

Моделирование процесса распространения тепла в силовых модулях на основе карбида кремния

М. А. Мишнёв¹, А. А. Соловьёв, О. С. Бохов, Н. А. Хиль², С. А. Пологов³

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

¹mamishnev@gmail.com, ²khilnikita@rambler.ru, ³pologov_semen@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование распределения тепла в структуре силового модуля с применением одностороннего охлаждения в виде керамики и алмазосодержащего теплоотвода. В качестве силовых элементов рассмотрены SiC-транзистор CPM2-1200-0040A и диод EPW4-1200-S010A. Для проведения моделирования использовался программный пакет COMSOL Multiphysics.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковый моно- и поликристаллический кремний (Si) остается на сегодняшний день основным материалом для производства силовых твердотельных электронных приборов в диапазоне среднего и высокого напряжений благодаря дешевизне, доступности сырья, технологичности и наличию освоенных промышленностью методов получения кристаллов. В области низкого напряжения кремниевая технология применяется, например, для изготовления силовых МОП и IGBT транзисторов с вертикальной структурой, однако кремниевая технология приближается к пределам производительности, обусловленным фундаментальными свойствами Si, и дальнейший прогресс возможен только за счет перехода на другие, широкозонные полупроводники, такие как нитрид галлия и карбид кремния. Приборы на базе широкозонных полупроводников обладают по сравнению с Si-приборами рядом преимуществ: высокими значениями напряжения пробоя, высокой теплопроводностью и более низким сопротивлением открытого канала в МОП-транзисторах. По сравнению с Si приборами GD-MOSFET, SJ-MOSFET, CoolMOS сопротивление открытого канала 4H-SiC МОП-транзистора с экранированной вертикальной структурой с накопительным слоем ACCUFET примерно в пять раз меньше [1].

При сопоставимых номинальных значениях напряжения и тока SiC-приборы имеют гораздо меньшие размеры, чем их Si-аналоги. Удельное сопротивление в проводящем состоянии SiC-транзистора в 5 раз меньше, чем у Si IGBT [2–3]. Размеры SiC-транзисторов примерно в 4,4 раза меньше, чем у кремниевых аналогов. Уменьшение площади кристалла открывает возможность для увеличения удельной мощности силовых модулей. При тех же потерях мощности тепловой поток, идущий через нижнюю часть кристалла, резко возрастает с 100–250 до 1 кВт/см². Высокий тепловой поток и малая теплоемкость создают проблемы с корпусированием и системой терморегулирования для силовых SiC-модулей.

Вместе с этим возникают проблемы при сборке силовых модулей, т.к. их конструкция и материалы оказывают существенное влияние на тепловые, электрические и механические характеристики. В связи с этим актуальной становится проблема эффективного охлаждения таких устройств, особенно в условиях повышенного тепловыделения.

Благодаря высокой теплопроводности алмаза в настоящее время более широкое применение находят алмазные теплоотводы [4]. Использование алмазных теплоотводов позволит значительно улучшить тепловые характеристики приборов силовой электроники.

С целью модернизации приборов силовой электроники было предложено провести моделирование процесса распространения тепла в силовых модулях на основе карбида кремния с керамическим теплоотводом и алмазным теплоотводом.

II. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Одним из главных источников теплового потока в силовых модулях является омический самонагрев. Общие потери (P_M) SiC-транзисторов с вертикальной структурой, используемых в качестве ключей в силовой преобразовательной технике, включают в себя потери проводимости P_{CM} и потери на переключение P_{swM} .

$$P_M = P_{CM} + P_{swM} \quad (1)$$

Первые представляют собой значение мгновенных потерь, усредненных за период [5]:

$$\begin{aligned} P_{CM} &= \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} P_{CM}(t) dt = \\ &= \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (R_{DSon} \cdot i_D^2(t)) dt = R_{DSon} \cdot I_{Drms}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где i_D – ток стока, T_{sw} – период переключения, R_{DSon} – сопротивление сток-исток в открытом состоянии, I_{Drms} – среднеквадратичное значение тока открытого состояния транзистора.

Для расчета фактического значения потерь проводимости следует учесть коэффициент заполнения транзистора, определяемый методом модуляции силового преобразователя. На практике в случае синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) коэффициент принимается равным 0,5. Как и в случае ШИМ со сдвигом фаз (как, например, в полно- или полумостовых H-конверторах на основе 2-уровневых автономных инверторов напряжения, работающих на активно-индуктивную нагрузку) без

учета бестоковой паузы, необходимой для обеспечения ZVS (ZVS – численное значение величины, обратной скажности импульсов).

