

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.12>

УДК 681.518.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ МОДУЛЯХ

В. И. Смирнов^{1,2}, В. А. Сергеев^{1,2}, А. А. Гавриков¹, А. А. Куликов¹

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

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

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2020 г.

Аннотация. Представлены результаты исследований теплофизических процессов в силовых модулях. Измерение теплового поля, создаваемого нагретыми кристаллами силового модуля при протекании через них греющего тока, показало равномерный характер распределения температуры в области монтажа кристаллов модуля. Это указывает на то, что процессы локализации тока, вызванные положительной тепловой обратной связью, компенсируются процессами теплообмена между кристаллами через плату DBC, обладающую высокой теплопроводностью. С помощью модуляционного метода проведены измерения теплового сопротивления «переход-корпус» силового модуля. При этом нагрев кристаллов модуля осуществлялся пропусканием ШИМ-импульсов греющего тока через антипараллельные диоды MOSFET-транзисторов модуля. Модуляционный метод позволил измерить тепловое сопротивление силового модуля, величина которого менее 0,1 К/Вт.

Ключевые слова: силовой модуль, MOSFET-транзистор, тепловое сопротивление, модуляционный метод, температурное поле, тепловизионная камера.

Abstract. The paper describes the results of investigation of thermophysical processes in power modules. Measuring the thermal field caused by dies heating due to flow of heating current shows uniform temperature distribution in the area of dies mount. This indicates that the processes of current localization caused by positive thermal feedback are compensated by the processes of heat transfer between the chips

through the DBC board, which has a high thermal conductivity. The modulation method was used to measure the thermal resistance "junction-to-case" of the power module. In this case, the module dies were heated by PWM pulses of the heating current through the antiparallel diodes of the module MOSFETs. The modulation method allows to measure power module thermal resistance, which value is less than 0.1 K/W.

Keywords: power module, MOSFET, thermal resistance, modulation method, temperature field, thermal imaging camera.

Введение

Силовые модули на мощных MOSFET- и IGBT-транзисторах широко используются в различных областях промышленности, включая транспорт, энергетику, металлургию, машиностроение и др. Для высоковольтных приложений, требующих коммутации напряжения свыше 1 кВ, преимущественно используют силовые модули на IGBT-транзисторах. Для коммутации напряжений менее 1 кВ обычно используют силовые модули на MOSFET-транзисторах, которые обладают более высоким быстродействием по сравнению с IGBT-транзисторами. Вместе с тем, переход от кремния к широкозонному карбиду кремния позволил существенно увеличить рабочие напряжения MOSFET-транзисторов. Например, силовой модуль на SiC SPX600GB120S6 способен коммутировать напряжение 1200 В при силе тока через открытый модуль 600 А [1]. Таким образом, в силовых модулях величина рассеиваемой мощности может существенно превышать 1 кВт, что требует эффективного отвода тепла от кристаллов модуля к корпусу и далее в радиатор и окружающую среду.

Параметром, определяющим эффективность отвода тепла в силовом модуле, служит тепловое сопротивление «переход-корпус» $R_{Tjс}$, определяемое выражением [2]:

$$R_{Tjс} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}, \quad (1)$$

где T_j – усредненная температура p - n -переходов кристаллов модуля; T_c – температура корпуса модуля, которая должна поддерживаться постоянной в процессе измерений; P – суммарная тепловая мощность, рассеиваемая в модуле.

Для того, чтобы температура перегрева кристаллов модуля не превышала предельно допустимую, тепловое сопротивление $R_{Tjс}$ мощных модулей должно иметь значения порядка 0,1 К/Вт и ниже. Измерение таких величин теплового сопротивления с достаточно высокой точностью представляет собой непростую задачу.

