

УДК 621.382.3:62-533.65

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ОПТИЧЕСКОГО ИК МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В AlGaIn/GaN HEMT

*Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, В.С. Ежов, А.Ю. Моторин,
И.М. Аболдуев, Ю.А. Концевой*

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27

Рабочая температура HEMT (high electron mobility transistor – транзистор с высокой подвижностью электронов) не должна превышать максимально допустимого значения, указанного в технических условиях на прибор. Превышение рабочей температуры приводит к снижению работоспособности прибора вплоть до его отказа. Рассмотрены два метода измерения теплового сопротивления: электрический (по сопротивлению канала) и оптический (с помощью пирометра). Установлено, что полученные значения тепловых сопротивлений HEMT хорошо коррелируют между собой. Показано, что пирометр может быть использован для определения усреднённых по структуре температур кристалла вплоть до температур порядка 250 °C и, следовательно, может быть использован для отбраковки потенциально ненадёжных приборов.

Ключевые слова: *измерение теплового сопротивления, измерение температуры пирометром, излучательная способность поверхности, HEMT транзисторы*

Сведения об авторах: *Наталья Львовна Евдокимова, к.т.н; Владимир Викторович Долгов; Владимир Самуилович Ежов, к.т.н; Андрей Юрьевич Моторин; Игорь Михайлович Аболдуев, к.т.н; Юлий Абрамович Концевой, д.т.н.*

COMPARISON OF ELECTRICAL AND IR-OPTICAL METHODS OF TEMPERATURE MEASUREMENT OF AlGaIn/GaN HEMT

*N.L. Evdokimova, V.V. Dolgov, V.S. Ezhov, A.Yu. Motorin, I.M. Abolduev, Yu.A. Kontsevov
S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy Pr., 27*

Operating temperature of HEMT (high electron mobility transistor) must not exceed the maximum admissible value, which is specified in the device specifications. Exceeding the operating temperature leads to a decrease in the device performance up to its failure. In this paper we studied two methods of thermal resistance measurement: electrical (based on channel resistance) and optical (using pyrometer). It was revealed that the obtained values of HEMT thermal resistances are in a good correlation with each other. It is shown that the pyrometer could be used to find crystal temperatures averaged over the structure, up to the values around 250°C, so it is suitable for the quality control of potentially unreliable devices.

Keywords: *thermal resistance measurements, pyrometer temperature measurements, surface emissivity, HEMT*

Data on authors: *Natalya Lvovna Evdokimova, Ph.D.; Vladimir Viktorovich Dolgov; Vladimir Samuilovich Ezhov, Ph.D., Andrey Yurievich Motorin; Igor Mikhaylovich Abolduev, Ph.D.; Yuliy Abramovich Kontsevov, Sc.D.*

Введение

Превышение рабочей температуры выше максимально допустимого значения приводит к снижению работоспособности прибора вплоть до его отказа [1]. Для приборов данного класса особенно важно обеспечить отсутствие перегрева ввиду рассеивания ими высокой плотности мощности (4-8 Вт/мм для GaN транзисторов в сравнении 0,5-1,5 Вт/мм для транзисторов на GaAs [2]).

Для контроля температуры в AlGaIn/GaN НЕМТ используют как электрический контроль температуры по термочувствительному параметру (переход затвора, сопротивление канала), так и оптические методы [3, 4]. Наиболее полный обзор методов измерения температуры в данных приборах приведён в работе [5]. Однако вышеописанные методы требуют специального дорогостоящего и сложного оборудования, имеющего большие габариты и малое фокусное расстояние. Поэтому их сложно использовать для отбраковки потенциально ненадёжных приборов и для измерения температуры в рабочем режиме.

Целью данной работы являлось исследование возможности использования пирометра для определения температуры кристалла в рабочем режиме. Примеров использования пирометра для определения температуры в AlGaIn/GaN НЕМТ найдено не было.

Пирометр измеряет усреднённую по площади температуру. Поэтому было необходимо сравнить показания пирометра с температурой, определённой более точно по термочувствительному параметру. Сравнение температур проводилось в режиме, используемом для измерения теплового сопротивления.

В работе проведено сравнение тепловых сопротивлений и температур в AlGaIn/GaN НЕМТ, определённых пирометрическим методом и электрическим методом по термочувствительному параметру.

Электрический метод

Методика эксперимента

Электрическое и пирометрическое измерение теплового сопротивления были проведены одновременно в одном измерительном процессе. При этом на прибор подавался импульсный электрический сигнал с «Измерителя Rt БКВП 411242.001» и одновременно с помощью пирометра снималась зависимость температуры кристалла от времени.

