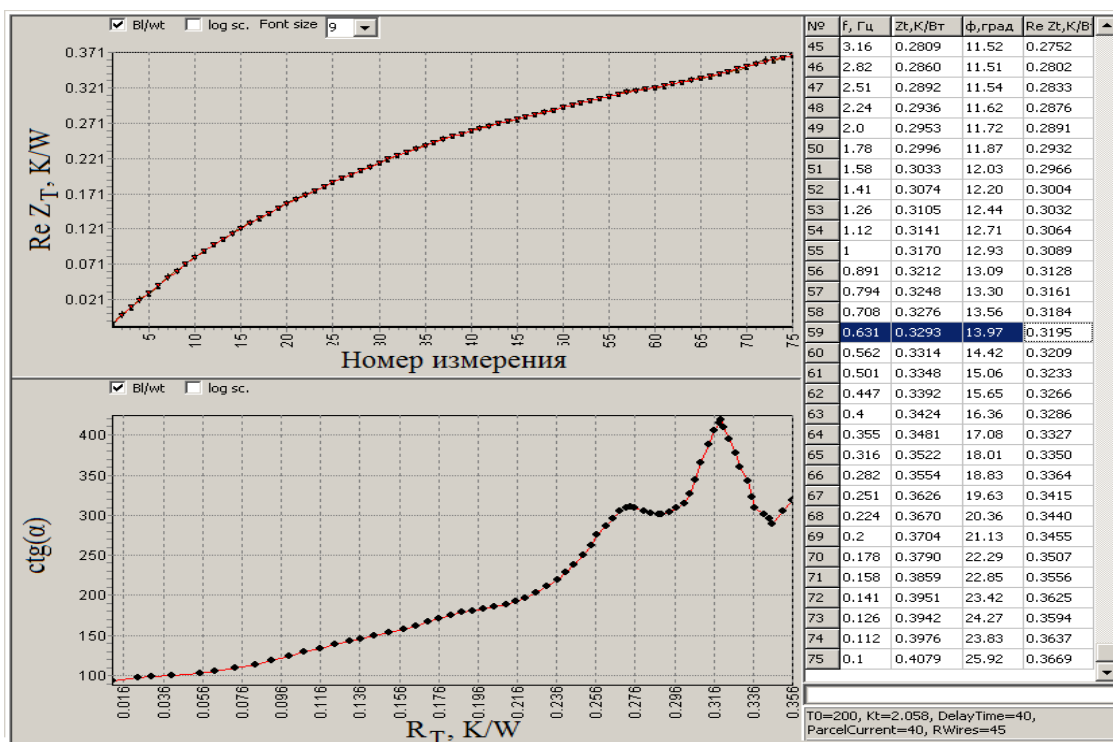


Рис. 6. Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса (вверху) и результат ее обработки (внизу)

Заключение

Проведенные исследования показали, что измерение теплового сопротивления $R_{Tjс}$ гибридной интегральной схемы СВЧ-усилителя мощности на биполярных транзисторах возможно двумя методами – стандартным и модуляционным. На результаты измерения $R_{Tjс}$ влияют два фактора, а именно, длительность импульсов греющего тока и время задержки перед измерением температурочувствительного параметра. Для установления оптимальной длительности греющих импульсов в стандартном методе предложено предварительно измерять переходную характеристику с последующим ее анализом. Чтобы исключить влияние времени задержки предложено аппроксимировать температуру кристалла к моменту окончания греющего импульса. Аппроксимация осуществляется на основе расчета коэффициентов линейной регрессии в предположении, что кривая остывания кристаллов имеет корневой характер. Результаты измерения теплового сопротивления обоими методами хорошо согласуются между собой. При использовании стандартного

метода значение R_{Tjc} получилось равным 0,324 К/Вт, при использовании модуляционного метода – 0,320 К/Вт.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-01134.

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. С.4-6.
3. Сергеев В.А., Ходаков А.М., Тарасов Р.Г. Расчет и измерение тепловых параметров монолитных интегральных схем СВЧ-усилителей в составе выходных усилителей мощности X-диапазона. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.8.12>
4. Mahalingam M., Mares E. Infrared temperature characterization of high power RF devices. *2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2001. V.3. P.2199-2202. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2001.967352>
5. He J., Mehrotra V., Shaw M.C. Ultra-high resolution temperature measurement and thermal management of RF power devices using heat pipes. *11th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. ISPSD'99 Proceedings*. 1999. P.145-148. <https://doi.org/10.1109/ISPSD.1999.764083>
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. V.65. №5. P.1739-1744. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2814921>
7. 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 D.L., Oettinger F.F. Transient Thermal Response Measurements of Power Transistors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics. Control Instruments*. 1976. №2. P. 134-142. <https://doi.org/10.1109/PESC.1974.7074340>
9. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*. 2018. V.80. P.205-212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.024>
10. Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шорин А.М. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация. *Автоматизация процессов управления*. 2017. №2 (48). С.98-105.
11. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерения теплового импеданса мощных транзисторов. *Радиотехника*. 2017. №6. С.83-90.
12. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Куликов А.А., Шорин А.М. Сравнительный анализ стандартного и модуляционного методов измерения теплового сопротивления мощных биполярных транзисторов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2019. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.3>

Для цитирования:

Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Тарасов Р.Г. Сравнительный анализ методов измерения тепловых параметров интегральных СВЧ-усилителей мощности на биполярных транзисторах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.11>