

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.13>

УДК: 681.518.3

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ НА GaN

В.И. Смирнов^{1,2}, А.А. Гавриков¹, И.В. Шуков³, А.А. Шалаевский^{3,4}, В.Ф. Нейчев²

¹ Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук,
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

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

³ АО «Светлана-Рост», 194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса д. 27.

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)
им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2024 г.

Аннотация. Представлены результаты измерений теплового сопротивления нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов двух типов: с гетеропереходом и МДП-структурой в цепи затвора. Для транзисторов с гетеропереходом в качестве температурочувствительного параметра (ТЧП) использовано напряжение на затворе $U_{зи}$, а для транзисторов с МДП-структурой – напряжение между стоком и истоком $U_{си}$. Измерение теплового сопротивления осуществлялось стандартным методом с использованием нагрева транзисторов импульсами тока постоянной длительности и модуляционным методом, в котором нагрев транзисторов производился переменной мощностью с гармоническим законом модуляции. Результаты измерений хорошо согласуются между собой, что указывает на корректность использования модуляционного метода. Достоинством модуляционного метода является возможность измерения компонент теплового сопротивления, связанного с особенностями конструкции объекта измерения.

Ключевые слова: теплоэлектрические процессы, тепловое сопротивление, СВЧ транзисторы, нитрид галлия, модуляционный метод.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Гавриков Андрей Анатольевич, a.gavrikoff@gmail.com

Введение

Нитрид галлия стали активно использовать в 90-х годах прошлого века для изготовления элементов оптоэлектроники. Освоение технологии формирования двойных гетероструктур из GaN и твердых растворов на его основе позволило резко повысить эффективность излучения светодиодов и полупроводниковых лазеров в широком спектральном диапазоне [1]. Затем акцент в использовании GaN сместился в область силовой СВЧ-электроники. Этому способствовали особые свойства нитрида галлия, в первую очередь, высокие значения скорости насыщения электронов и пробивного напряжения, а также относительно хорошая теплопроводность [2]. Это привело к созданию мощных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT – High Electron Mobility Transistor), обладающих высокими значениями удельной мощности и рабочей частоты [3]. Дополнительными преимуществами приборов на основе нитрида галлия является возможность работы в условиях повышенной радиации и температуры [4].

Высокая мощность HEMT-транзисторов сопровождается значительным повышением температуры их активной области (температуры перехода T_j), что требует эффективного отвода тепла к корпусу транзистора и далее в окружающую среду. Эффективность отвода тепла характеризуется тепловым сопротивлением «переход-корпус» R_{Tjc} , определяемого выражением [5]:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{I_{гр} \cdot U_{гр}},$$

где T_j и T_c – температуры p - n -перехода и корпуса транзистора соответственно; P – мощность, рассеиваемая в транзисторе при протекании через него греющего тока $I_{гр}$; $U_{гр}$ – падение напряжения на транзисторе.

Температура перехода T_j определяется косвенным способом на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно зависящего от температуры кристалла. Зарубежными стандартами в качестве ТЧП для MOSFET-транзисторов с вертикальной структурой рекомендуется использовать напряжение между истоком и стоком $U_{СИ}$ при закрытом канале [6], для IGBT-транзисторов – напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$ [7], для биполярных транзисторов – напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ [8]. Для НЕМТ-транзисторов стандарты для измерения теплового сопротивления пока не разработаны.

Основу НЕМТ-транзистора составляет гетероструктура из n -GaAlN и нелегированного GaN, в котором имеется потенциальная яма с высокой концентрацией свободных электронов – двумерный электронный газ (ДЭГ). Этот узкий слой ДЭГ представляет собой канал НЕМТ-транзистора. Поскольку влияние процессов рассеяния электронов на ионизированных примесях минимально, подвижность электронов в канале высока, что и обеспечивает высокие частотные свойства таких транзисторов. Одним из недостатков НЕМТ-транзисторов является то, что они являются нормально-открытыми, т.е. проводят электрический ток при напряжении на затворе $U_{зи} = 0$. Это создает определенные проблемы разработчикам, использующим НЕМТ-транзисторы в коммутирующих ток устройствах. Чтобы сделать их нормально-закрытыми, используется формирование под затвором слоя p -типа проводимости [9]. Альтернативное решение проблемы – создание каскодной структуры, в которой НЕМТ-транзистор объединяют с низковольтным кремниевым МДП-транзистором с низким сопротивлением канала [2].

