

# GaN-СИСТЕМЫ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ – ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА

Д.Мердок<sup>1</sup>, М.Вудс<sup>2</sup>, Г.Кон<sup>3</sup>

УДК 621.382  
ВАК 05.27.00

Сегодня широко востребованы интегральные схемы усилителей, рассчитанные на большую выходную мощность (десятки ватт и выше) и в то же время имеющие относительно малые размеры. Для создания таких устройств подходят структуры нитрида галлия на подложках из карбида кремния (GaN-on-SiC), которые позволяют получить высокую удельную плотность мощности – более 5 Вт на миллиметр затвора транзистора. Для проектирования GaN-систем необходимы модели, корректно описывающие тепловые режимы их работы. В чем специфика теплового моделирования GaN-устройств?

**Д**ля того чтобы полностью учесть тепловые эффекты в GaN-устройствах, был разработан комплексный подход, включающий электрическое моделирование кристалла (die-level electrical modelling), проведение экспериментов и расчеты на основе метода конечных элементов (МКЭ). Рассмотрим этапы реализации и особенности данного подхода.

## ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ

Для создания базовой тепловой модели сначала проводится электромоделирование GaN-устройства. Полученные на его основе оценки тепловыделения позволяют предварительно определить температурное поле (рис.1). Затем устройство изготавливают и тестируют.

Эмпирические данные для тепловой модели получают посредством измерения электрических параметров (удельного сопротивления и токов) и рамановской термографии – неинвазивного оптического метода, основанного на спектроскопии комбинационного рассеяния. Термография позволяет измерять температуру

зон размером доли микрона с наносекундным разрешением по времени. Это дает возможность уловить изменение в частоте температурно-индуцированных фононов в исследуемом материале по сравнению с частотой фононов, измеренной при комнатной температуре. Дополнительные детали измерений методом микро-рамановской термографии описаны в [1, 2].

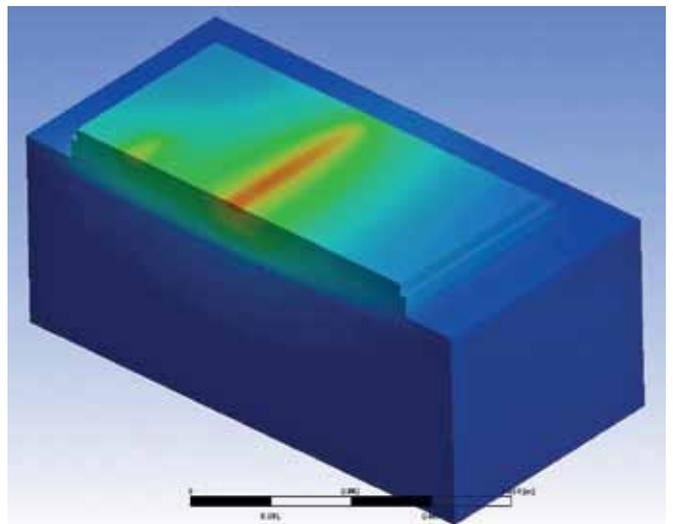


Рис.1. Тепловая модель GaN-устройства

<sup>1</sup> Qorvo, инженер сборки микросхем и корпусирования.

<sup>2</sup> Qorvo, инженер сборки микросхем и корпусирования.

<sup>3</sup> Макро Групп, руководитель направления ВЧ, силовые и оптические компоненты, George.Cohn@macrogroup.ru.

Комбинация методов измерения, включая рамановский и электрический, в сочетании с тепловым моделированием позволяет получить достоверные данные о тепловых свойствах GaN-материала.

Измеренные характеристики используются для создания конечно-элементной модели, на основе которой прогнозируется поведение устройства при различных значениях температуры. Как правило, требуется несколько итераций между микро-рамановской термографией и методом конечных элементов для создания реальной тепловой модели устройства, учитывающей его геометрию, свойства материалов и др.

