

Особенности измерения теплового сопротивления «кристалл – корпус» MIS-HEMT-транзисторов

А. Строгонов, д. т. н.¹, М. Харченко², А. Ханин³

УДК 621.382.32 | ВАК 2.2.2

MIS-HEMT-транзисторы на основе нитрида галлия все шире применяются в качестве силовых полупроводниковых приборов, для которых необходимо обеспечивать эффективный отвод тепла в процессе работы. Количественной оценкой эффективности отвода тепла от полупроводникового прибора является тепловое сопротивление «кристалл – корпус», в связи с чем важной задачей является корректное измерение его величины. В статье описан метод и оснастка для измерения теплового сопротивления «кристалл – корпус» нормально-открытых MIS-HEMT-транзисторов, рассматриваются особенности реализации этого метода.

За последнее десятилетие нитрид галлия (GaN) стал востребованным материалом для создания силовых полупроводниковых приборов. Основной предпосылкой его широкого распространения стала возможность получения недорогих качественных гетероструктур на кремниевых подложках, что позволило значительно улучшить потребительские свойства GaN и сохранить колоссальное преимущество перед классической кремниевой электроникой. Основным компонентом, созданным на основе GaN, – транзистор с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor).

HEMT является полупроводниковым прибором, функционирующим на основе иных физических принципов, чем другие транзисторы на базе Si, SiC, GaAs и т. д. Наличие спонтанной и пьезоэлектрической поляризации позволяет создать на границе полупроводниковых слоев AlGaN и GaN (обладающих разной шириной запрещенной зоны) двумерный электронный газ (2DEG). Плотность тока в канале, образованном двумерным электронным газом, на порядки величин превосходит возможности полевых транзисторов, использующих эффект поля. Такой

транзистор является униполярным, так как не обладает p-n-переходами и работает исключительно на основных носителях заряда (электронах).

Существует несколько конструкций HEMT, различающихся эффективностью и способом управления:

- depletion mode (d-mode) HEMT – нормально-открытые транзисторы, к которым относятся SB-HEMT (с затвором Шоттки) и MIS-HEMT;
- enhancement mode (e-mode) HEMT – нормально-закрытые транзисторы, к которым в основном относятся конструкции с использованием дополнительного слоя p-GaN и контактом Шоттки в качестве затвора.

MIS-HEMT (metal insulator semiconductor HEMT) – это особый вариант HEMT без изолированного затвора и без контакта Шоттки.

Для силовых полупроводниковых приборов, в том числе на базе GaN, важно обеспечить эффективный отвод тепла от кристалла. Чрезмерный нагрев негативно влияет на характеристики и надежность изделия. Для реализации хорошего теплоотвода важно знать тепловое сопротивление силового транзистора, в частности, тепловое сопротивление «кристалл – корпус». Тепловое сопротивление «кристалл – корпус» – это отношение разности температур между кристаллом и корпусом к мощности разогрева:

$$R_{t_{к-к}} = \frac{T_{кр} - T_{корп}}{P_{гр}}, \quad (1)$$

где $T_{кр}$ – температура кристалла; $T_{корп}$ – температура корпуса; $P_{гр}$ – мощность разогрева.

¹ Воронежский государственный технический университет, профессор кафедры твердотельной электроники, тел. +7 910 247-14-70, andreistrogonov@mail.ru.

² Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, АО «ВЗПП-О», harchenko@vzpp-s.ru.

³ Воронежский государственный технический университет, АО «ВЗПП-О», cool.hanin@yandex.ru.

Единицей теплового сопротивления является К/Вт или °С/Вт, причем эти значения будут эквивалентны друг другу с точки зрения относительных температур.

Теплопередача происходит в трех формах: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением. Теплопроводность – тепло передается от нагретой части к холодной внутри объекта за счет движения молекул. Конвекция – тепло передается потоком жидкости или газа от поверхности твердого нагретого тела объекта, когда существует разница температур между объектом и газом (жидкостью). Конвекцией передается большее количество тепла, чем теплопроводностью. Тепловое излучение – с поверхности объекта-донора излучается электромагнитная волна с длиной волны, соответствующей температуре поверхности. Она вызывает вибрацию молекул на объекте-реципиенте, передавая тепло. Благодаря тепловому излучению тепло может передаваться без какой-либо среды между объектами.

