

3. MeshCore [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/meshcore-dev/MeshCore> (дата обращения: 11.03.2026)

4. MeshCore wiki [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/meshcore-dev/MeshCore/wiki/FAQ/> (дата обращения: 11.03.2026)

Дубровин Егор Романович, студ. гр. 6131-110403D, инж. ООО «КВАДРО КОД», dubrovin.duber@mail.ru

УДК 621.382

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Д.И. Морозов¹, А.А. Гавриков², В.И. Смирнов^{1,2}

¹ФГБОУ ВО Ульяновский государственный технический университет,

²Ульяновский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им.

В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск

Ключевые слова: тепловое сопротивление, полупроводниковые приборы.

На надёжность полупроводниковых приборов существенно влияет их температура в процессе эксплуатации. Их интенсивность отказов увеличивается в разы, если температура кристалла достигает 100 °С. Если при этом электрорадиоэлемент (в дальнейшем ЭРЭ) эксплуатируется на предельных электрических режимах, то интенсивность отказов становится ещё выше. Поэтому контроль качества отвода тепла от полупроводникового кристалла приобретает важное значение. Качество отвода тепла от активной области кристалла к корпусу характеризуется компонентой теплового сопротивления полупроводникового прибора R_{TjC} – тепловое сопротивление «переход-корпус» (junction-to-case), и определяется отношением приращения температуры на p-n переходе к мощности, рассеиваемой на ЭРЭ, при протекании через него греющего тока. Температура p-n перехода определяется на основе температурочувствительного параметра, в качестве которого используется падение напряжения при протекании малого измерительного тока.

Целью данной работы является сравнительный анализ существующих методов измерения теплового сопротивления, используемых как в России, так и в зарубежных странах.

Существуют различные методы измерения теплового сопротивления, описанные как в российских, так и в зарубежных стандартах, однако они либо морально устарели, как, например, метод, описанный в стандарте ОСТ 11 0944–96, либо сопряжены с некоторыми сложностями, начиная от условий проведения измерения и заканчивая стоимостью измерительного оборудования.

В зарубежном стандарте JESD51-14 описывается метод измерения теплового сопротивления, основанный на анализе функций суммарной теплоёмкости и суммарного теплового сопротивления ЭРЭ. Анализ этих функций позволяет определять компоненты теплового сопротивления, что позволяет контролировать качество монтажа полупроводникового кристалла. При проведении измерений температура корпуса полупроводникового ЭРЭ во время измерения должна быть постоянной за счёт использования полых радиаторов с хладагентом внутри. Разнообразие форм-факторов корпусов полупроводниковых ЭРЭ усложняет использование таких радиаторов [1].

Новым методом измерения теплового сопротивления является модуляционный метод, в основе которого лежит определение теплового импеданса ЭРЭ, нагреваемого мощностью, модулированной по гармоническому закону. Модуляция греющей мощности осуществляется пропусканием через объект широтно-импульсно модулированной последовательности импульсов тока с постоянными периодом следования и амплитудой. Гармонические колебания тепловой мощности вызывают гармонические колебания температуры перехода T_j , которые сдвинуты по фазе относительно мощности на угол φ . Измеренная временная зависимость $T_j(t)$ раскладывается на частотный спектр с помощью преобразования Фурье, производится цифровая обработка сигнала, затем восстанавливается исходная отфильтрованная зависимость $T_j(t)$. Отношение амплитуд температуры перехода к рассеиваемой в объекте мощности определяет модуль теплового импеданса $Z_T(\nu)$ при частоте модуляции ν . Достоинством метода является возможность определения компонент теплового сопротивления. Для этого измеряется значение теплового импеданса $Z_T(\nu)$ при меняющейся по логарифмическому закону частоте модуляции. Данная частотная зависимость имеет пологие участки и точки перегиба функции, связанные с компонентами теплового сопротивления. Для выявления этих особенностей производится дифференцирование функции $Z_T(\nu)$ по частоте модуляции, позволяющее однозначно определить компоненты теплового сопротивления полупроводниковых ЭРЭ [2].

На рисунке 1 продемонстрированы результаты измерения теплового сопротивления МДП-транзистора IRFP3206 в режиме сканирования по частоте модуляции греющей мощности. Относительно пологий участок вещественной части функции $Z_T(\nu)$ соответствует компоненте «переход-корпус» полного теплового сопротивления.

Серия измерений показала значение $R_{T_{jc}} = 0,438$ К/Вт, что согласуется с максимальным значением $R_{T_{jc}} = 0,50$ К/Вт из datasheet.

В данной работе рассмотрены основные методы измерения теплового сопротивления «переход-корпус» полупроводниковых приборов, а также перечислены их достоинства и недостатки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

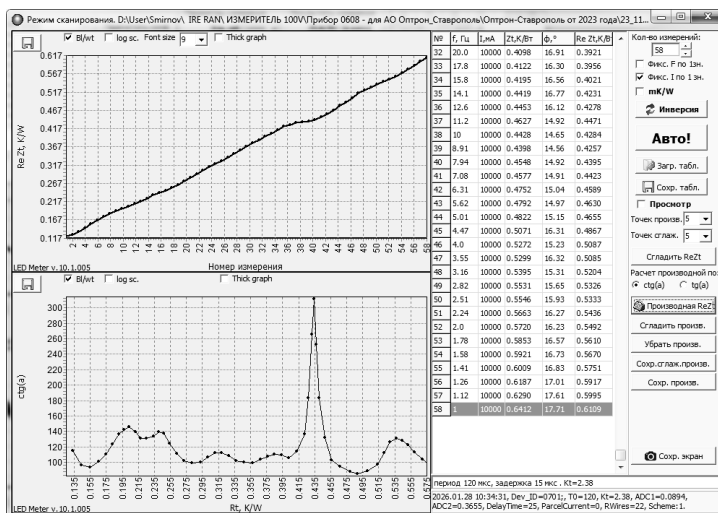


Рисунок 1 – Результаты измерения в режиме сканирования по частоте модуляции греющей мощности в управляющей программе LED Meter

Список использованных источников

1. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path. JEDEC JESD51–14 standard.
2. 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. Vol. 80, pp. 205–212.

Морозов Денис Игоревич, ассистент каф. «Проектирование и технология электронных средств», dmorozov-work@mail.ru.

Гавриков Андрей Анатольевич, к.т.н., с.н.с. УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, a.gavrikoff@gmail.com.

Смирнов Виталий Иванович, д.т.н., профессор каф. «Проектирование и технология электронных средств», smirnov-vi@mail.ru.

УДК 629.78

ДАТЧИК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

А. А. Артюшин, В. А. Зеленский

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», г. Самара

При попадании частицы в кристалл алмаза образование электронно-дырочных пар. Носители заряда начинают дрейфовать под действием