Метод конечных элементов используется для определения мощности и условий окружающей среды, необходимых для работы устройства при заданной температуре. На основе этой информации можно оценить надежность устройства и построить для него кривую Аррениуса. Сегодня длина затвора GaN-транзистора составляет 0,15 мкм и меньше. Это означает, что при микро-рамановской термографии происходит усреднение измеряемых параметров по площади, что находит отражение в тепловых моделях и кривых Аррениуса. На основе результатов моделирования можно определить среднее время наработки на отказ (Mean Time To Failure, МТТФ) и достаточно точно предсказать срок службы изделия.

## ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ

Когда основа для тепловой модели готова, МКЭ используется для определения температуры подзатворного канала и термического сопротивления устройств. Метод конечных элементов сначала применяется для моделирования бескорпусного устройства, потом – устройства в корпусе и, наконец, всего изделия, включая микросборки и т.д. Важно выбрать правильные граничные условия, учитывать влияние сделанных допущений. Некорректные допущения, заложенные в граничные условия, зачастую приводят к ошибкам в проектировании и, как следствие, отказам в работе готовых изделий.

## Использование ИК-измерений и их ограничения

ИК-микроскопы – широко распространенное средство поиска мест дефектов или точек перегрева в полупроводниковых устройствах (рис.2). Однако ИК-методы имеют ограниченное применение из-за малой пространственной разрешающей способности. ИК-микроскоп не может выделить элемент величиной с активную область транзистора [3]. Поэтому ИК-измерения неизбежно дают усредненные результаты, так как каждый пиксель ИК-изображения включает холодные неактивные зоны вокруг горячих участков. Другими словами, когда выполняется ИК-измерение области шириной,

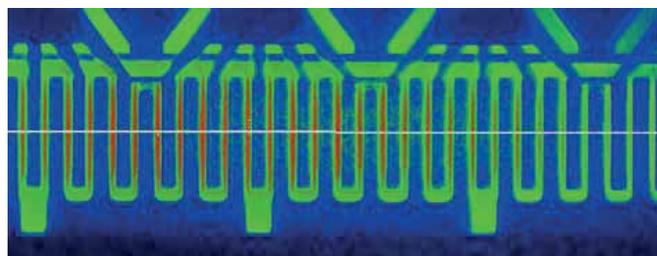


Рис.2. ИК-изображение ячейки типичного GaN НЕМТ транзистора

например, 0,25 мкм результат может быть на 20–30 °C ниже максимальной температуры активной области.

Чтобы показать недостатки, связанные с недостаточной разрешающей способностью при ИК-измерениях GaN-устройства, была построена симметричная модель конечных элементов, из которых оно состоит. Модель имеет продольную симметрию относительно оси Y (рис.3). Предполагается, что устройство припаяно к медно-вольфрамовой (CuW) основе толщиной 0,04 дюйма золотоловянным составом. В качестве граничного условия задана температура CuW-основы 85 °C.

Объемная тепловая нагрузка, типичная для GaN-устройства, была приложена к подзатворному каналу. В результате моделирования получены трехмерное распределение температурного поля (рис.3а) и соответствующая температура поверхности (рис.3б).

Самая высокая температура 204 °C зафиксирована в ходе моделирования в средней точке GaN-канала (координата  $x=0$  для данной полумодели). Эта точка находится под поверхностью и не может быть отображена на ИК-термограмме.

Данный пример демонстрирует, что применение ИК-термографии для измерения температуры обла-