Для электрического измерения температуры был использован метод измерения теплового сопротивления полевых транзисторов по сопротивлению открытого канала $R_{си}$ [7]. В качестве термочувствительного параметра ТЧП было использовано напряжение сток-исток $U_{си}$, измеряемое при постоянном измерительном токе $I_{изм}$. При этом значение ТЧП было связано с сопротивлением открытого канала: $U_{си\ изм} = I_{изм} \cdot R_{си}$. Для исключения возможности пробоя затвор был закорочен с истоком.

Сначала измерялось значение $U_{си\ изм}$ до подачи нагревающей мощности (U_0). Затем на прибор подавался импульс нагревающей мощности, регулируемой напряжением $U_{си\ н}$. При этом нагревающий ток I_n определялся вольт-амперной характеристикой измеряемого прибора. Величина мощности нагрева рассчитывалась как $P_n = I_n \cdot U_{си\ н}$. После отключения разогревающего импульса $U_{си}$ на тран-

зистор подавался измерительный режим (ток $I_{изм}$) и снималась кривая остывания – временная зависимость $U_{си\ изм} = f(t)$. Напряжение $U_{си\ изм}$ на момент отключения разогревающего импульса ($U_{гор}$) определялось экстраполяцией начального участка кривой остывания (по \sqrt{t}) к моменту $t = 0$ (начальный участок был снят с интервалом 10 мкс).

Обоснование возможности экстраполяции кривой остывания по \sqrt{t} дано в работе [8].

Температурный коэффициент напряжения $U_{си}$

Перед проведением измерений в термокамере определялась зависимость напряжения $U_{си\ изм}$ при выбранном измерительном токе от температуры. Полученная зависимость приведена на рис. 1.

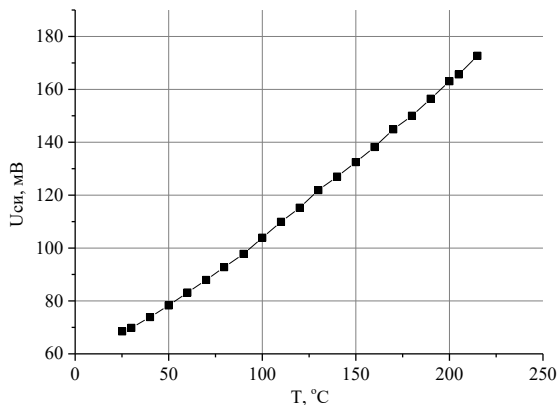


Рис. 1

Зависимость $U_{си}$ от температуры

Из зависимости $U_{си}(T)$ определялся температурный коэффициент напряжения ТКН при выбранном измерительном токе: $TKH = \Delta U_{рп} / \Delta T$. Мы определяли ТКН при

$I_{изм} = 100$ мА. При выборе другого измерительного тока нужно учитывать, что ТКН будет пропорционален значению $I_{изм}$.

Характерной особенностью приборов AlGaN/GaN HEMT явилась не совсем линейная зависимость $U_{си}$ от температуры в интервале температур 20-240 °С (рис. 1). Причина нелинейности $U_{си}$ связана с нелинейной зависимостью сопротивления канала от температуры, обусловленной температурной зависимостью подвижности электронов в канале транзистора ($\mu \sim T^{-1,5}$ [9]). При этом с учётом сопротивления омических контактов ($R_{конт}$) $R_{си} = 2R_{конт} + const \cdot T^{1,5}$. Учитывая, что $U_{си} = I_{изм} \cdot R_{си}$, получим $TKH = \frac{dU_{си}}{dT} \sim T^{0,56}$, то есть с увеличением температуры ТКН должен возрастать. Экспериментально для структур с шириной затвора 5 мм наблюдалось увеличение ТКН от 0,45 мВ/°С (при нагреве до 80 °С) до 0,55 мВ/°С (при нагреве до 200 °С).

Для партии приборов, изготовленных по одной технологии (концентрации носителей и геометрические размеры одинаковы), можно определить ТКН для одного прибора из партии и корректировать значение ТКН по величине $U_{си}$ ($I_{изм}$).

Обоснуем эту возможность. Плотность тока стока в канале HEMT J_c определяется концентрацией n и подвижностью μ двумерного электронного газа:

$$J_c = e \cdot n \cdot \mu(T) \cdot E(T), \quad (1)$$

где e – заряд электрона; E – напряжённость электрического поля в канале.