Еще одной проблемой НЕМТ-транзисторов является относительно невысокое значение напряжения на затворе, которое не должно превышать 6 В [10]. Это обстоятельство делает невозможным использование типовых

драйверов, управляющих работой кремниевых MOSFET транзисторов с управляющими напряжениями до 15 В. Для увеличения максимально допустимого напряжения на затворе используют формирование подзатворного слоя диэлектрика, например, из Si_3N_4 или Al_2O_3 .

Все рассмотренные выше структуры НЕМТ-транзисторов имеют латеральную структуру, т.е. канал из двумерного электронного газа параллелен поверхности кристалла. Это делает возможным возникновение поверхностного электрического пробоя, что ограничивает напряжение на транзисторе величиной примерно 650 В. Для создания НЕМТ-транзисторов с рабочими напряжениями выше 1000 В необходимы НЕМТ-транзисторы с вертикальной структурой, аналогичной той, что имеется в мощных кремниевых MOSFET и IGBT. Такие НЕМТ-транзисторы создаются на основе структур GaN-на-GaN или GaN-на-Si [11]. Отдельные зарубежные фирмы наладили производство таких транзисторов, но вопрос об их широком производстве пока открыт.

Таким образом, мощные нитрид-галлиевые НЕМТ-транзисторы хотя и широко представлены на рынке, но усовершенствование их структуры с целью улучшения основных характеристик продолжается. Возможно, это обстоятельство сдерживает разработку стандартов для измерения теплового сопротивления НЕМТ-транзисторов, хотя востребованность в таких измерениях, безусловно, имеется. Это означает, что для каждого типа НЕМТ-транзисторов при измерении их теплового сопротивления необходим индивидуальный подход к выбору температурочувствительного параметра.

1. Объект и задачи исследования

Объектами исследования являлись мощные GaN-транзисторы производства АО «Светлана-Рост», входящие в состав СВЧ-усилительных модулей (рис. 1), а также GaN-транзисторы АП7266Б9 в корпусе КТ-28-2 производства АО «ВЗПП-С» [12]. Первый объект представляет собой нормально открытый НЕМТ-транзистор с гетеропереходом в цепи затвора, что делает возможным использование в качестве ТЧП напряжения $U_{зи}$. Следует отметить,

что максимальный входной ток затвора у данных транзисторов не должен превышать 0,1 мА, поэтому в процессе измерения их теплового сопротивления использовался измерительный ток 0,08 мА. Предварительно измеренное значение температурного коэффициента напряжения (ТКН), связывающего температуру кристалла транзистора с $U_{зи}$, составило -4,62 мВ/К.