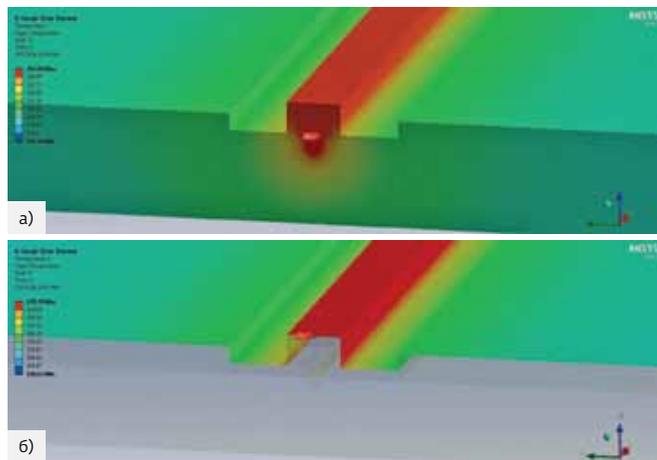
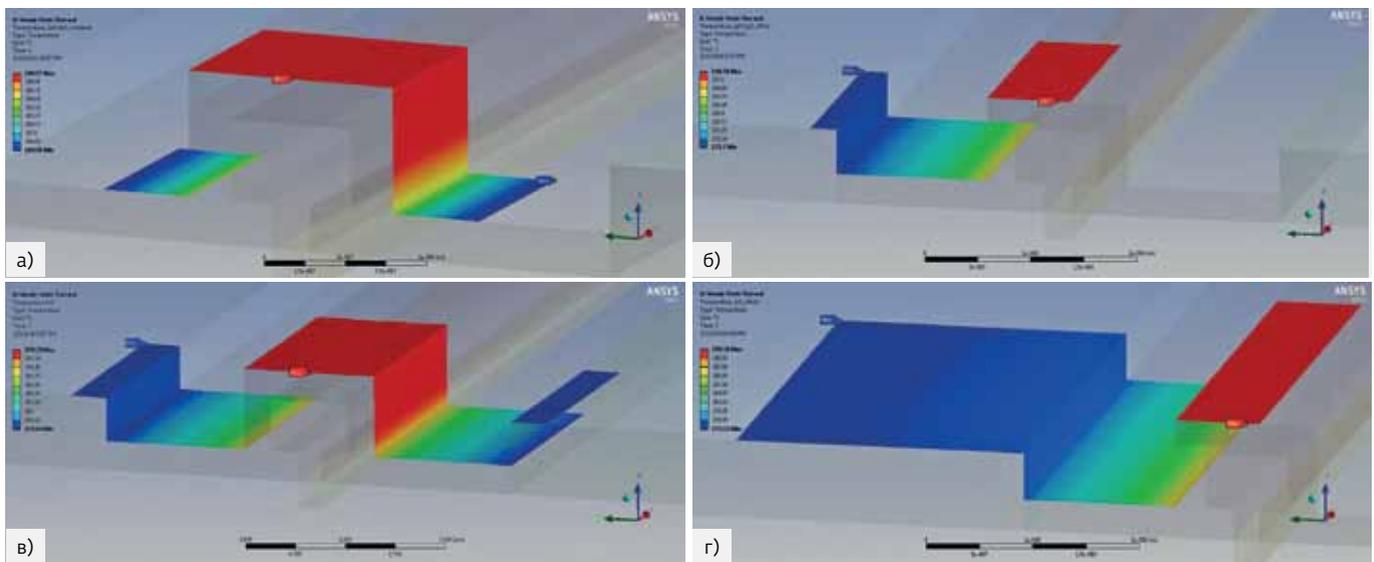


Рис.3. Распределение температуры в GaN-слое толщиной ~2 мкм над SiC-подложкой (а) и над затвором (б)



**Рис.4.** Распределение температуры в различных областях поверхности: а – область 1 (ширина 2,5 мкм), центр расположен над самой горячей точкой канала; б – область 2 (ширина 2,5 мкм), сдвиг по осям x и y; в – область 3 (ширина 5 мкм), центр расположен над самой горячей точкой канала; г – область 4 (ширина 5 мкм), сдвиг по осям x и y

сти размером  $2,5 \times 2,5$  мкм, соответствующим предельному разрешению данного метода, дает результат, который на  $8\text{--}15^\circ\text{C}$  ниже пикового значения в канале (табл.1, рис.4). Разброс отклонений связан с невозможностью точно совместить пиксель изображения с самой горячей секцией канала. На рис.4б и 4д показано влияние сдвига, при котором пиксель ИК-изображения попадает на границу GaN-канала. В этом случае, при размере области  $2,5 \times 2,5$  мкм измеренная температура оказывается ниже максимальной на  $15^\circ\text{C}$ , а если размер области составляет  $5,0 \times 5,0$  мкм, то на  $21^\circ\text{C}$ .