Выразив напряжённость поля через напряжение $U_{си}$ и длину канала l , получим

для режима измерения:

$$J_{с\text{ изм}} = e \cdot n \cdot \mu(T) \cdot U_{с\text{ изм}}(T) / l. \quad (2)$$

Продифференцируем (2) по температуре T . Учитывая, что измерения ТЧП проводятся при постоянном измерительном токе (и концентрация электронов n в данном температурном диапазоне не зависит от температуры), получим:

$$0 = e \cdot n \cdot \frac{\mu}{l} \cdot \frac{dU_{с\text{ изм}}}{dT} + e \cdot \frac{n}{l} \cdot U_{с\text{ изм}} \cdot \frac{d\mu}{dT},$$

$$\frac{dU_{с\text{ изм}}}{dT} = - \frac{U_{с\text{ изм}}}{\mu} \frac{d\mu}{dT},$$

то есть $\text{ТКН} = k \cdot U_{с\text{ изм}}$.

Пропорциональность ТКН напряжению $U_{с\text{ изм}}$ позволяет откалибровать (определить в термокамере ТКН) один прибор из партии, а далее по значению $U_{с\text{ изм}}$ ($I = I_{\text{изм}}$) корректировать значение ТКН остальных приборов, не проводя калибровки для каждого прибора.

Для данной партии приборов ТКН был равен $0,5 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$.

Результаты измерения теплового сопротивления электрическим методом

Измерения теплового сопротивления проводились на установке «Измеритель R_t » БКВП 411242.001.

Режим измерения: $U_{з\text{н}} = 0$, $U_{с\text{ изм}} = 3 \text{ В}$, $T_{\text{н}} = 20 \text{ с}$, $I_{\text{изм}} = 100 \text{ мА}$.

Значения мощности и теплового сопротивления для разных приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений R_t электрическим методом

№ прибора	P , Вт	R_t , $^\circ\text{С}/\text{Вт}$
3	8,6	3,9
6	8,1	4,6
7	8,1	3,8
9	8,57	3,9
10	8,27	3,34

Оптический метод

Методика эксперимента

Прибор устанавливали на подвижный столик с тонкой регулировкой прибора относительно луча лазерной наводки пирометра. Двигая подвижный столик и наблюдая при этом с помощью лупы, устанавливали схождение лучей лазерной наводки на поверхности кристалла. Установка приведена на рис. 2.

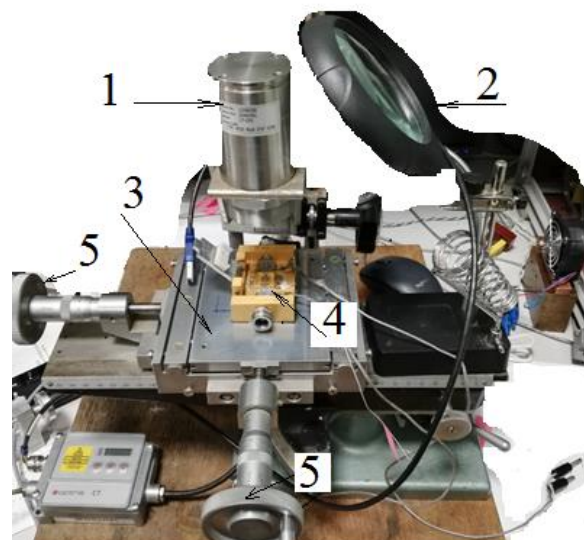


Рис. 2

Вид измерительной установки:

- 1 – пирометр; 2 – линза;
- 3 – координатный столик;
- 4 – исследуемый прибор; 5 – микровинты

Для измерения температуры был использован пирометр Optris СТ. Перед проведением измерений определяли относительную излучательную способность поверхности полупроводникового кристалла ε .

Улучшенный метод определения ε , исключая ошибки, связанные с излучением окружающей среды, предполагает измерение излучения исследуемой поверхности при двух температурах [10]. Для определения ε прибор помещали в камеру на нагретый массивный столик из меди. Температура столика измерялась термопарой (T_T). Для двух температур столика T_{T1} и T_{T2} определяли температуры, получаемые пирометром (задав при измерении $\varepsilon = 1$). Обозначим их $T_{п1}$ и $T_{п2}$. Тогда значение ε можно получить из формулы [11]:

$$\varepsilon = \frac{T_{п1}^4 - T_{п2}^4}{T_{T1}^4 - T_{T2}^4}. \quad (1)$$

Полученные для двух состояний камеры значения температуры пирометра $T_{п}$ и температуры столика T_T для данного прибора были следующими:

$$\begin{aligned} T_{T1} &= 296,7 \text{ К}; T_{п1} = 296 \text{ К}; \\ T_{T2} &= 347,5 \text{ К}; T_{п2} = 319,5 \text{ К}. \end{aligned}$$

Рассчитанное по (1) значение ε получилось равным 0,40.