1. Методы измерения теплового сопротивления

Измерение усредненной температуры перехода T_j MOSFET-транзисторов силового модуля, входящей в выражение (1), обычно производится косвенным способом на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно зависящего от температуры модуля. Согласно стандарту [3] в качестве ТЧП может быть использовано сопротивление открытого канала транзистора $R_{кан}$, либо падение напряжения на антипараллельном диоде U_{SD} при протекании через него фиксированного измерительного тока от истока к стоку. Поскольку сопротивление канала $R_{кан}$ мощных MOSFET-транзисторов может достигать величины порядка 1 мОм, то падение напряжения между стоком и истоком также мало, что усложняет определение температуры перехода из-за сильного зашумления полезного сигнала, используемого для определения температуры кристалла.

Более предпочтительным является использование в качестве ТЧП падения напряжения на антипараллельном диоде U_{SD} . Мощные MOSFET-транзисторы состоят из множества одинаковых базовых ячеек, в которых электроды истока и стока расположены на противоположных плоскостях кристалла. Структура одной из таких ячеек представлена на рис. 1. При подаче на затвор напряжения, превышающего пороговое значение, индуцируется канал n -типа, соединяющий области истока и стока. Ток через транзистор протекает от стока к истоку в основном перпендикулярно поверхности кристалла, что обеспечивает большую суммарную площадь сечения канала транзистора и

возможность коммутировать большие токи. Для повышения максимального напряжения $U_{СИ,max}$ между стоком и истоком в закрытом состоянии транзистора на n^+ -подложке выращивается эпитаксиальный слой.

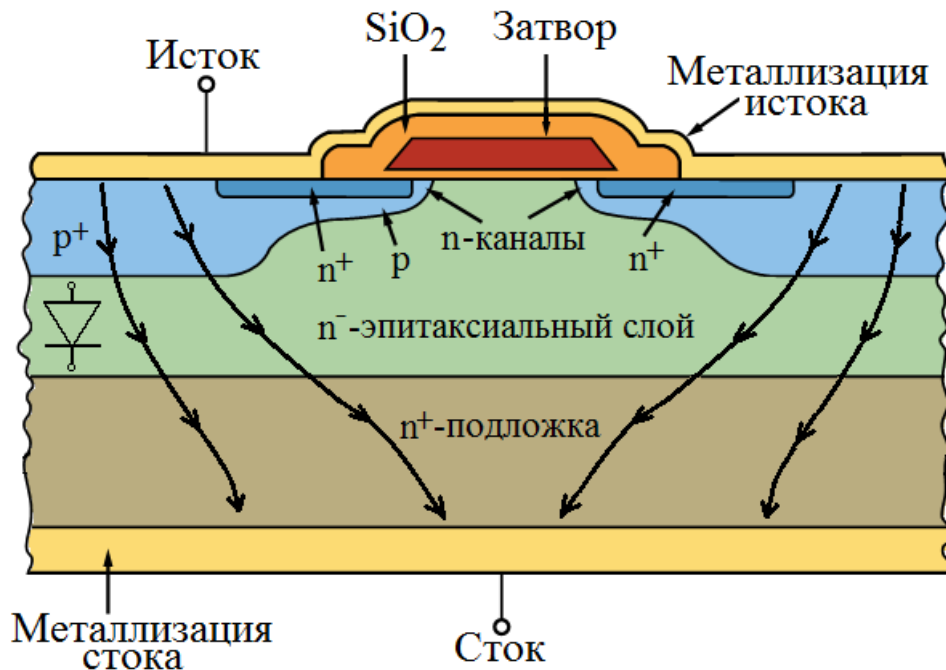


Рис. 1. Структура базовой ячейки мощного MOSFET-транзистора.

Особенностью такой «вертикальной» структуры мощного MOSFET-транзистора является образование антипараллельного диода между p^+ -областью под электродом истока и n -областью стока (условное обозначение такого диода показано внутри эпитаксиального слоя на рис. 1). Падение напряжения U_{SD} на этом антипараллельном диоде при протекании через него фиксированного измерительного тока линейно зависит от температуры кристалла, что позволяет использовать U_{SD} в качестве ТЧП.