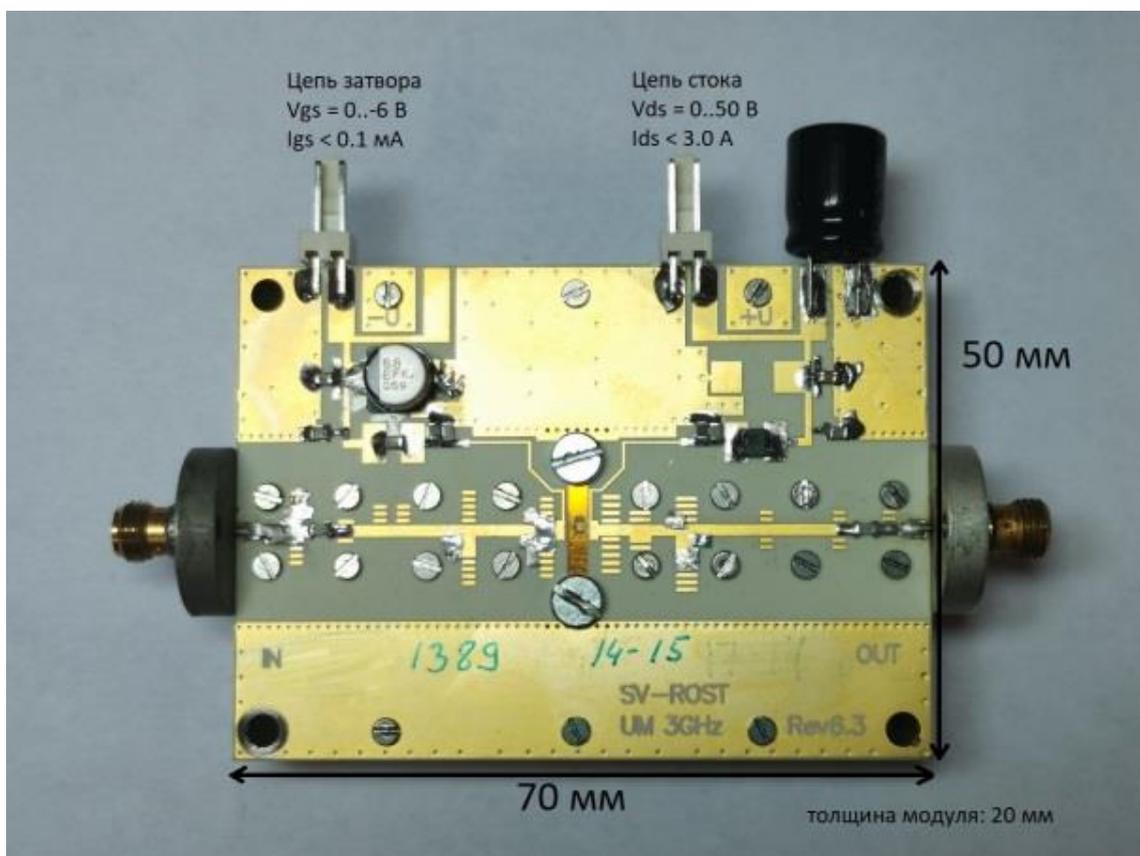


Рис. 1. СВЧ-усилительный модуль на мощном GaN-транзисторе.

Второй объект представляет собой НЕМТ-транзистор с МДП-структурой в цепи затвора. Максимально допустимые значения напряжения $U_{си}$ и тока стока I_C составляют соответственно 650 В и 20 А. Ток утечки через затвор у такого транзистора не превышает 15 мкА, поэтому использовать в качестве ТЧП напряжение $U_{зи}$ не представляется возможным. Сопротивление канала при $I_C = 20$ А относительно велико – около 100 мОм, что позволяет использовать данный параметр в качестве ТЧП. Измеренное значение ТКН, связывающее температуру кристалла с напряжением $U_{си}$ между стоком и истоком, составило 0,263 мВ/К при измерительном токе 100 мА.

2. Измеритель теплового сопротивления

Измерение теплового сопротивления GaN-транзисторов производилось с помощью аппаратно-программного комплекса, описанного в [13]. В основу работы комплекса положен модуляционный метод измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов [14]. В отличие от метода на основе измерения переходной тепловой характеристики, в котором используется нагрев объекта последовательностью импульсов с нарастающей по логарифмическому закону длительностью [15], в модуляционном методе объект нагревают переменной тепловой мощностью. Для этого через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока с модулированной по гармоническому закону длительностью. Такая широтно-импульсная модуляция вызывает периодическое изменение температуры перехода T_j , сдвинутые по фазе относительно переменной составляющей мощности. Измерив амплитуды переменных составляющих тепловой мощности P_1 и температуры перехода T_{j1} , можно рассчитать модуль Z_T и фазу φ теплового импеданса на частоте модуляции ν :

$$Z_T = \frac{T_{j1}}{P_1}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} T_{j1}}{\operatorname{Re} T_{j1}},$$

где $\operatorname{Im} T_{j1}$ и $\operatorname{Re} T_{j1}$ – мнимая и вещественная Фурье-трансформанты переменной составляющей температуры перехода.