С помощью однолучевого спектрофотометра был снят спектр пропускания ИК лучей в зависимости от волнового числа для пластин AlGaN (20 нм) /GaN (1,5 мкм)/SiC (300 мкм). Полученный спектр показан на рис. 3.

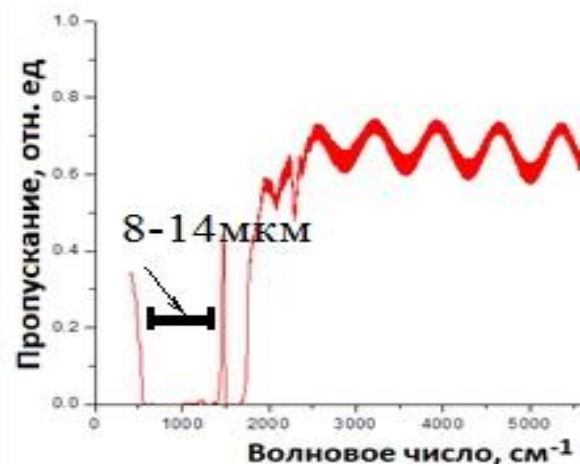


Рис. 3

Зависимость коэффициента пропускания структуры AlGaN/GaN на SiC от волнового числа

На рис. 3 на спектр пропускания нанесён рабочий интервал пирометра Optris (8-14 мкм). Из рисунка видно, что в полосе работы пирометра коэффициент пропускания пластин (AlGaN/GaN на SiC) близок к нулю. Следовательно, поглощение и коэффициент излучательной способности ε данных пластин должны быть высокими. Это значит, что наблюдаемое экспериментально низкое значение $\varepsilon = 0,40$ связано с металлизацией, занимающей значительную часть поверхности структуры.

Полученное значение $\varepsilon = 0,40$ устанавливалось в программе Optris Connect в меню настроек пирометра: Device/ Change Emissivity.

При определении ε в термокамере (при отсутствии разогревающей кристалл мощности) оказалось, что ε кристалла (0,36 - 0,40) выше, чем окружающих кристалл металлизированных областей (0,10). Это дало возможность проводить более точное наведение пирометра на кристалл.

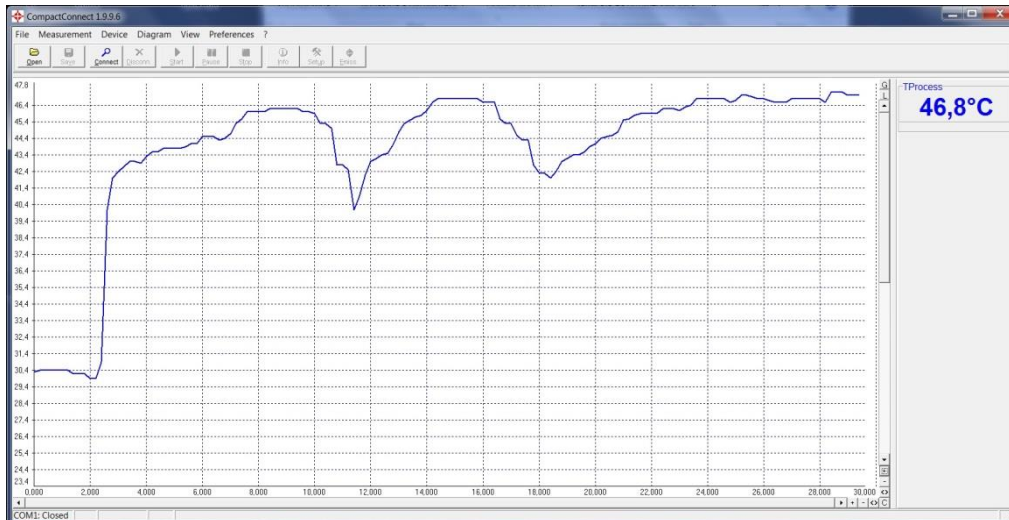


Рис. 4

Изменение температуры в процессе наведения пирометра на кристалл

Перед проведением измерений температуры кристалла производилось уточняющее наведение пирометра на кристалле транзистора. Для этого на прибор подавали разогревающую мощность в течение времени, достаточного для проведения наводки (50 с). С помощью микровинтов, показанных на рис. 2, выбиралось положение измеряемого прибора, при котором пирометр показывал максимальную температуру. Изменение температуры при смещении столика микровинтом показано на рис. 4. Проведение уточняющей наводки требовалось только в направлении меньшего размера кристалла. В направлении большего размера кристалла было достаточно лазерного наведения лучом пирометра.