Процессы, задействованные при изготовлении GaN-транзисторов, имеют размерности в доли микрометров, а локальные области перегрева значительно меньше  $0,5$  мкм. В то же время ИК-микроскопия, как отмечалось

выше, способна детально отображать лишь объекты на порядок большего размера.

Кроме того, ИК-термография измеряет температуру только поверхности GaN-транзистора, а область с пиковой температурой зачастую расположена под поверхностью. Занижение температуры оказывается еще сильнее в случае импульсного режима работы транзистора, поскольку из-за большой тепловой постоянной времени полупроводникового материала область над горячей зоной не успевает прогреться за время между импульсами.

И, наконец, следует отметить, что излучательная способность ( $\epsilon$ ) поверхности кристалла значительно варьируется. Распространенное решение – выкрасить поверхность кристалла в черный цвет, чтобы достичь  $\epsilon$ ,

**Таблица 1.** Оценки температуры различных областей

Измеренная зона или область поверхности	Размеры, мкм	Выравнивание относительно горячей точки	Истинное значение максимальной температуры, $^\circ\text{C}$	Температура поверхности, измеренная ИК-способом, $^\circ\text{C}$
Смоделированное GaN-устройство	–	–	204,3	–
Область 1	$2,5 \times 2,5$	Центрирована	–	195,9
Область 2	$2,5 \times 2,5$	Сдвинута	–	189,1
Область 3	$5,0 \times 5,0$	Центрирована	–	188,3
Область 4	$5,0 \times 5,0$	Сдвинута	–	183,0

близкого к 1, но стабильное значение  $\varepsilon$  на практике обеспечить невозможно.

При учете эффекта изменения излучательной способности ИК-термография может давать температуру, заниженную на 34°C по сравнению с максимальной (табл.2). Еще одна проблема заключается в том, что в случае окрашивания на кристалле появляется диэлектрический слой, а это приводит к трудно прогнозируемому изменению его СВЧ-характеристик.

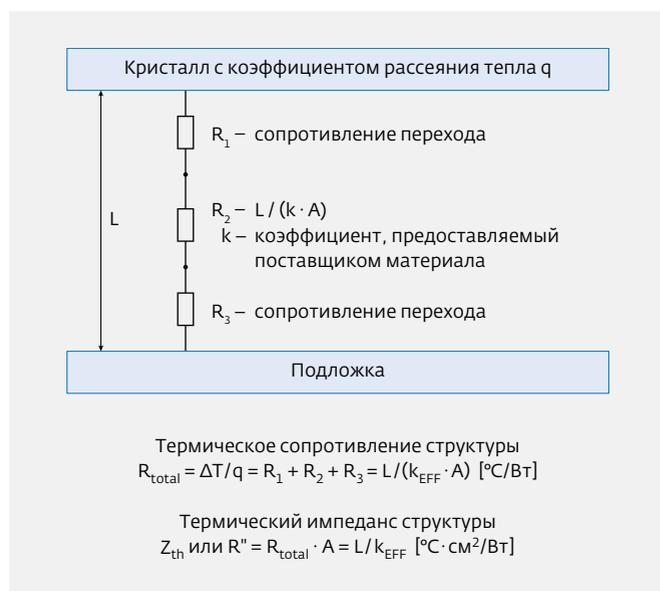
### Дополнительная проверка – СВЧ-тестирование

Дополнительная проверка результатов моделирования включает сборку устройства и его тестирование в условиях, когда ожидаемая температура канала равна, например, 200°C. Изменение СВЧ-свойств в результате нагрева может быть сопоставлено с вариациями температуры в зависимости от выходной мощности.

### ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТА КРИСТАЛЛ-ПОДЛОЖКА

Один из важнейших факторов теплового моделирования – нахождение термической проводимости контакта кристалл-подложка (или кристалл-корпус).