Если объект имеет сложную конструкцию, через элементы которой тепловой поток распространяется от нагретого кристалла к корпусу и далее в окружающую среду, то общее тепловое сопротивление состоит из нескольких компонент. Для определения значений этих компонент производится измерение зависимости теплового импеданса (модуля Z_T , фазы φ и вещественной части $\operatorname{Re} Z_T$) от частоты модуляции греющей мощности ν . Компоненты теплового сопротивления проявляются в зависимости $\operatorname{Re} Z_T(\nu)$ в виде пологих участков или точек перегиба. Для выявления таких участков используется операция дифференцирования $\operatorname{Re} Z_T(\nu)$ по частоте модуляции ν и построение графика $[d\operatorname{Re} Z_T/d\nu]^{-1}$ как функции аргумента $\operatorname{Re} Z_T$. На графике компоненты теплового

сопротивления проявляются в виде локальных максимумов, положение которых относительно оси абсцисс определяет значения компонент.

Аппаратно-программный комплекс включает в себя импульсный характериограф полупроводниковых приборов (ИХПП), компьютер и специализированное программное обеспечение. Работой ИХПП управляет микроконтроллер, который согласно установочным данным о режимах измерения и рабочих параметрах, полученным из компьютера, формирует импульсы греющего тока с тем или иным законом модуляции, производит измерение напряжения на вершине греющих импульсов и в паузах между ними, производит предварительную оценку результатов измерения и передачу их в компьютер для последующей обработки. Компьютер обрабатывает полученную информацию, представляет результаты обработки в удобной для анализа форме, ведет журнал с результатами измерения, а также осуществляет ряд других сервисных функций. В качестве примера на рис. 2 приведен результат измерения теплового импеданса на частоте модуляции 25 Гц. В верхнем графическом окне показана осциллограмма переменной составляющей мощности, пропорциональная длительности греющей мощности, в нижнем окне – осциллограмма температуры перехода. Объектом измерения являлся GaN-транзистор производства АО «Светлана-Рост». Амплитуда греющих импульсов составляла 2000 мА. Измеренные значения модуля Z_T и фазы φ теплового импеданса, показанные в верхнем правом углу, равны соответственно 2,04 К/Вт и 7,9 град.