Результаты измерения теплового сопротивления оптическим методом

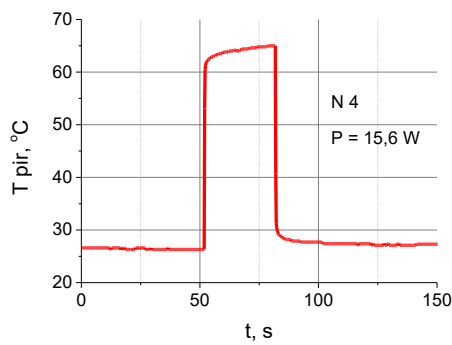
После того как положение пирометра относительно кристалла было выбрано, пирометр запускался на запись температуры, затем подавался разогревающий режим с установки «Измеритель Rt». При

этом зависимость температуры от времени имеет вид импульса (рис. 5).

Наблюдаемая в программе пирометра зависимость температуры от времени для двух приборов № 4 и № 5, резко отличающихся тепловым сопротивлением, приведена на рис. 5. Длительность импульса температуры равна длительности разогревающего импульса, подаваемого с «Измерителя Rt».

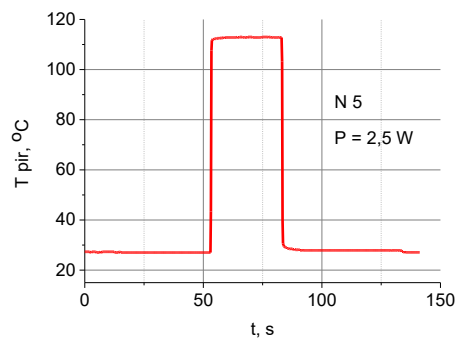
Тепловое сопротивление прибора № 5 значительно выше, чем прибора № 4. Сравнение полученных оптическим методом значений тепловых сопротивлений позволяет выявить потенциально ненадежные приборы.

Для той же партии из 5 приборов, указанных в табл. 1, одновременно с электрическими измерениями при импульсном разогреве были проведены измерения тепловых сопротивлений пирометрическим методом. Значения температуры кристалла $T_{кр}$, температуры среды $T_{ср}$, импульсной мощности и тепловых сопротивлений для тех же приборов приведены в табл. 2.



$$R_t = (65-25)/15,6 = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

транзистор № 4



$$R_t = (110-25)/2,5 = 34 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

транзистор № 5

Рис. 5

Температура кристалла транзисторов № 4 и № 5 при подаче на него разогревающего импульса

Таблица 2

Результаты измерений R_t пирометром

№ прибора	$T_{кр}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{ср}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$P, \text{ Вт}$	$R_t, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
3	63,5	31,2	8,6	3,8
6	65,4	31	8,1	4,25
7	58	29	8,1	3,6
9	61,4	29,7	8,57	3,9
10	52,5	26,5	8,27	3,14

Сравнение значений тепловых сопротивлений, измеренных оптическим и электрическим методами (по данным табл. 1 и 2), приведено на рис. 6.

Как видно из рис. 6, полученные обоими методами значения тепловых сопротивлений коррелируют между собой.

Сравнение результатов измерения температуры кристалла пирометром и по ТЧП

Было проведено сравнение обоих методов измерения температуры в широком интервале температур. С этой целью прибор помещали в термокамеру, с установки

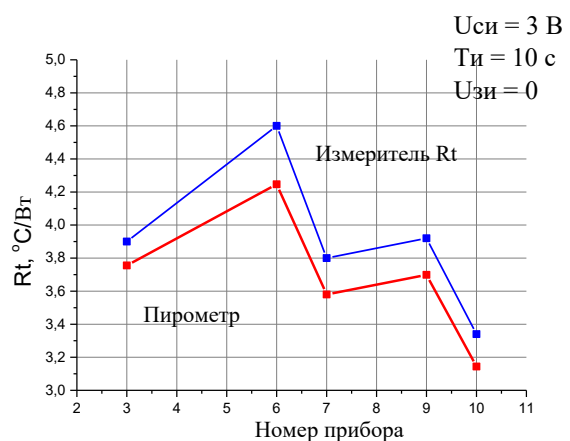


Рис. 6

Сравнение тепловых сопротивлений, измеренных электрическим и пирометрическим методами

«Измеритель Rt» подавали разогревающий импульс тока стока в режиме: $U_{зи} = 0$, $U_{си} = 3$ В, $T_{и} = 20$ с. Пирометром определяли температуру на вершине импульса.