Большинство методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов используют разогрев объекта импульсами греющего тока и измерение в паузах между ними температуры перехода T_j [4]. Если нагревать MOSFET-транзистор в его обычном рабочем режиме, прикладывая к затвору напряжение $U_{ЗИ} > U_{пор}$ и пропуская импульсы греющего тока от стока к истоку, а измерять температуру в паузах, пропуская измерительный ток в обратном направлении (от истока к стоку), то при высокой амплитуде и частоте следования греющих импульсов это может

привести к снижению точности измерения теплового сопротивления. Поэтому в работе [5] было предложено нагревать MOSFET-транзисторы импульсами греющего тока, пропуская их через антипараллельные диоды. На рис. 1 протекание греющих импульсов через базовую ячейку транзистора показано стрелками.

Измерение теплового сопротивления «переход-корпус» таких транзисторов производилось с помощью модуляционного метода, в котором используется широтно-импульсная модуляция греющей мощности [6]. Метод основан на разогреве транзистора импульсами тока амплитуды $I_{гр}$ и длительности τ , изменяющейся по синусоидальному закону:

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

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

Модуляция греющей мощности вызывает соответствующие изменения температуры перехода T_j MOSFET-транзистора:

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

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

Измерив амплитуды переменных составляющих температуры перехода T_1 и мощности $P_1 = I_{гр} U_{гр} \frac{\tau_{ср}}{T_{сл}} a$ ($U_{гр}$ – напряжение на объекте во время протекания через него импульса греющего тока, $T_{сл}$ – период следования импульсов), можно определить модуль $Z_T(v)$ и фазу $\varphi(v)$ теплового импеданса на частоте модуляции v [7].

Нагрев MOSFET-транзисторов силового модуля путем пропускания импульсов тока через антипараллельные диоды имеют важную особенность. Для параллельно соединенных диодов существует положительная тепловая обратная связь. Это проявляется в том, что если при фиксированном

напряжении на диодах ток через один из них увеличится, то это приведет к локальному перегреву данного диода и дальнейшему увеличению тока через него. Как следствие, может произойти локальный перегрев отдельных кристаллов силового модуля, что исказит результаты измерения его теплового сопротивления. Такие процессы локализации тока, сопровождаемые локальным разогревом поверхности, наблюдалась у солнечных элементов при измерении их теплового сопротивления [8, 9].

Вместе с тем, следует учитывать тот факт, что транзисторы в силовом модуле расположены близко друг от друга на плате (рис. 2), изготовленной по технологии DBC (Direct Bonded Copper – прямое присоединение меди), обеспечивающей высокую теплопроводность плате. За счет процессов выравнивания температуры через плату DBC между отдельными кристаллами силового модуля влияние положительной тепловой обратной связи может быть существенно снижено.