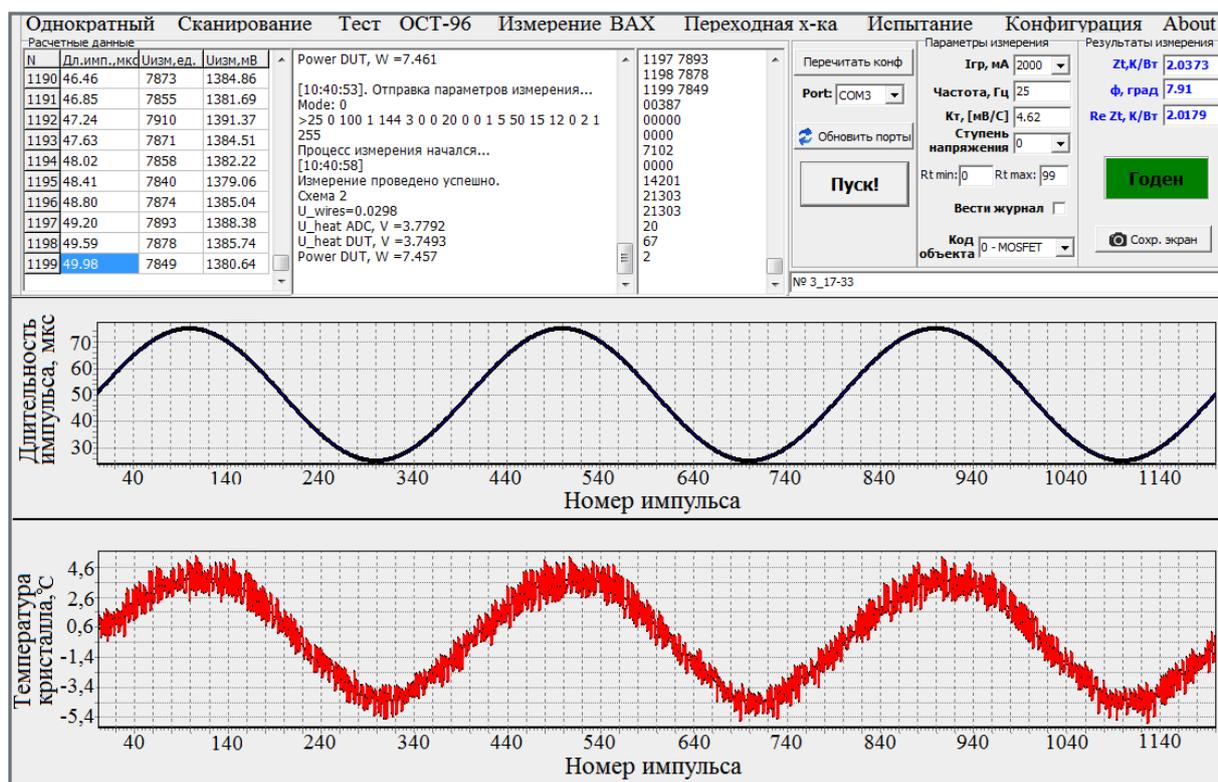


Рис. 2. Главное окно управляющей программы аппаратно-программного комплекса.

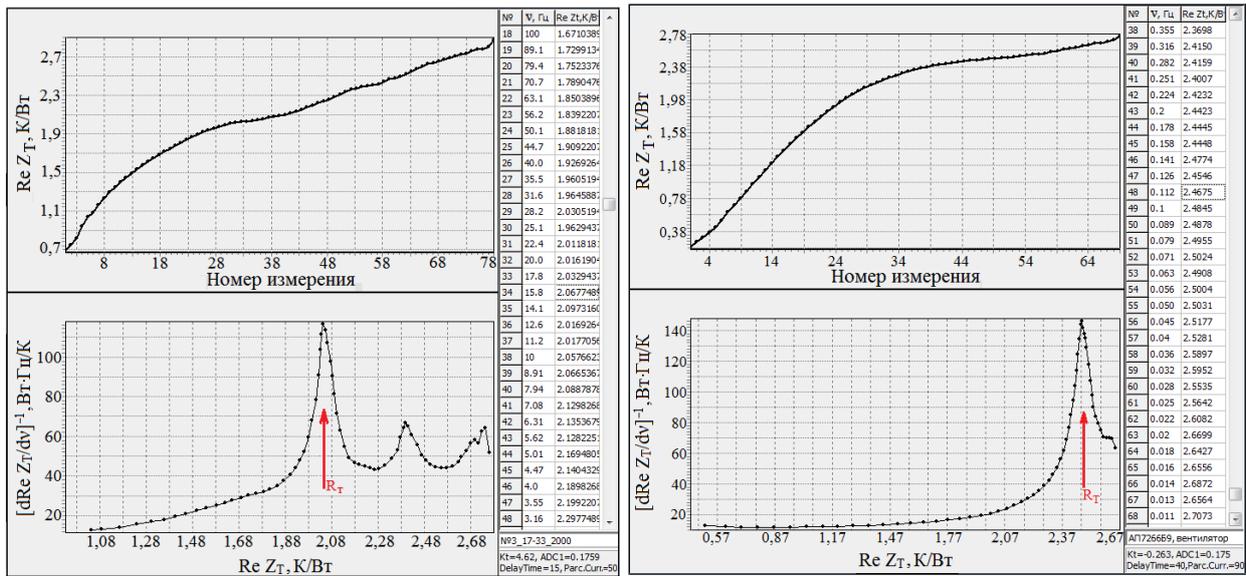
3. Результаты исследований и их анализ

Целью проведенных исследований была проверка возможности измерения теплового сопротивления нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов различного типа с использованием модуляционного метода и метода, опирающегося на измерение переходной тепловой характеристики. Объектами измерения являлись НЕМТ-транзисторы с гетеропереходом и с МДП-структурой в цепи затвора. При измерении теплового сопротивления модуляционным методом для транзисторов 1-го типа в качестве ТЧП использовалось напряжение $U_{зи}$ при протекании через гетеропереход измерительного тока $I_{изм} = 0,08$ мА. Амплитуда импульсов греющего тока при этом устанавливалась равной $I_{гр} = 2$ А, период следования импульсов 100 мкс. Измерение ТЧП производилось после окончания каждого греющего импульса с временной задержкой 15 мкс, достаточной для завершения переходных электрических процессов, возникающих при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения ТЧП. Для транзисторов 2-го типа в качестве ТЧП использовалось напряжение $U_{си}$ при

протекании через канал $I_{\text{изм}} = 100$ мА. Значение $I_{\text{гр}}$ устанавливалось равным 16 А, период следования импульсов – 400 мкс, время задержки – 40 мкс.

