

Тепловой анализ MOSFET транзистора в корпусе TO-247 с алмазным теплоотводом

М. А. Мишнёв^{1,2}, О. С. Бохов^{1,2}, С. А. Пологов¹, А. Восколович¹, М. А. Потапов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²ООО «Экстрем-Карабаново»

mamishnev@gmail.com, pologov_semen@mail.ru

Аннотация. В работе представлена тепловая модель карбидокремниевый MOSFET-транзистора в корпусном исполнении TO-247. Исследованы два типа подложек под выводные рамки (Lead frame): стандартная медная подложка и CVD-алмазная пластина с высокой теплопроводностью. Монтаж кристаллов транзисторов на подложку выполнен с использованием двух методов: классической пайки паяльной пастой и низкотемпературного спекания серебра. Проведен сравнительный анализ максимальных рабочих температур для различных комбинаций подложек и связующих материалов. Результаты исследования демонстрируют влияние выбора материалов и технологий монтажа на тепловые характеристики транзисторов, что имеет важное значение для повышения эффективности и надежности силовой электроники.

Ключевые слова: MOSFET; карбид кремния; моделирование распространения тепла; алмазный теплоотвод; синтеринг

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития силовой электроники связаны с постоянным увеличением требований к энергоэффективности, компактности и надёжности устройств, что стимулирует активное внедрение новых материалов и технологий. Одним из наиболее перспективных материалов для создания силовых полупроводниковых приборов является карбид кремния (SiC), который благодаря своим уникальным физическим свойствам открывает новые возможности для проектирования высокопроизводительных устройств [1]. Ширина запрещенной зоны более 3 эВ и высокая теплопроводность до 490 Вт/(м·К) позволяют SiC-приборам работать при значительно более высоких температурах, напряжениях и частотах по сравнению с традиционными аналогами на кремнии (Si). Эти характеристики делают SiC-устройства особенно востребованными в таких областях, как электромобили, системы возобновляемой энергетики, промышленные преобразователи мощности и системы управления энергопотреблением.

Одним из наиболее распространённых корпусов для MOSFET-транзисторов и диодов является TO-247, который широко используется благодаря своей универсальности, надёжности и удобству монтажа [2]. Однако применяемые конструкции TO-247 для кремниевых устройств, не всегда способны эффективно справляться с тепловыми нагрузками, возникающими при работе SiC-приборов. Длительная эксплуатация TO-247 при повышенных температурах сопровождается выделением значительного количества тепла, что может

приводить к образованию трещин и расслоению связующих слоев [3]. Эти дефекты негативно влияют на электрические параметры, такие как сопротивление открытого канала транзистора, паразитные индуктивности и емкости. Кроме того, значительные перепады температур вызывают термические напряжения из-за различий в коэффициентах теплового расширения (КТР) материалов, что ухудшает производительность устройства и сокращает его срок службы. В связи с этим для обеспечения надежности SiC-устройств необходимо улучшать их электрические характеристики и поддерживать температуру перехода на допустимом уровне.

Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы является использование алмазного теплоотвода в конструкции корпуса TO-247. Алмаз, обладающий высокой теплопроводностью (до 2000 Вт/(м·К)), значительно превосходит материалы, такие как медь (около 400 Вт/(м·К)) и алюминий (около 200 Вт/(м·К)) [4]. Это делает алмаз идеальным материалом для эффективного отвода тепла от SiC-приборов, что особенно важно для устройств, работающих при высоких плотностях тока и температурах.

Целью данной работы является сравнение тепловых характеристик корпуса TO-247 с алмазным теплоотводом и стандартного корпуса TO-247. Для достижения этой цели, было проведено моделирование, которое позволило провести анализ и сравнение ключевых параметров двух вариантов корпусов.

II. ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ MOSFET-ТРАНЗИСТОРА В КОРПУСЕ TO-247

A. Описание конструкции

Конструкция TO-247 включает три основных элемента: металлические выводы, пластиковый корпус и подложку. Подложка в TO-247 представляет из себя медную пластину, которая обеспечивает хороший тепловой контакт с кристаллом полупроводника. Для подключения кристалла к внешней схеме используют три вывода: затвор (Gate), сток (Drain) и исток (Source). Соединение выводов с кристаллом осуществляется с помощью алюминиевой проволоки. Выводы изготавливаются из меди с защитным покрытием (никель, золото) для предотвращения коррозии и окисления. Расстояние между выводами стандартизировано, что упрощает монтаж на печатную плату или радиатор. Выводы и подложка фиксируются через lead frame в пластиковом корпусе с помощью

прецизионной литьевой формовки. Корпус изготавливается из термостойких материалов (например, эпоксидных смол), обеспечивающих электрическую изоляцию и механическую защиту.