Потери МОП-транзисторов на переключение определяются энергиями включения транзистора без учета потерь на обратное восстановление, а также встроенного диода обратного тока E_{onM} и выключения транзистора E_{offM} :

$$P_{swM} = (E_{onM} + E_{offM}) \cdot f_{sw} \quad (3)$$

$$E_{onM} = \int_0^{tri+tfu} u_{DS} \cdot i_D(t) dt = U_{DD} \cdot I_{Don} \cdot \frac{tri+tfu}{2} + Q_{rr} \cdot U_{DD} \quad (4)$$

$$E_{offM} = \int_0^{tru+tfi} u_{DS} \cdot i_D(t) dt = U_{DD} \cdot I_{Doff} \cdot \frac{tri+tfu}{2},$$

где tri , tfu – время нарастания и спада мощности при включении, tru , tfi – время нарастания и спада мощности при выключении, u_{DS} – напряжение «сток-исток», U_{DD} – максимальное значение напряжения, I_{Don} , I_{Doff} – токи во время включения и выключения, Q_{rr} – заряд обратного восстановления.

Аналогично потери диода:

$$P_D = P_{CD} + P_{swD} \quad (5)$$

$$P_{CD} = u_{D0} \cdot I_{Fav} + R_D \cdot I_{Frms}^2, \\ P_{swD} = (E_{onD} + E_{offD}) \cdot f_{sw} \approx E_{onD} \cdot f_{sw}, \\ E_{onD} = \int_0^{tri+tfu} u_D(t) \cdot i_F(t) dt = 0.25 \cdot Q_{rr} \cdot U_{DD} = \\ = U_{DD} \cdot I_{Don} \cdot \frac{tri+tfu}{2} + Q_{rr} \cdot U_{DD}, \quad (6)$$

где i_F – прямой ток, I_{Fav} – импульсный ток, I_{Frms}^2 – среднеквадратичное значение импульсного тока.

III. НАГРЕВ СИЛОВОГО МОДУЛЯ

Для определения нагрева силового модуля используется уравнение теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T = q \quad (7)$$

где k – коэффициент теплопроводности, T – температура, q – плотность теплового потока, ρ – плотность материала, C_p – теплоёмкость материала, t – время. Уравнение решалось численно в программном пакете COMSOL Multiphysics. Для решения использовались следующие начальные и граничные условия:

- Источником нагрева является поток тепла постоянной мощности, эквивалентный мощности потерь, выделяемой на силовых элементах в процессе работы электрической схемы.
- Тепловой поток приложен к границе кристалл-подложка.
- Поверхность радиатора, контактирующая с атмосферой, является излучателем конвекционного типа с величиной излучения

10 Вт/м²К, что соответствует естественной конвекции с воздухом [6].

- Величина излучения остальных элементов структуры пренебрежимо мала благодаря покрытию из компаунда.

На рис. 1 показано поперечное сечение типичной структуры силового модуля. Сверху находятся SiC-кристаллы, которые соединены с DBC-подложкой (Direct Bonded Copper – «прямо присоединенная медь») методом синтеринга (низкотемпературное спекание серебра). Спекание серебра (Ag) – метод создания бессвинцового соединения, обеспечивающий более высокие рабочие температуру, тепло- и электропроводность, чем у припойных паст. DBC действует как электрическая изоляция и состоит из трех слоев: двух медных слоев и керамической изоляционной подложки. Задача керамических подложек – изолировать токоведущие части модуля. Слой DBC прикреплен к основанию, который помогает снизить температуру до рабочего уровня.



Рис. 1. Структура силового модуля

Геометрические параметры слоёв структуры представлены в табл. 1. В качестве изоляционной подложки использовались керамика оксида алюминия и алмаза.

ТАБЛИЦА I. РАЗМЕРЫ СЛОЁВ СИЛОВОГО МОДУЛЯ

Слой	Длина (мм)	Ширина (мм)	Толщина (мм)
Чип SiC	4.04	6.44	0.2
Диод	2.26	2.26	0.37
Ag паста	33	10	0.02
Медь	20	20	0.4
Al ₂ O ₃ /Алмаз	20	20	0.5

В работе рассматриваются силовый транзистор CPM2-1200-0040A и диод EPW4-1200-S010A. Потери мощности для данных элементов из формул (1–6) составили 33,16 и 11,75 Вт соответственно. Расчёт потерь проводился для частоты $f_{sw} = 10$ кГц.

Параметры материалов структуры, используемые в модели COMSOL, выбирались в соответствии с информацией, представленной в таблице данных, и данными, представленными в справочном модуле программного пакета. Параметры материалов для моделирования представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. ПАРАМЕТРЫ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Материал	ρ , Кг/м ³	k , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)
Al радиатор	2700	238	900
Cu	8940	400	385
Al ₂ O ₃	3740	18	880
Ag	10470	440	235
SiC чип/диод	3219	490	690
Алмаз	3520	2100	660

Распределение тепла в силовом модуле представлено на рис. 2. Данный температурный градиент построен в режиме теплового равновесия, при котором тепловыделение и теплоотдача одинаковы. Как видно из рисунка, температура силовых элементов, являющихся основным источником тепла, намного выше, чем в других областях, что позволяет предположить, что область вокруг кристаллов может подвергаться высоким тепловым нагрузкам.