Компоненты теплового сопротивления определялись на основе анализа зависимости вещественной части теплового импеданса $\text{Re } Z_T$ от частоты модуляции ν греющей мощности. Результаты измерения $\text{Re } Z_T(\nu)$ для обоих объектов показаны в верхних графических окнах на рис. 3. Справа от графиков приведены значения частоты модуляции ν и $\text{Re } Z_T$. Видно, что на графиках слабо проявляются особенности в виде точек перегиба. Для выявления этих особенностей в графиках $\text{Re } Z_T(\nu)$ производилось их дифференцирование и вычисление $[\text{dRe } Z_T/\text{d}\nu]^{-1}$ как функции аргумента $\text{Re } Z_T$. Результат таких вычислений показан в нижних графических окнах на рис. 3. Для НЕМТ транзистора с гетеропереходом, входящего в состав СВЧ-усилительного модуля, на графике проявляются три локальных максимума, соответствующих трем компонентам теплового сопротивления (рис. 3а). Положение 1-го максимума относительно оси абсцисс определяет значение компоненты теплового сопротивления «переход-корпус». Данная компонента проявляется на частоте модуляции $\nu = 16$ Гц, а ее значение $R_T = 2,06$ К/Вт. Остальные максимумы связаны с наличием на пути распространения теплового потока платы DBC (Direct Bond Copper – прямое соединение меди), представляющей собой керамическую подложку из Al_2O_3 или AlN , с двух сторон которой методом спекания присоединена медная фольга.

НЕМТ-транзистор с МДП-структурой в цепи затвора в процессе измерений теплового сопротивления крепился к радиатору непосредственно, что отразилось в наличии только одного максимума, соответствующего компоненте «переход-корпус». Значение этой компоненты, показанной на рис. 3б стрелкой, равно $R_T = 2,48$ К/Вт. Частота модуляции греющей мощности, на которой проявляется данная компонента теплового сопротивления, равна 0,1 Гц.



а)

б)

Рис. 3. Компоненты теплового сопротивления НЕМТ-транзисторов: а) с гетеропереходом в цепи затвора; б) с МДП-структурой в цепи затвора.

Альтернативным вариантом измерения теплового сопротивления «переход-корпус», является стандартный метод [16], основанный на анализе переходной тепловой характеристики (ПТХ), представляющей собой зависимость теплового импеданса Z_T от длительности греющих импульсов τ . Целью анализа является определение длительности $\tau_{и}$, соответствующей условию $\tau_{и} = (3-5)\tau_{т}$, где $\tau_{т}$ –тепловая постоянная времени «кристалл-корпус». Выполнение этого условия означает, что при длительности греющих импульсов $\tau_{и}$ температура кристалла достигает стационарного значения, а температура корпуса остается неизменной. На графике $Z_T(\tau)$ это проявляется в виде пологого участка при длительности $\tau \approx \tau_{и}$ (верхний график на рис. 4). Для определения $\tau_{и}$ производится дифференцирование измеренной зависимости $Z_T(\tau)$ и вычисление $[dZ_T/d\tau]^{-1}$ как функции τ [17]. Результат такой обработки для НЕМТ-транзистора с гетеропереходом в цепи затвора представлен на нижнем графике рис. 4. Положение максимума на графике соответствует значению $\tau_{и} = 100$ мс.

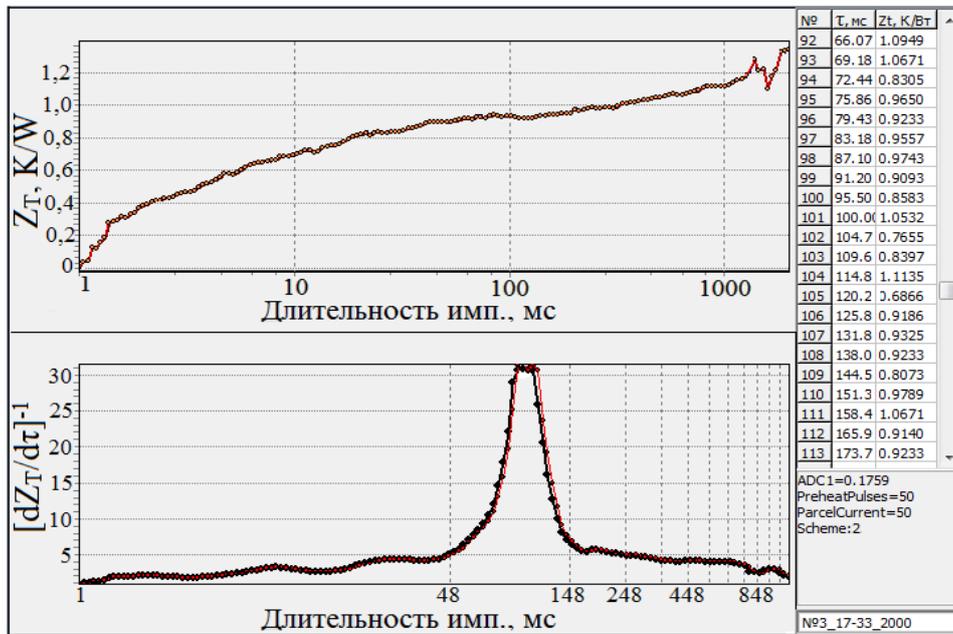


Рис. 4. Переходная тепловая характеристика для НЕМТ-транзистора с гетеропереходом.

При измерении теплового сопротивления «переход-корпус» стандартным методом нагрев транзистора осуществлялся пропусканием через него 10 импульсов греющего тока амплитудой 2 А, периодом следования $T = 500$ мс и длительностью $\tau_{и} = 100$ мс. После каждого импульса производились измерения ТЧП, что давало возможность определить временную зависимость температуры кристалла в процессе его остывания. Учитывая, что процесс остывания описывается корневой зависимостью [15], можно экстраполяцией сигнала ТЧП определить температуру кристалла в момент окончания греющего импульса. Зная рассеиваемую мощность P в транзисторе и приращение температуры кристалла ΔT_j , можно определить тепловое сопротивление «переход-корпус». Результат такого измерения для НЕМТ-транзистора с гетеропереходом представлен на рис. 5.

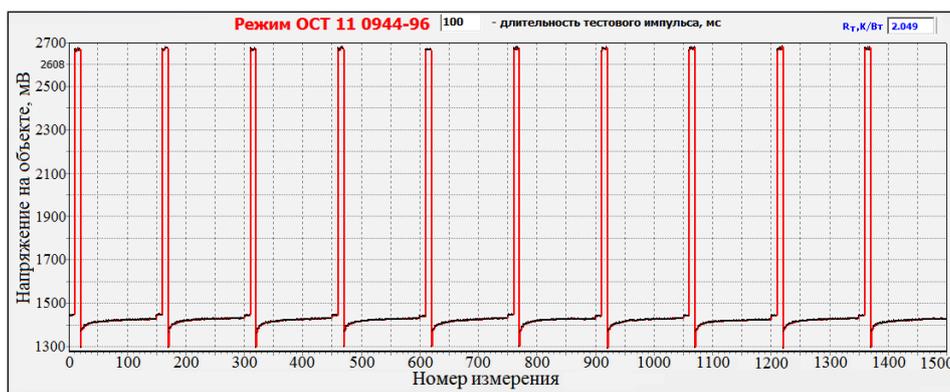


Рис. 5. Измерение теплового сопротивления стандартным методом.

Полученное значение теплового сопротивления $R_T = 2,05$ К/Вт, что хорошо согласуется со значением, полученным модуляционным методом ($R_T = 2,06$ К/Вт). Измерения R_T у транзистора с МДП-структурой в цепи затвора, проведенные модуляционным и стандартными методами, также показали хорошее согласие между собой (2,48 и 2,42 К/Вт соответственно). Это подтверждает корректность использования модуляционного метода, основанного на нагреве объекта переменной тепловой мощностью. Вместе с тем, модуляционный метод, в отличие от стандартного метода, позволяет измерять компоненты теплового сопротивления всего пути, по которому распространяется тепловой поток.