От кристалла транзистора тепло передается на крепление кристалла (клей или припой), выводную рамку, корпус и печатную плату при помощи теплопроводности. От поверхностей корпуса транзистора тепло передается в атмосферу за счет конвекции и излучения (рис. 1).

Как правило, значениями теплового сопротивления для конвекции и излучения пренебрегают, так как их измерение сильно зависит от различных внешних условий, в связи с чем возрастает погрешность. Для измерения теплового сопротивления для теплопроводности используются два метода: прямой и косвенный.

Прямой метод является самым простым: измеряемый транзистор нагревают током, температуру корпуса и кристалла измеряют при помощи инфракрасного пирометра и рассчитывают значение по формуле (1).

Но так как прямой метод подходит далеко не ко всем типам корпусов, чаще всего применяют косвенный метод, который основан на измерении температуры кристалла, при помощи термочувствительного параметра. Термочувствительный параметр (ТЧП) – это тот параметр, значение которого изменяется при изменении температуры, как правило, это прямое падение напряжения на р-п-переходе. Для определения температуры кристалла перед измерением теплового сопротивления требуется определить температурный коэффициент напряжения. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) – зависимость напряжения термочувствительного параметра транзистора от температуры корпуса, измеряется в мВ/°С:

$$TKH = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (2)$$

где ΔU – приращение напряжения; ΔT – приращение температуры.

Данная процедура заключается в измерении ТЧП при нескольких значениях температуры корпуса

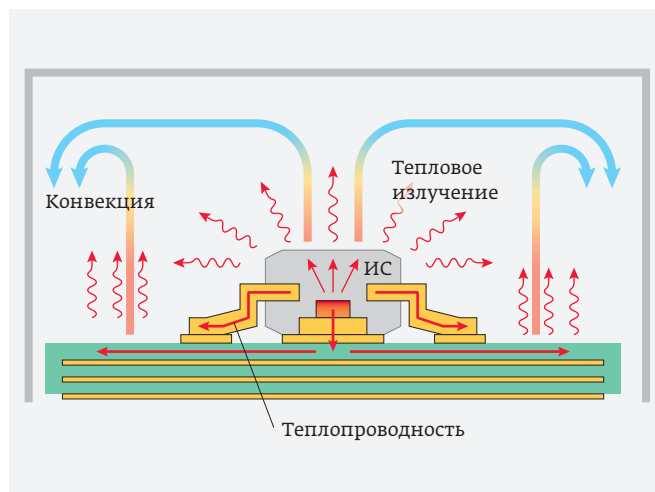


Рис. 1. Отвод тепла от кристалла транзистора

и определении температурного коэффициента ТКН согласно формуле (2). Измерения проводятся при помощи термостата, который может обеспечивать поддержание температуры в диапазоне 25–150 °С. Температуру в термостате повышают ступенями с выдержкой, достаточной для полного прогрева транзистора, при этом температура

ООО “Руднев-Шиляев”

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368

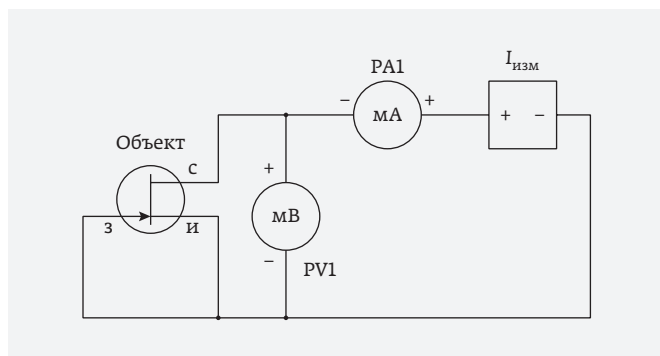


Рис. 2. Схема включения транзистора для определения ТЧП

в термостате не должна превышать максимально допустимую для данного типа транзисторов.

Косвенных методов измерения теплового сопротивления существует достаточно много, остановимся на одном из них. Для измерения теплового сопротивления транзисторов этим методом исследуемый образец нужно закрепить на теплоотводе. Затем следует измерить температуру корпуса и значение напряжения ТЧП в холодном состоянии, после чего подать на транзистор определенную разогревающую мощность и дождаться стабилизации температуры корпуса, а затем снова провести измерение температуры корпуса и значения напряжения ТЧП. На основании этих данных по формуле (3) можно рассчитать тепловое сопротивление «кристалл – корпус»:

$$Rt_{к-к} = \frac{T_{кх} + \frac{U_{ТЧПх} - U_{ТЧПг} - T_{кг}}{ТКН} - T_{кг}}{P_{гр}}, \quad (3)$$

где $T_{кх}$ – температура корпуса в холодном состоянии; $T_{кг}$ – температура корпуса в нагретом состоянии; $U_{ТЧПх}$ – напряжение на термочувствительном параметре в холодном состоянии, $U_{ТЧПг}$ – напряжение на термочувствительном параметре в нагретом состоянии; ТКН – температурный коэффициент напряжения; $P_{гр}$ – греющая мощность.

Данный метод довольно универсален, однако он применим только для полупроводниковых приборов на основе р-п-перехода.

Для измерения теплового сопротивления «кристалл – корпус» MIS-HEMT, которые не имеют р-п-перехода или барьера Шоттки, может быть применен метод, основанный на контроле сопротивления открытого канала. Суть данного метода заключается в косвенном определении приращения температуры по изменению сопротивления открытого канала транзистора ($R_{СИоткр}$) в результате его разогрева током. Измерение приращения $R_{СИоткр}$ проводят в измерительном режиме с источником тока

Таблица 1. Результаты определения ТЧП

Т, °С	$U_{ТЧП}$, мВ
50	11,641
100	12,326
150	12,570

стока, при этом в качестве термочувствительного параметра используется приращение напряжения «сток – исток» ($\Delta U_{СИ}$). Для исследуемого транзистора должна быть получена зависимость ТЧП от температуры и определен температурный коэффициент напряжения. Методика измерения основана на переключении транзистора

из режима разогрева в измерительный режим. Измерение приращений температуры канала проводят после отключения разогревающего тока, через время задержки, которое должно быть много меньше тепловой постоянной кристалла. Затем рассчитывают значение теплового сопротивления «кристалл – корпус» по следующей формуле:

$$Rt_{к-к} = \frac{U_{ТЧПх} - U_{ТЧПг}}{ТКН \cdot P_{гр}}, \quad (4)$$

Для подтверждения возможности применения данного метода измерения теплового сопротивления MIS-HEMT был проведен следующий эксперимент. Исследуемый транзистор, согласно схеме, представленной на рис. 2, был подключен к источнику-измерителю, который позволяет измерять напряжение на объекте при заданном измерительном токе (100 мА).

Исследуемый транзистор был закреплен в термостате, который обеспечивал поддержание температуры в диапазоне 50–150 °С. Транзистор выдерживался на каждой определенной температуре 10 мин, затем измерялось падение напряжения на открытом канале, после чего температура повышалась. Результаты данного эксперимента представлены в табл. 1.

Далее на основе полученных данных был рассчитан температурный коэффициент напряжения (ТКН):

$$ТКН = \frac{\Delta U_{ТЧП}}{\Delta T}. \quad (5)$$

Значение ТКН для данных транзисторов составило 0,00929 мВ/°С. Зависимость напряжения на открытом канале от температуры представлена на рис. 3.

Для определения теплового сопротивления «кристалл – корпус» была разработана специальная оснастка, которая состоит из медного теплоотвода с размерами 120 × 95 × 10 мм и ключа, который обеспечивает переключение режимов работы «нагрев» и «измерение». Схема оснастки приведена на рис. 4.

В качестве источника греющего тока 10 А использовался лабораторный блок питания АКТАКОМ АТН-1237В. Для

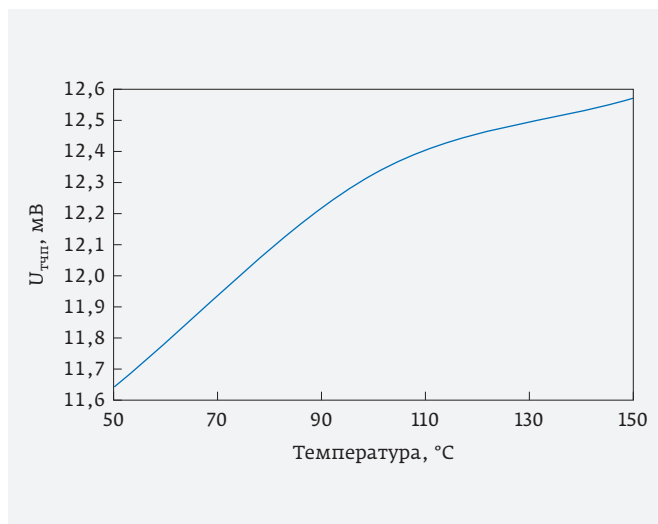


Рис. 3. Зависимость напряжения на открытом канале от температуры

измерения напряжения ТЧП транзистора использовался источник-измеритель Keithley 2400, который позволяет задавать измерительный ток (100 мА) и получать значение падения напряжения на ТЧП.

Принцип работы оснастки следующий: вначале транзистор закрепляют на теплоотводе, измеряют значение ТЧП в холодном состоянии, затем транзистор выдерживают в режиме разогрева до стабилизации температуры корпуса и измеряют значение ТЧП в горячем состоянии. Температуру корпуса контролировали при помощи тепловизора. На основе этих данных и величины мощности

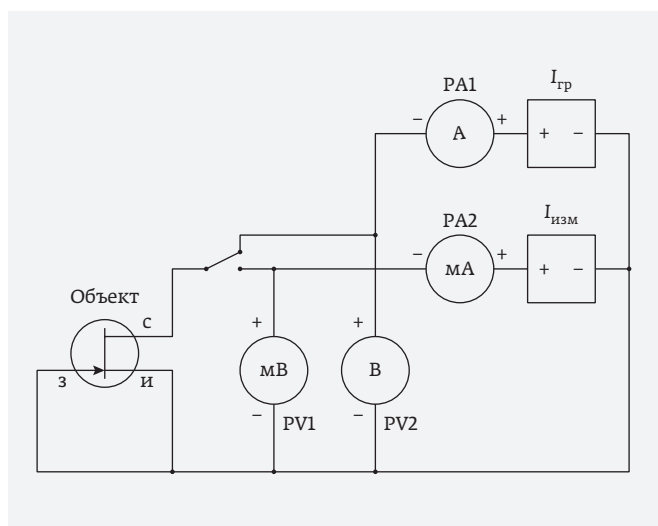


Рис. 4. Схема оснастки для измерения теплового сопротивления «кристалл – корпус»

Таблица 2. Результаты измерения теплового сопротивления «кристалл – корпус»

№ п-п	U _х , мВ	U _г , мВ	I _{гр} , А	U _{гр} , В	P, Вт	Rt _{к-к} , °C/Вт
1	10,998	11,520	10	2,69	26,9	2,1
2	10,918	11,838	10	2,74	27,4	3,6
3	10,979	11,966	10	2,72	27,2	3,9
4	10,975	11,903	10	2,75	27,5	3,6
Среднее значение						3,3

разогрева можно рассчитать тепловое сопротивление «кристалл – корпус»:

$$Rt_{к-к} = \frac{U_{ТЧПг} - U_{ТЧПх}}{ТКН \cdot P}, \quad (6)$$

где $P = I_{гр} \cdot U_{СИ}$, $I_{гр}$ – греющий ток; $U_{СИ}$ – напряжение сток-исток; $U_{ТЧПх}$ – значение ТЧП в холодном состоянии; $U_{ТЧПг}$ – значение ТЧП в горячем состоянии; ТКН – температурный коэффициент напряжения.

Результаты измерения представлены в табл. 2. Среднее значение теплового сопротивления «кристалл – корпус» MIS-HEMT транзистора составило 3,3 °C/Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На тепловое сопротивление «кристалл – корпус» оказывают влияние такие факторы, как размер кристалла, метод крепления кристалла к основанию корпуса (на клей или припой), а также, в меньшей степени, сам корпус. Известно, что с увеличением размеров кристалла уменьшается тепловое сопротивление «кристалл – корпус», так как увеличивается площадь теплоотвода. Кроме того, разные материалы, применяемые для крепления кристалла к корпусу, имеют разную теплопроводность, например теплопроводность припоя выше теплопроводности клея, соответственно тепловое сопротивление «кристалл – корпус» транзисторов, кристаллы которых посажены на припой, будет меньше, чем у транзисторов, приклеенных к основанию корпуса. Материал корпуса также оказывает влияние на тепловое сопротивление «кристалл – корпус», так как, помимо теплопроводности от кристалла к основанию корпуса, температура кристалла также рассеивается излучением сквозь материал корпуса.

Полученные результаты измерений подтверждают, что предложенный в статье метод подходит для измерения теплового сопротивления «кристалл – корпус» MIS-HEMT.