Одновременно измеряли температуру разогрева кристалла с помощью термочувствительного параметра на установке «Измеритель Rt». Расчёт температуры проводили по формуле:

$$T_{кр} = T_0 + \frac{\Delta U_{си}}{TKH}, \quad (2)$$

где T_0 – температура до подачи импульса разогрева; $\Delta U_{си} = U_{гор} - U_0$ – изменение термочувствительного параметра в результате подачи разогревающего импульса.

Зависимость температуры кристалла при подаче разогревающего импульса для разных температур термокамеры приведена на рис. 7. Из рисунка видно, что пирометр достаточно хорошо позволяет определять температуру кристалла при не слишком высоких температурах. Температуры, определяемые пирометром и с помощью ТЧП, в активном режиме транзистора при дополнительном разогреве транзистора в камере отличались не более чем на 10 °С.

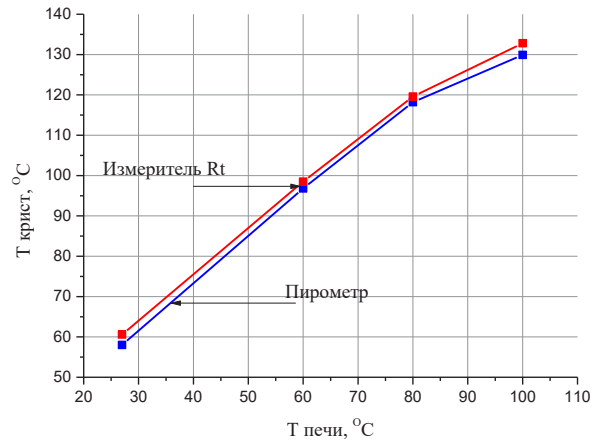


Рис. 7

Измерение температуры пирометром и по ТЧП

Для подтверждения возможности измерения температуры кристалла при максимально допустимых температурах было проведено измерение температуры пирометром для разных уровней разогревающей импульсной мощности. Повышение мощности (при $U_{зи} = 0$) достигалось увеличением напряжения $U_{си}$. Ток стока при этом выходит на участок насыщения и начинает уменьшаться. Зависимость тока и рассеиваемой мощности от напряжения $U_{си}$ для приборов приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, для прибора № 3 рассеиваемая мощность имеет максимум,