Производители припоев и эпоксидных составов часто указывают только объемный коэффициент теплопередачи ( $k$ ) своих продуктов. Но это лишь одна из составляющих общего термического сопротивления контакта



**Рис.5.** Схема термического сопротивления контакта кристалл-подложка.  $k_{EFF}$  – теплопроводность структуры "кристалл – контактный материал – подложка",  $k$  – теплопроводность материала, связывающего кристалл с подложкой.  $A$  – площадь поперечного сечения соединения кристалла и подложки

Таблица 2. Влияние излучательной способности на определение температуры

Измеренное тело или область	Размер, мкм	Излучательная способность	Истинная температура, °C	Измеренная температура поверхности, °C
Смоделированный GaN-транзистор	–	–	204,3	–
Область поверхности	2,5×2,5	1	–	189,1
Область поверхности	2,5×2,5	0,9	–	170,2

кристалл–подложка, которое зависит также от толщины полосы припоя, термического сопротивления промежуточного слоя, удельных характеристик теплопроводности припоя/эпоксидного слоя и др. (рис.5). Кроме того, качество и характеристики контакта определяются свойствами контактирующих материалов и особенностями их поверхностей.

Проиллюстрируем важность точного определения параметров контакта. В данном примере моделировался GaN-усилитель мощности в QFN-корпусе. Была построена зависимость максимальной температуры канала от термического импеданса контакта  $R_{D/A}$  (рис.6). По мере того как  $R_{D/A}$  стремится к нулю (например, в результате улучшения свойств контакта), максимальная температура подзатворного канала  $T_{CH}$  увеличивается, приближаясь к границе, определяемой термическим сопротивлением кристалла и QFN-корпуса. Левая вертикальная пунктирная показывает  $R_{D/A}$ , рассчитанный только на основе измеренной длины перехода  $L$  и коэффициента теплопередачи, предоставляемого поставщиком. Правая вертикальная пунктирная линия соответствует  $R_{D/A}$ , измеренному в лаборатории.

Для данной комбинации кристалл–корпус  $T_{CH}$  оказывается заниженной на 40°C, если не учитываются термические сопротивления поверхностей кристалла и QFN-корпуса. Рабочая мощность рассеяния для кристалла в данной модели  $P_{DISS} = 23$  Вт. Если общее термическое сопротивление корпуса  $R_{\theta}$  рассчитывается без учета сопро-

тивления поверхностей, то получается некорректный результат:

$$R_{\theta} = (T_{CH} - T_{BASE}) / P_{DISS} = (180^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}) / 23 \text{ Вт} = 3,5^{\circ}\text{C}/\text{Вт},$$

в то время как реальное термическое сопротивление (при  $T_{CH} = 220^{\circ}\text{C}$ ) равно 5,2°C/Вт.

## ОПЦИИ КОРПУСИРОВАНИЯ ОТ КОМПАНИИ QORVO

Qorvo – признанный мировой лидер в технологии GaN – занимается разработкой различных GaN-продуктов. Нитридная технология активно развивается, но существу-