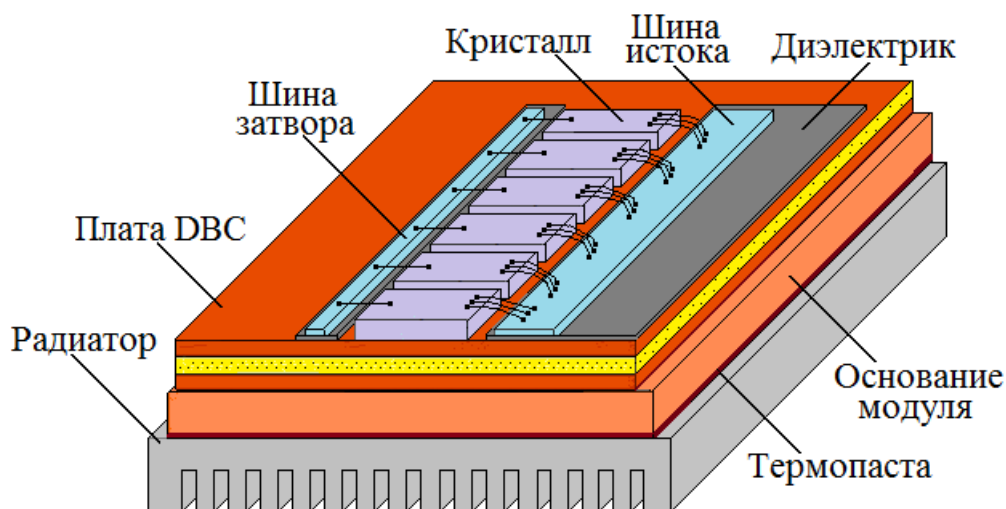


Рис. 2. Структура силового модуля.

С целью проверки возможной локализации тока и вызванного этим неоднородности распределения температуры по кристаллам силового модуля были произведены измерения теплового излучения поверхности модуля в процессе его нагрева. Объектом измерения являлся силовой модуль на MOSFET-транзисторах, разработанный филиалом ПАО «НПО «Энергомодуль» (г. Чебоксары). Регистрация температурного поля производилась

тепловизионной камерой Optotherm InfraSight MI320. Видеосъемка нагрева модуля производилась постоянным током $I = 40$ А в течение 2 мин. Кадры видеосъемки через 35, 70 и 105 с после начала разогрева представлены на рис. 3. Видно, что температура поверхности модуля в области монтажа кристаллов в течение всего времени разогрева остается примерно постоянной, достигая в конце процесса значения примерно 28°C . Данные результаты измерений указывают на то, что процессы локализации тока полностью компенсируются процессами выравнивания температуры между кристаллами через плату DBC.

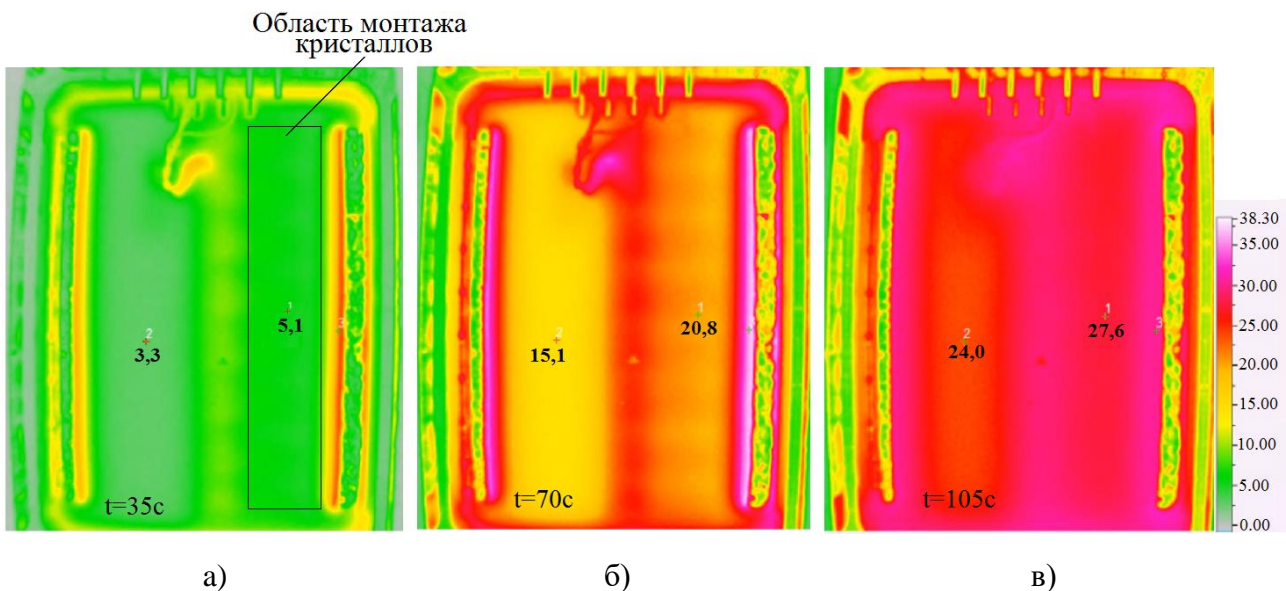


Рис. 3. Кадры видеосъемки процесса нагрева силового модуля, полученные с помощью тепловизионной камеры Optotherm InfraSight MI320:
а) через 35 с; б) через 70 с; в) через 105 с.

2. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления

Тепловое сопротивление силового модуля измерялось с помощью автоматизированного комплекса, подробно описанного в [5]. Основу комплекса составляет импульсный характериограф полупроводниковых приборов ИХПП, работой которого управляет микроконтроллер ATmega 128. В соответствии с управляющей программой микроконтроллер выполняет следующие действия:

- формирует ШИМ-импульсы греющего тока заданной оператором амплитудой, периодом следования и частотой модуляции;
- формирует импульсы с нарастающей по логарифмическому закону длительностью;
- формирует однократные импульсы или серии импульсов произвольной длительности;
- измеряет напряжение на вершине греющих импульсов и в паузах между ними;
- проверяет возникновение нештатных ситуаций и формирует коды ошибок для передачи их в компьютер;
- передает результаты всех измерений в компьютер.

Специализированное программное обеспечение осуществляет общий контроль за работой ИХПП, включающий в себя передачу пакета данных с установленными оператором режимами работы и параметрами измерений, обработку результатов измерений, ведение журнала с результатами измерений и ряд других сервисных функций. В комплексе реализовано несколько режимов работы:

- однократное измерение теплового импеданса на заданной частоте модуляции греющей мощности;
- измерение зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности и определение компонент теплового сопротивления;
- измерение переходной характеристики и ее анализ, позволяющий определить оптимальную длительность импульсов греющего тока для измерения теплового сопротивления «переход-корпус» стандартными методами;
- метод измерения теплового сопротивления «переход-корпус» на основе стандарта ОСТ 11 0944-96;
- режим испытаний, позволяющий произвести статистическую обработку серии измерений теплового сопротивления;
- измерение прямой ветви ВАХ.

3. Результаты измерения теплового сопротивления силового модуля

Объектом измерения теплового сопротивления являлся силовой модуль МТКП-250-3, максимальный прямой ток которого составляет 250 А, максимальное обратное напряжение – 300 В. В качестве ТЧП использовалось напряжение на антипараллельном диоде U_{SD} при протекании измерительного тока между истоком и стоком транзисторов модуля. Результаты измерения ТЧП представлены на рис. 4. Зависимость U_{SD} от температуры получилась линейной с температурным коэффициентом напряжения (ТКН), вычисленным методом наименьших квадратов, равным 2,61 мВ/К.

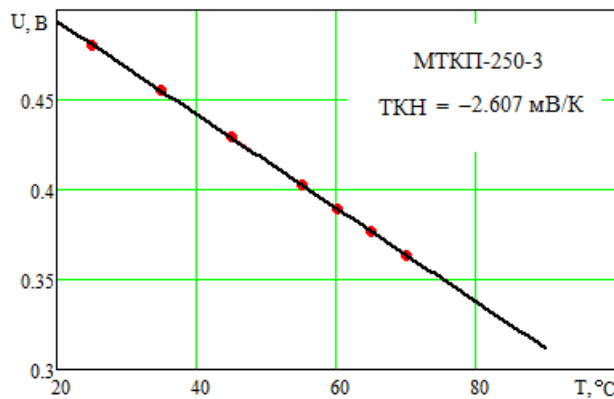


Рис. 4. Зависимость U_{SD} от температуры модуля.

При измерении теплового сопротивления силового модуля амплитуда импульсов греющего тока устанавливалась равной 12 А, период следования – 170 мкс. Измерения проводились при уменьшающейся по логарифмическому закону частоте модуляции в диапазоне от 500 до 0,2 Гц, количество измерений на одной декаде равнялось 20. Время задержки – интервал между окончанием греющего импульса и началом измерения ТЧП – составлял 40 мкс.

Результаты измерения частотной зависимости теплового импеданса приведены на рис. 5. В верхнем графическом окне показана частотная зависимость вещественной части теплового импеданса $Re Z_T(\nu)$, в нижнем – фаза теплового импеданса $\varphi(\nu)$. Соответствие номеров измерений и частот модуляции греющей мощности приведено в текстовом окне справа от графиков.

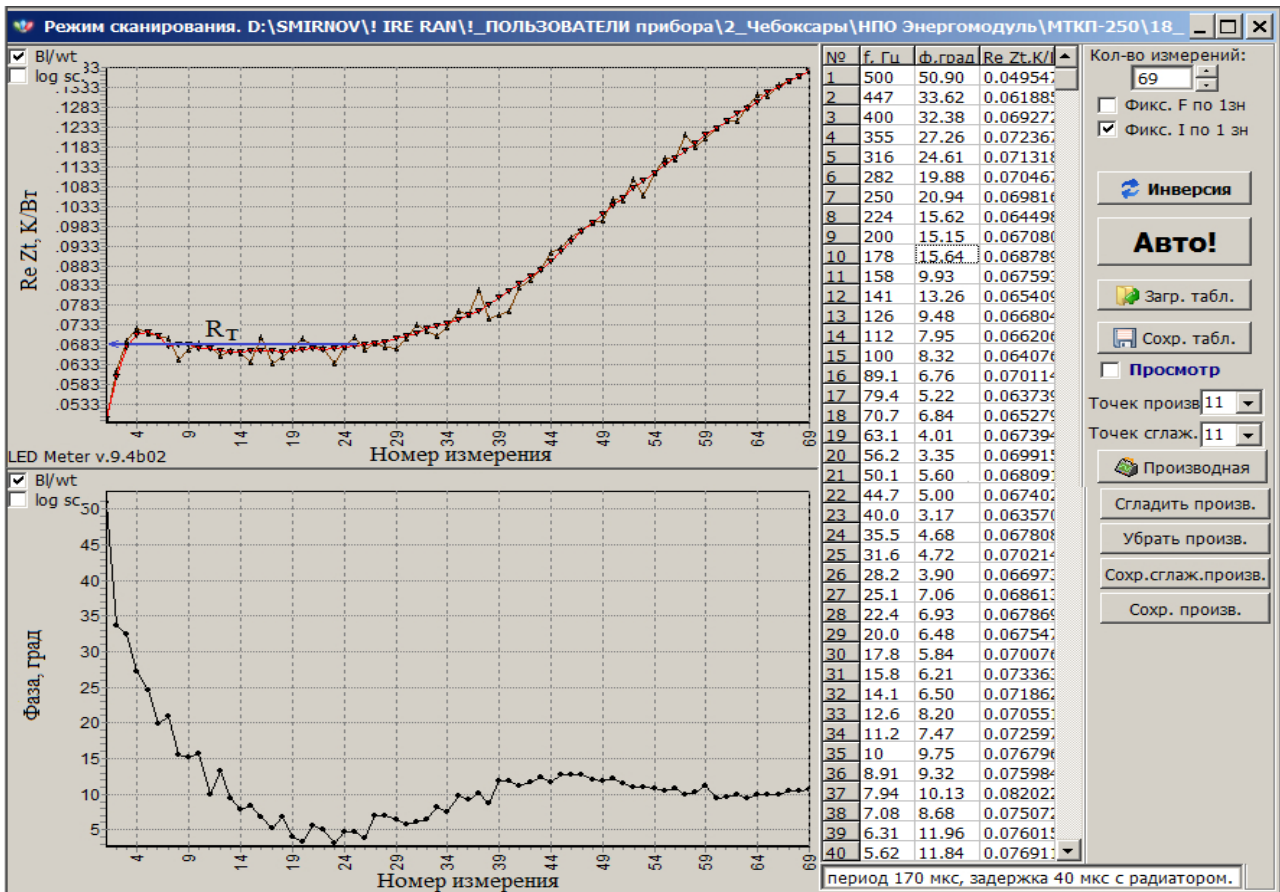


Рис. 5. Зависимость теплового импеданса силового модуля МТКП-250-3 от частоты модуляции греющей мощности при $I_{гр} = 12$ А.

На графике $Re Z_T(\nu)$ в диапазоне частот от 200 до 20 Гц наблюдается пологий участок. Примерно в этом же частотном диапазоне фаза теплового импеданса $\varphi(\nu)$ достигает минимальных значений. Это позволяет определить тепловое сопротивление «переход-корпус» R_{Tjc} , которое для исследуемого модуля МТКП-250-3 равно 0,068 К/Вт (в верхнем окне на рис. 5 оно показано стрелкой). Полученный результат измерения R_{Tjc} согласуется с типовыми значениями для аналогичных силовых модулей [10]. Следует отметить, что разогрев объекта измерения производился импульсами греющего тока, амплитуда которых примерно в 20 раз меньше значения максимального тока для данного типа силового модуля. Это является особенностью модуляционного метода, а именно, для измерения теплового сопротивления с погрешностью менее 5% достаточно обеспечить амплитуду переменной составляющей температуры перехода на уровне 1°C [5].

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать два вывода.

1. Несмотря на то, что между антипараллельными диодами MOSFET-транзисторов силового модуля существует положительная тепловая связь, способная привести к локализации тока через отдельные кристаллы модуля, в действительности этого не происходит. Причиной отсутствия влияния тепловой обратной связи на локализацию тока являются наличие подложки с высокой теплопроводностью (платы DBC), на которой смонтированы кристаллы. Плата DBC способствует выравниванию температуры между отдельными кристаллами модуля. Данный вывод подтвержден прямыми измерениями температурного поля, создаваемого нагретыми кристаллами модуля, которые проведены с использованием тепловизионной камеры Optotherm InfraSight MI320.

2. Тепловое сопротивление силового модуля можно измерять модуляционным методом, нагревая кристаллы модуля током, протекающим через антипараллельные диоды MOSFET-транзисторов. Даже при относительно небольшой амплитуде импульсов греющего тока модуляционный метод позволил произвести измерения теплового сопротивления силового модуля МТКП-250-3, значение которого согласно техническим характеристикам менее 0,1 К/Вт.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-48-730018.

Литература

1. Гавриков В., Солонин Д. Обзор силовых модулей SemiPowerex // Силовая электроника. – 2018. – №5. – С. 22–25.
2. Винтрих А., Бекедаль П. Нормирование теплового сопротивления IGBT: базовые принципы и некоторые особенности // Силовая электроника. – 2017. – №2. – С. 16–23.

3. Thermal Impedance Measurements for Vertical Power MOSFETs (Delta Source-Drain Voltage Method). JEDEC JESD24-3 standard.
4. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М. : ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.
5. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерение теплового импеданса мощных транзисторов // Радиотехника. – 2017. – №6. – С. 83–90.
6. Сергеев В.А., Смирнов В.И., Гавриков А.А., Фролов И.В. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 3. – С. 64–68
7. 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. – С. 98–105.
8. Plesz B., Ress S., Szabo P.G., Hantos G. and Dudola D. Issues of Thermal Transient Testing on Photovoltaic Modules // 20th International Workshop on Thermal investigations of IC's and Systems. Greenwich, London, 2014, 24-26 September.
9. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Куликов А.А. Особенности токораспределения в солнечных элементах при измерении теплового сопротивления в диодном режиме // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.5.11>.
10. Пастухов В. Современные российские силовые модули // Современная электроника. – 2006. – № 8. – С. 22–23.

Для цитирования:

Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Куликов А.А. Исследование теплорезистивных процессов в силовых модулях. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.12>