В данной работе предлагается альтернативная конфигурация ТО-247 с поликристаллической алмазной подложкой, теплопроводность которой составляет 1800 Вт/м·К. Модели конструкции стандартного ТО-247 и его модификации на основе алмазного тепловода представлены на рис. 1.

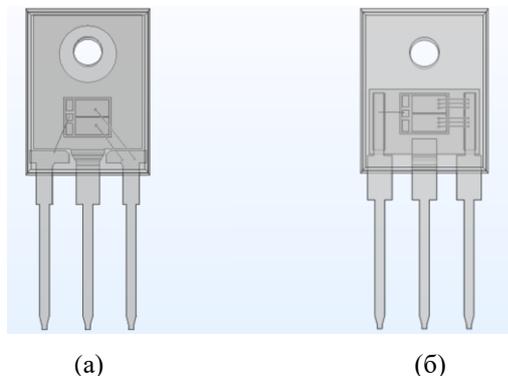


Рис. 1. Модели конструкций стандартного ТО-247 (а) и ТО-247 на алмажном тепловоде (б)

Для нанесения слоев металлизации на алмаз используют вакуумные методы напыления. В качестве проводящего слоя выступает медь с адгезионным подслоем титана. Крепление выводов осуществляется непосредственно на подложку, причем крайние выводы под затвор и исток фиксируются через керамические проставки из нитрида алюминия.

В. Методы монтажа кристалла

Монтаж кристаллов транзисторов на подложку является важным этапом производства полупроводниковых устройств, так как он влияет на тепловые и электрические характеристики компонента. В настоящее время широко применяются два метода монтажа: пайка паяльной пастой и низкотемпературное спекание серебра (синтеринг). Преимуществами метода пайки паяльной пасты являются простота процесса и низкая стоимость материалов. Однако этот метод имеет и ряд недостатков. Во-первых, термостойкость соединения ограничена, так как припой может плавиться при высоких температурах, что делает его непригодным для устройств с экстремальными тепловыми нагрузками. Во-вторых, из-за разницы коэффициентов теплового расширения (КТР) материалов могут возникать механические напряжения, что снижает надежность соединения.

Процесс синтеринга является более современным методом и по сравнению с пайкой имеет высокую термостойкость (соединение сохраняет стабильность при температурах до 400 °С и выше) и отличную теплопроводность (табл. 1) [5].

ТАБЛИЦА 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СВЯЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Связующий компонент	Теплопроводность [Вт/мК]
Паяльная паста	52
Паста для синтеринга	120

Помимо этого, метод низкотемпературного спекания обеспечивает большую механическую прочность и является экологичным, так как в процессе не используются свинцовые соединения [6,7].

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Для расчёта температурного профиля структуры используется уравнение теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T = q, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности; T – температура; q – плотность теплового потока; ρ – плотность материала; C_p – теплоёмкость материала; t – время.

Реализация итоговой математической модели протекающих физических процессов выполняется методом конечных элементов. Для решения использовались следующие начальные и граничные условия:

- 1) источником нагрева является поток тепла постоянной мощности в 250 Вт;
- 2) тепловой поток приложен к границе кристалл-подложка;
- 3) поверхность элементов, контактирующая с атмосферой, является излучателем, соответствующий естественной конвекции с воздухом;
- 4) транзистор крепится на радиатор через термоинтерфейс (на границе термопаста-радиатор стоит условие постоянной температуры);
- 5) величина излучения остальных элементов структуры пренебрежимо мала благодаря эпоксидному покрытию.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты температурного распределения в корпусе ТО-247 для двух типов монтажа кристаллов показаны на рис. 2.

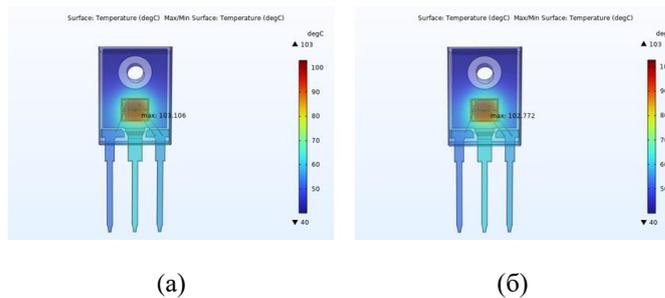


Рис. 2. Температурное распределение в ТО-247 с использованием пайки (а) и низкотемпературного спекания серебра (б)

Максимальная температура перехода транзистора при рассеиваемой мощности 250 Вт составила примерно 103 °С, при этом замена связующих материалов дает незначительную разницу в 0.5 °С.