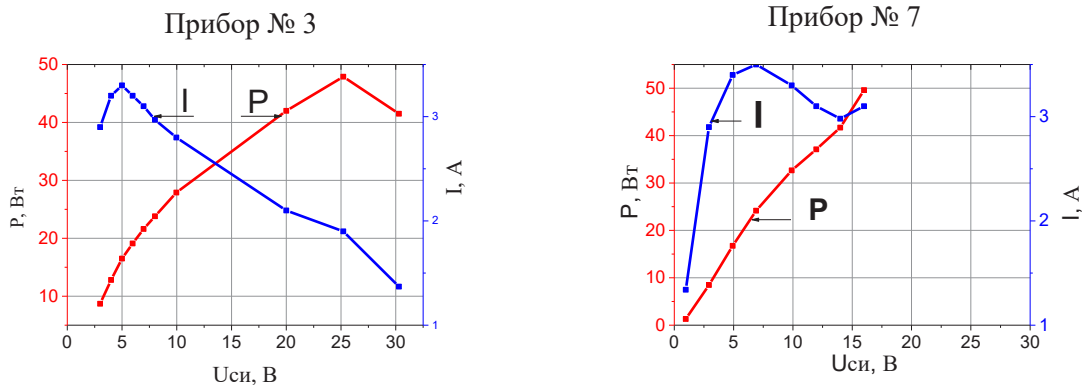


Рис. 8

Зависимость тока I и рассеиваемой мощности P от напряжения $U_{си}$

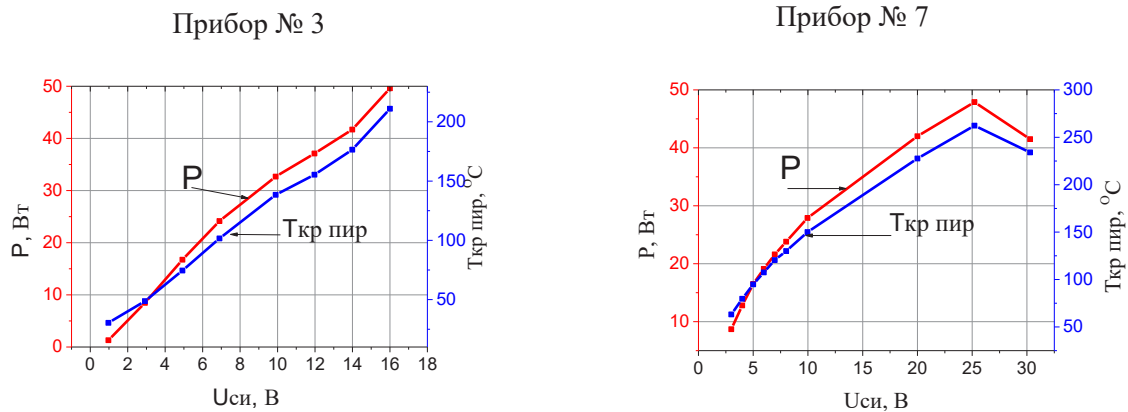


Рис. 9

Зависимость температуры кристалла $T_{кр пир}$ и рассеиваемой мощности P от напряжения $U_{си}$

связанный с уменьшением тока стока. Для прибора № 7 при выходе тока на участок насыщения меняется крутизна зависимости $P = f(U_{си})$.

На рис. 9 представлена зависимость температуры кристалла $T_{кр пир}$ и рассеиваемой мощности P от напряжения $U_{си}$.

Из рисунка 9 видно, что измеряемая пирометром температура кристалла коррелирует с подаваемой на кристалл мощностью.

Таким образом, пирометр может быть использован для определения усреднённых по структуре температур кристалла вплоть до температур порядка 250 °C и, следовательно, может быть использован для отбраковки потенциально ненадёжных приборов.

Выводы

Методика определения теплового сопротивления в AlGaN/GaN HEMT по сопротивлению канала имеет следующие особенности:

1. Для исключения пробоя затвора лучше выбирать режим $U_{зи} = 0$. Для этого на приборе затвор закорачивали с истоком, а затворный электрод измерителя оставляли не подключенным.

2. ТКН можно определять для одного прибора из партии, а остальные ТКН корректировать по напряжению сток–исток при том же измерительном токе: $TKH = k \cdot U_{си}$. Для приборов с шириной затвора 5 мм средний ТКН был порядка 0,5 мВ/°C.

3. При увеличении рабочей температуры от 80 до 200°C ТКН возрастал от 0,45 мВ/°C до 0,55 мВ/°C, что важно учитывать при расчёте тепловых сопротивлений.

Методика определения теплового сопротивления в AlGaN/GaN HEMT с помощью пирометра имеет следующие особенности:

1. Для воспроизводимого определения температуры кристалла пирометром помимо фокусирования на кристалле лазерных лучей требуется тонкая наводка. Наводку удобно осуществлять при подогреве кристалла мощностью, находя положение максимальной измеряемой пирометром температуры.

2. Для исследуемой поверхности (GaN с металлизацией) относительная излучательная способность поверхности полупроводникового кристалла ϵ была порядка 0,40.

3. Температуры, измеряемые пирометром (с найденным предварительно для данной поверхности ϵ) и с помощью ТЧП, в активном режиме транзистора при дополнительном разогреве транзистора в камере отличались не более чем на 10 °С.

4. Пирометр может быть использован для определения усреднённых по структуре температур кристалла вплоть до температур порядка 250 °С и, следовательно, может быть использован для отбраковки потенциально ненадёжных приборов.

Литература

1. Смирнов, А.М. Особенности работы на ИК микроскопе FLIR. Исследование тепловых полей в мощных импульсных СВЧ транзисторах в динамическом режиме / А.М. Смирнов, Д.А. Евстигнеев // Материалы XIII научно-технической конференции «Пульсар-2014. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 8-10 октября 2014, Дубна. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2014. – С. 271-273.
2. Бунтов, Е. Гетероструктуры на основе нитрида галлия (GaN) и технология компании OMMIC на их основе / Е. Бунтов // ООО «НПК «Фотоника». – www.npk-photonica.ru/statya-svch-pdf102540.pdf
3. Аболдуев, И.М. О возможности контроля тепловых полей GaN СВЧ транзисторов по коротковолновому ИК-излучению / И.М. Аболдуев, М.Е. Гусев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой // Материалы IX научно-технической конференции «Пульсар-2015. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 7-9 октября 2015, Дубна. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С. 202-205.
4. Аболдуев, И.М. Контроль тепловых полей GaN СВЧ транзисторов / И.М. Аболдуев, И.С. Бенуни, М.Е. Гусев, Ю.А. Концевой, Ан. В. Редька // Материалы XV научно-технической конференции «Пульсар-2017. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 27-29 сентября 2017, Москва-Дубна. – М.: АО «НПП «Пульсар», 2017. – С. 218-220.
5. Долгов, В.В. Современный программно-аппаратный измерительный комплекс для контроля теплофизических и электрических параметров ППП и их ОБР / В.В. Долгов, В.С. Ежов, А.Ю. Моторин // Материалы VII научно-технической конференции «Пульсар-2008. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 7-8 октября 2008, Москва. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2008. – С. 142-144.
6. ОСТ 11 0944 – 96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчёта, измерения и контроля теплового сопротивления. – М.: НПП «Пульсар», 1997. – 110 с.
7. Glavanovics M., Zitta M., Thermal destruction testing: An indirect approach to a simple dynamic model of smart power switches. Solid-State Circuit Conference, 2001. ESSIRC, Proceedings of the 27th European, pp.236-239.
8. Ayalew, T. SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation. Ph.D. thesis, Technische Universitat Wien, 2004; URL - www.iue.tuwien.ac.at/phd/ayalew.

9. Webb P.W. Thermal imaging of electronic devices with low surface emissivity. – IEEE Proceedings on Circuits, Devices and Systems. Jun 1991, vol. 138, no.3, pp. 390 – 400.
 10. Евдокимова, Н.Л. Способ определения излучательной способности поверхности полупроводниковых приборов / Н.Л. Евдокимова, В.С. Ежов, С.В. Иванов, В.Ф. Минин, В.Ф. Синкевич // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012 (229). – Вып. 2. – С. 57-63.
- References**
1. Smirnov A.M., Evstigneev D.A. Osobennosti raboty na IK mikroskope FLIR. Issledovaniye teplovykh poley v moshchnykh impulsnykh SVCH tranzistorakh v dinamicheskom rezhime [Features of operating the FLIR IR-microscope. Investigation of thermal fields in pulsed microwave power transistors in dynamic mode]. *Materialy XIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2014. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'niye bloki REA*, Moscow, 2014, S&PE Pulsar JSC, p.271-273.
 2. Buntov E. Geterostruktury na osnove nitrida galliya (GaIn) i tekhnologiya kompanii OMMIC na ikh osnove [GaIn heterostructures and OMMIC technologies based on them]. NPK Fotonika LLC, available at: www.npk-photonika.ru/statya-svch-pdf102540.pdf.
 3. Abolduev I.M., Gusev M.E., Kolkovskiy Yu.V., Kontsevoy Yu.A. O vozmozhnosti kontrolya teplovykh poley GaIn SVCH tranzistorov po korotkovolnovomy IK-izluchehiyu [On the possibilities of microwave GaIn transistors' thermal fields control using short-wavelength IR radiation]. *Materialy IX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2015. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'niye bloki REA*, Moscow, 2015, S&PE Pulsar JSC, pp.202-205.
 4. Abolduev I.M., Benuni I.S., Gusev M.E., Kontsevoy Yu.A., Redka An.V. Kontrol' teplovykh poley GaIn SVCH tranzistorov [Microwave GaIn transistors thermal field control]. *Materialy XV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2017. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'niye bloki REA*, Moscow, 2017, S&PE Pulsar JSC, pp.218-220.
 5. Dolgov V.V., Ezhov V.S., Motorin A. Yu. Sovremenniy programmno-apparatniy izmeritel'niy kompleks dlya kontrolya teplofizicheskikh i elektricheskikh parametrov PPP i ikh OBR [Advanced hardware-software measuring system for controlling the thermophysical and electrical parameters of semiconductor devices and their safe operating area]. *Materialy VII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2008. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'niye bloki REA*, Moscow, 2008, FSUE S&PE Pulsar, pp.142-144.
 6. OST 11 0944 – 96. Mikroskhemy integral'niye i pribory poluprovodnikovkiye. Metody rascheta, izmereniya i kontrolya teplovogo soprotivleniya [Integrated circuits and semiconductor devices. Methods of calculation, measurement and control of thermal resistance]. Moscow, 1997, NPP Pulsar, 110 p.

7. M. Glavanovics, Zitta M., Thermal destruction testing: An indirect approach to a simple dynamic model of smart power switches. *Solid-State circuit conference*, 2001, ESSIRC, pp.236-239.
8. Ayalew, T. SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation. Ph.D. thesis, Wien, 2004, available at: www.iue.tuwien.ac.at/phd/ayalew.
9. Webb P.W. Thermal imaging of electronic devices with low surface emissivity. *IEEE proceedings on circuits, devices and systems*. 1991, vol.138, no.3, pp. 390-400.
10. Evdokimova N.L., Ezhov V.S., Ivanov S.V., Minin V.F., Sinkevich V.F. Sposob opredeleniya izluchatel'noy sposobnosti poverkhnosti poluprovodnikovyykh priborov [Method of determining surface emissivity of semiconductor devices]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2012, iss.2(229), pp.57-63.