Заключение

Существует несколько типов нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов, отличающихся между собой структурой, в частности с гетеропереходом или МДП-структурой в цепи затвора, каскадные структуры или структуры с вертикальным каналом. Для всех этих типов требуется индивидуальный выбор ТЧП, используемого для измерения температуры активной области транзистора в процессе его нагрева. Проведенные исследования показали, что для НЕМТ-транзисторов с гетеропереходом в качестве ТЧП можно использовать напряжение на затворе $U_{зи}$, а для транзисторов с МДП-структурой – напряжение между стоком и истоком $U_{си}$ при протекании через транзистор фиксированного измерительного тока.

Измерение теплового сопротивления мощных НЕМТ-транзисторов на GaN можно проводить как стандартным методом, основанным на нагреве объекта импульсами греющего тока постоянной длительности, так и модуляционным методом, в котором используется нагрев объекта широтно-импульсно модулированными греющими импульсами с гармоническим законом модуляции. Оба метода дают примерно одинаковые результаты. Преимуществом модуляционного метода перед стандартным является возможность измерения компонент теплового сопротивления, связанного с особенностями конструкции объекта измерения.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Юнович А.Э. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. – 1996. – №. 5/6. – С. 2-7.
2. Перссон Э., Рентюк В. Преимущества использования нитрид-галлиевых транзисторов в силовой электронике // Силовая электроника. – 2015. – Т. 3. – №. 54. – С. 6-8.
3. Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2012. – №. 4. – С. 86-101.
4. Лидоу А., Стридом Й. Рейш Д. Технология GaN быстро завоевывает новые рынки // Компоненты и технологии. 2014. № 9. С. 155–158.
5. ГОСТ 19656.15–84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления. М.: Изд-во стандартов. 1984. 21 с.
6. Thermal Impedance Measurements for Vertical Power MOSFETs (Delta Source-Drain Voltage Method). JEDEC JESD24-3 standard
7. Thermal Impedance Measurement for Insulated Gate Bipolar Transistors – (Delta $V_{CE(on)}$ Method). JEDEC JESD24-12 standard

8. Thermal Impedance Measurements for Bipolar Transistors (Delta Base-Emitter Voltage Method). JEDEC JESD24-4 standard
9. Егоркин В. и др. Нормально-закрытый транзистор с затвором р-типа на основе гетероструктур AlGaIn/GaN // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2020. – Т. 25. – №. 5. – С. 391-401.
10. Ерофеев Е.В. и др. Мощные GaN-транзисторы с подзатворной областью на основе МДП-структур // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – №. 9. – С. 1278-1281.
11. Бондарь Д.М. Полупроводниковая микроэлектроника – 2021 г. Часть 2. SiC и GaN – основа новой силовой электроники настоящего и будущего // Электронные компоненты. 2022. №1. С. 6–16.
12. АО «Воронежский Завод Полупроводниковых Приборов - Сборка» [web]. Дата обращения 30.11.2024. URL: <https://eandc.ru/techinfo/vzpp.pdf>
13. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Kulikov A.A. Measuring thermal resistance of GaN HEMT transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. V. 67. №10. P. 4112-4117.
14. Смирнов В.И. и др. Измерение теплового импеданса мощных транзисторов // Радиотехника. – 2017. – №. 6. – С. 83-90.
15. Oettinger F., Blackburn D. Thermal resistance measurements // U.S. Government Printing Office. 1990. 72 p.
16. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М.: ГУП НПП Пульсар. 1997. 110 с.
17. Смирнов В.И. и др. Сравнительный анализ стандартного и модуляционного методов измерения теплового сопротивления мощных биполярных транзисторов // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №. 1. – С. 6-6.

Для цитирования:

Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шуков И.В., Шалаевский А.А., Нейчев В.Ф. Особенности измерения теплового сопротивления мощных СВЧ-транзисторов на GaN // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.13>