На рис. 3 показано распределение температуры в корпусе ТО-247 на медной и алмазной подложках с использованием технологии синтеринга.

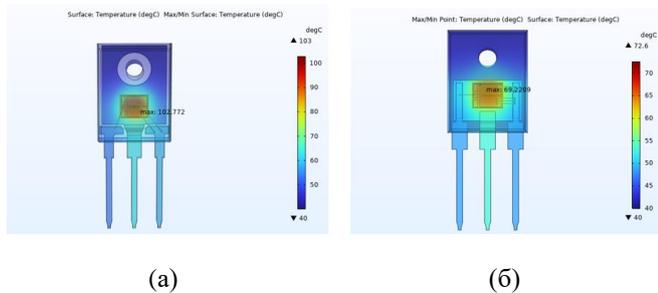


Рис. 3. Сравнение распределения тепла в TO-247 с медным (а) и алмазным (б) теплоотводом

Конструкция с алмазной подложкой высокой теплопроводности показала температуру перехода 69 градусов, что примерно на 30% меньше, чем у корпуса с медным основанием, при одинаковых условиях эксплуатации.

Общие результаты теплового анализа представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. СРАВНЕНИЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР TO-247 С РАЗЛИЧНЫМИ СВЯЗУЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ И ПОДЛОЖКАМИ

	Пайка на PbSn	Ag синтеринг
TO-247 с медным основанием	103.1 °C	102.8 °C
TO-247 с алмазным теплоотводом	69.7 °C	69.2 °C

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода конечных элементов проведено компьютерное моделирование силовых MOSFET-транзисторов в корпусе TO-247. Результаты моделирования структуры с алмазным теплоотводом показали значительное снижение максимальной температуры по сравнению с корпусом с медным основанием. Тепловое сопротивление корпуса было снижено, что обеспечило более эффективный отвод

тепла от кристалла SiC. Также алмазный теплоотвод способствует более равномерному распределению тепла по площади кристалла, минимизируя риск локального перегрева и теплового разрушения.

Технология низкотемпературного спекания серебра, по сравнению с монтажом при помощи паяльной пасты дала малый эффект снижения максимальной температуры из-за толщины и размера связующего материала. Однако, учитывая высокие тепловые нагрузки при длительных периодах времени работы силовых MOSFET-транзисторов, применение технологии синтеринга вместо пайки позволит обеспечить большую надежность и увеличить долговечность устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Афанасьев А.В., Ильин В.А., Лебедев А.О., Лучинин В.В., & Таиров Ю.М. Карбид кремния-наноразмерный алмазоподобный широкозонный полупроводниковый материал и приборы на его основе // Биотехносфера. 2011. №. 1-2 (13-14). С. 11-19.
- [2] Mandal M., Roy S. K., Basu K. Analytical switching transient model of TO-247-4 packaged SiC MOSFETs and comparison with TO-247-3 devices //2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2022. С. 1-8.
- [3] Araki S. et al. Degradation analysis of TO-247 package sic-mosfets subjected to high temperature storage and heavy thermal cycle test //Additional Papers and Presentations. 2016. Т. 2016. №. HiTEC. С. 000169-000174.
- [4] Ланин В., Телеш Е. Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности //Силовая электроника. 2008. №. 17. С. 120-124.
- [5] А. Афанасьев, О. Бохов, В. Ильин, В. Лучинин. Технология синтеринга в силовой и импульсной электронике на основе карбида кремния // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 2(213). С. 98-105.
- [6] A S. Sakamoto, S. Nagao and K. Suganuma, "Thermal fatigue of Ag flake sintering die-attachment for Si/SiC power devices", // J. Mater. Sci: MaterElctron, pp. 593-2601, 2013.
- [7] F. Yu, J. Cui, Z. Zhou, K. Fang, R. W. Johnson and M. C. Hamilton, "Reliability of Ag Sintering for Power Semiconductor Die Attach in High-Temperature Applications," // in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 9, pp. 7083-7095, Nov. 2016.