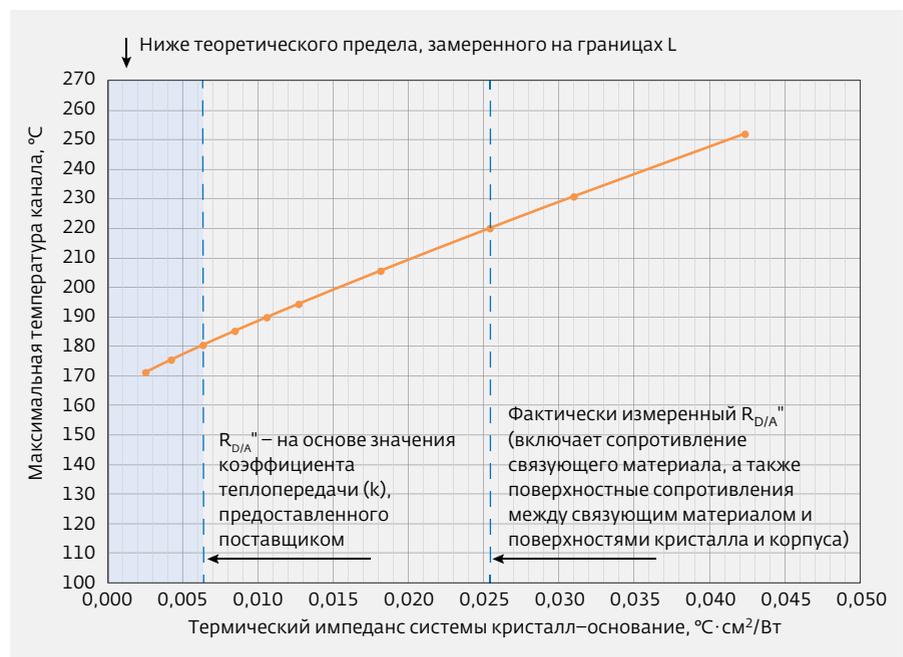


Рис.6. Зависимость максимальной температуры канала от термического импеданса контакта. Данные приведены для GaN-транзистора в корпусе QFN, мощность рассеяния 23 Вт, температура поверхности платы (под корпусом) 100°C

ющие методы корпусирования не могут удовлетворить требованиям мощных GaN-приборов. Это касается максимальной мощности, которую способны передать корпуса. Компания Qorvo предлагает заказчикам опции корпусирования, пригодные для использования в самых разных приложениях. Остановимся подробно на решениях GaN на меди и GaN в пластике, представленных в 2014 году.

### GaN на меди

Спрос на высоконадежные, мощные и крупные кристаллы, размещенные в медных корпусах, постоянно растет. Компания Qorvo разработала медные фланцевые корпуса с выводами, которые способны передать достаточно высокую мощность (десятки и сотни ватт) и могут содержать внутри себя кристаллы различных типов. Тепловые характеристики медных фланцев лучше, чем у аналогов с низкими коэффициентами термического расширения (КТЕ), что повышают надежность систем, построенных с их применением.

### GaN в пластике

Компания Qorvo предлагает также GaN-компоненты в пластиковых корпусах очень малых размеров (например 3×3 мм) и к тому же стоящих совсем недорого (несколько долларов за штуку), но при этом способных передать мощность до десятков ватт. Коэффициент термического расширения материалов пластиковых корпусов близок к КТЕ материалов печатных плат, поэтому

уровень надежности систем, содержащих такие корпуса, достаточно высокий. Благодаря малым размерам и поведению на СВЧ-частотах (компактные выводы снижают паразитные параметры) эти корпуса – оптимальный вариант для замены фланцевых модулей с аналогичными характеристиками.

В заключении остается отметить, что рассмотренная комбинация методов теплового моделирования учитывает ряд особенностей GaN-структур и позволяет создавать системы, которые обеспечат надежную работу в различных приложениях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Killat N., Kuball M., Chou T.-M., Chowdhury U., Jimenez J.** Temperature Assessment of AlGaIn/GaN HEMTs: A Comparative study by Raman, Electrical and IR Thermography. – Reliability Physics Symposium (IRPS), 2010 IEEE International, DOI: 10.1109/IRPS.2010.5488777.
2. **Pomeroy J., Bernardoni M., Kuball M., Dumka D.C., Fanning D.M.** Low Thermal Resistance GaN-on-Diamond Transistors Characterized by 3-D Raman Thermography Mapping. – Appl. Phys. Lett. 104, 083513 (2014).
3. **Kiefer S., Nair M., Sanders P., Steele J., Sutton M., Thoma R., Wilson S., Albright G., Li C., McDonald J.** Infrared Microthermography for Integrated Circuit Fault Location; Sensitivity and Limitations. – ISTFA 2002: Proceedings of the 28th International Symposium for Testing and Failure Analysis (ASM International). P. 163.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1188 руб.

## ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Р. Кузэй

При поддержке ФГУП "НПП "Пульсар"

Перевод с англ. под ред. д.ф.-м.н. А.Г. Васильева

Представленный в книге аналитический обзор охватывает свыше 1750 работ, посвященных III-N-полупроводникам, которые применяются для создания транзисторов и радиоэлектронных устройств большой мощности, работающих в СВЧ-диапазоне частот.

Рассмотрены материалы, приборы, их технология, моделирование, проблемы надежности и применения.

Книга представляет большой интерес для студентов, аспирантов, инженеров, разработчиков приборов и соответствующей аппаратуры.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. – 592 с., ISBN 978-5-94836-296-0

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; ☎ (495) 956-3346; ✉ [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru), [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)