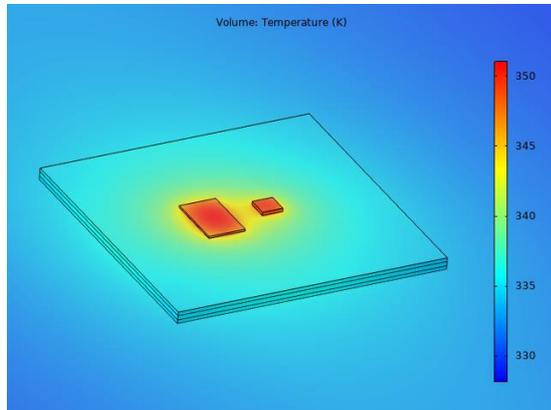


Рис. 2. Распределение температуры в силовом модуле

На рис. 3 представлены временные зависимости температуры нагрева элементов на подложках с керамикой и алмазом. Как видно из рисунка замена керамики оксида алюминия на алмаз позволяет снизить температуру транзистора и диода в установившемся режиме на 10 °C.

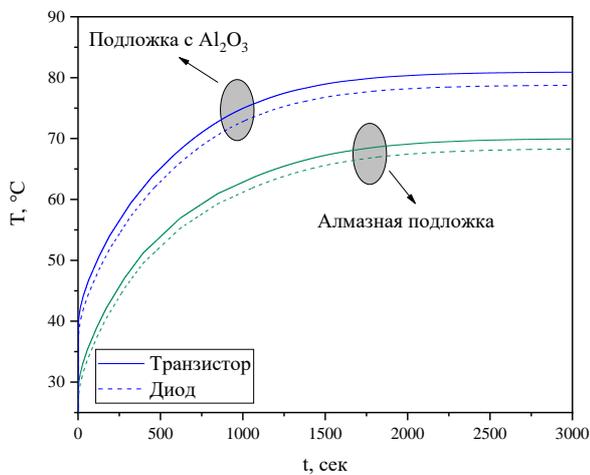


Рис. 3. Сравнение температуры нагрева для силовых элементов с разными подложками

Распределение температуры по структуре модуля представлено на рис. 4. Распределение измерялось от центра чипа по срезу до радиатора. Видно, что структура с керамической подложкой имеет перепад температур, в то время как алмаз практически полностью отводит тепло. Такое различие объясняется существенной разницей в теплопроводности материалов.

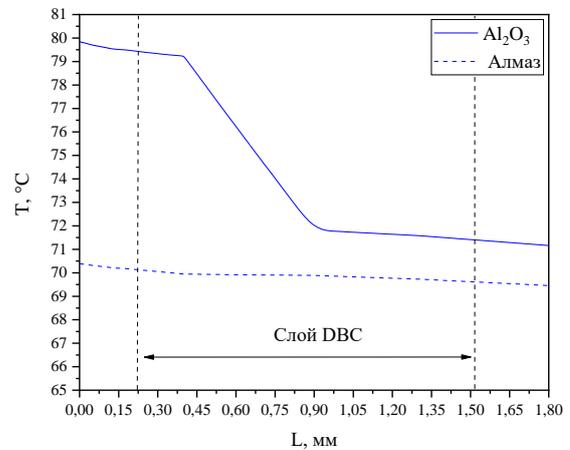


Рис. 4. Температурный профиль по срезу структуры для разных подложек

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование распределения тепла материала алмаза при его внедрении в виде слоя в систему упаковки силового модуля. Результаты показали, что использование подложки с алмазом вместо классической керамической подложки приводит к улучшению распределения тепла между слоями и к общему снижению температуры на 15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sadow S., Agarwal A. *Advances in Silicon Carbide. Processing and applications* / Artech house. 2004. pp. 73-170.
- [2] An Innovative Additively Manufactured Design Concept of a Dual-Sided Cooling System for SiC Automotive Inverters / Abramushkina E., Martin G., Sen A., Jaman S., Rasool H., Baghdadi M., Hegazy O. // *IEEE Transactions On Power Electronics*. 2024. Vol. 12. pp. 20454-20470.
- [3] Direct Integration of Optimized Phase-Change Heat Spreaders Into SiC Power Module for Thermal Performance Improvements Under High Heat Flux / Mu W., Wang L., Wang B. Zhang T., Yang F., Gan Y., Zhang H. // *IEEE Transactions On Power Electronics*. 2022. Vol. 37. № 5. pp. 5398-5410.
- [4] Ланин В. Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // *Силовая электроника*. 2008. № 3. С. 120–124
- [5] Graovac D., Purschel M., Kiep A. MOSFET power losses calculation using the datasheet-parameters. Application Note. 2006. URL: <https://application-notes.digchip.com/070/70-41484.pdf>.
- [6] Edge E. Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart. URL: https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm.