

Моделирование тепловых режимов мощных GaN СВЧ транзисторов

Глыбин А. А., Иванов К. А., Курмачёв В. А., Филатов А. Л.

Проведён расчёт распределения температуры по поверхности кристаллов GaN СВЧ транзисторов для гетероструктур AlGaIn/GaN/SiC. Приведены данные по зависимости саморазогрева поверхности от длительности и скважности СВЧ импульсов для транзисторов, гетероструктуры которых выращены на подложках из кремния и карбида кремния. Установлено, что наибольшие градиенты температуры существуют в области затвора, что совпадает с результатами экспериментальных измерений, имеющихся в периодической литературе.

Введение

В настоящее время наиболее перспективным направлением создания нового поколения твердотельных СВЧ передатчиков С- и Х-диапазонов является использование в выходных усилителях СВЧ передатчиков мощных GaN СВЧ транзисторов, основными преимуществами которых перед GaAs СВЧ транзисторами являются [1]:

- более высокая область рабочих температур;
- более высокие рабочие напряжения;
- более высокая радиационная стойкость;
- большая величина тока насыщения.

Основным фактором, ограничивающим возможность увеличения уровня выходной мощности СВЧ транзисторов, является реализация быстрого отвода тепла от активной области транзистора. В качестве теплоотводящих подложек в мощных СВЧ транзисторах в настоящее время используются кремний и карбид кремния. Одним из перспективных материалов для подложек является CVD поликристаллический алмаз [1]. Перечисленные материалы подложек обладают различными электрофизическими характеристиками, различной технологической сложностью создания и различной стоимостью, поэтому в зависимости от режимов работы оптимальным является применение СВЧ транзисторов на подложках из различных материалов.

В технической литературе опубликовано несколько методов экспериментального и теоретического определения тепловых сопротивлений для различных условий монтажа. Рассматривалась зависимость от толщины слоёв, включая узел подложки, от шага между затворами, от длины затвора и ширины затвора [2-5]. В работе [5] показано, что перенос тепла – это полностью трёхмерная проблема, которая в каждом конкретном случае должна решаться отдельно. В [6] проведён расчёт теплового сопротивления гетероструктуры AlGaIn/GaN/SiC. В статье [7] проведено аналитическое рассмотрение и численное моделирование теплового режима ряда традиционных и ряда предложенных конструкций транзисторов на основе GaAs и GaN.

Следует отметить, что все расчёты проводились в основном для установившегося потока тепла. Отсутствовали расчёты для разной длительности и скважности СВЧ импульсов.

В данной работе проведено моделирование тепловых режимов мощных GaN СВЧ транзисторов при различных режимах работы с целью определения оптимальных областей применения СВЧ транзисторов с различными материалами подложки.

Исходные структуры для теплового моделирования

Основным источником выделения тепла является поверхность кристалла мощного СВЧ транзистора, при расчётах самонагрева которого при подаче мощности использовались разные модели активной области СВЧ транзистора, одна из которых в качестве примера показана на рис. 1.

Многоступенчатость отвода тепла от активной области СВЧ транзистора включает:

- отвод тепла через гетероструктуру AlGaN/GaN;
- отвод тепла через полуизолирующую теплопроводящую подложку (Si, SiC, полиалмаз);
- отвод тепла через фланец корпуса многокристального СВЧ транзистора.

Структура теплоотводящих слоёв ячейки транзисторного кристалла (рис. 2) включает: гетероструктуру AlGaN/GaN толщиной 3 мкм; полуизолирующую теплопроводящую подложку толщиной ~ 100 мкм; медный пьедестал толщиной ~ 150 мкм; подслоу AuSn толщиной ~ 25 мкм; слой припоя AuSn толщиной ~ 25 мкм и фланец МД-40 толщиной ~ 1600 мкм.

С учётом малого поперечного размера активной области гетероструктуры AlGaN/GaN основной поток тепла определяет теплопроводящая подложка (Si, SiC, полиалмаз).

Для тепловой модели СВЧ транзистора (рис. 1) со структурой слоёв, показанных на рис. 2, проведён расчёт при различных режимах работы для различных материалов

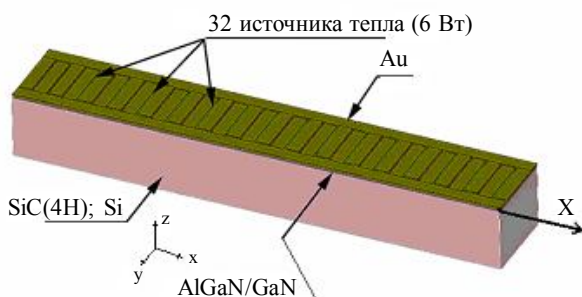


Рис. 1

Структура для теплового моделирования мощного AlGaN/GaN СВЧ транзистора

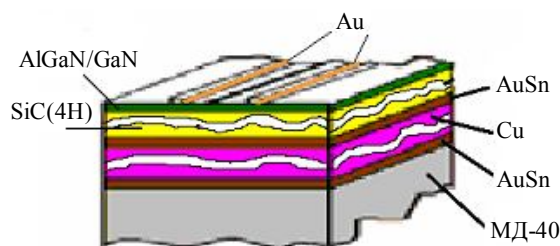


Рис. 2

Структура теплоотводящих слоёв ячейки транзисторного кристалла

Результаты теплового моделирования

Расчёт показал, что существуют неравномерное распределение температуры по поверхности транзисторной структуры для SiC подложки и наличие внутренних градиентов температуры для транзисторов с различной длиной затвора. В частности, при $P = 6,8$ Вт и при импульсе $\tau = 200$ мкс распределение температуры по поверхности кристалла имеет вид, приведённый на рис. 3.

Таким образом, саморазогрев в области затвора при одинаковой мощности GaN СВЧ транзистора при изменении длины затвора в 1,4 раза изменяется на 30%.

Сравнение распределения температуры вдоль поверхности кристалла в направлении X (рис. 1) СВЧ транзистора для различных значений скважности сигнала показывает, что при уменьшении скважности наблюдается подъём общего уровня температуры на поверхности кристалла.

Важное значение при определении основных характеристик СВЧ транзистора имеет саморазогрев области канала СВЧ транзистора за время длительности СВЧ импульса.

Расчёт зависимости изменения температуры ΔT рабочей области СВЧ транзистора от длительности импульса τ для различных значений скважности Q СВЧ сигнала для кристалла мощного СВЧ транзистора приведён на рис. 4. В данном случае было принято, что теплопроводность материала подложки от температуры не зависит. В дальнейшем будет проведён расчёт саморазогрева с учётом зависимости теплопроводности и коэффициентов тепловой диффузии материалов подложки от температуры.

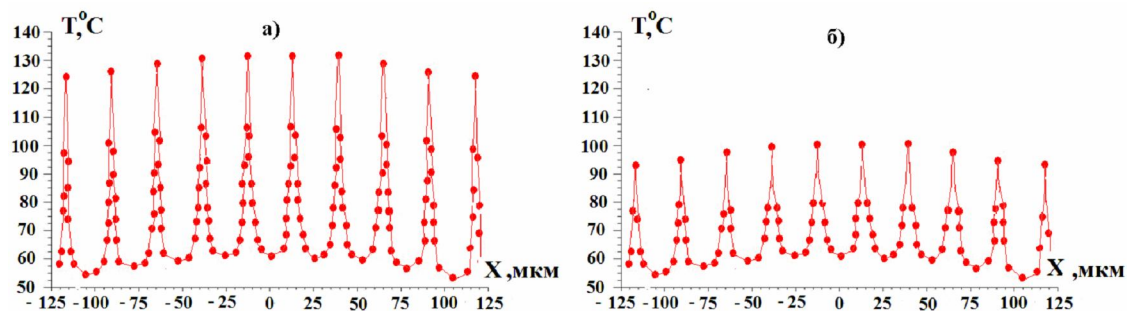


Рис. 3

Распределение температуры вдоль поверхности кристалла по оси X при значении длины затвора L :
а) $L = 0,35$ мкм; б) $L = 0,5$ мкм

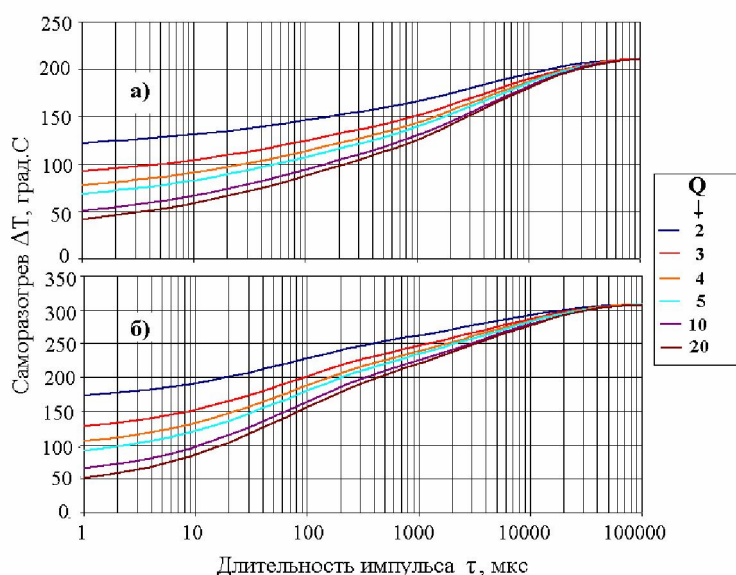


Рис. 4

Зависимость саморазогрева области канала СВЧ транзистора ΔT от длительности импульса τ СВЧ сигнала для различных значений скважности Q для мощного СВЧ транзистора на подложке SiC (а) и Si (б)

Изменение градиентов температуры на 30% при изменении длины затвора в 1,4 раза при одинаковой мощности GaN СВЧ транзистора позволяет считать зависимость градиентов температуры от длины затвора, близкой к линейной.

Преимущественный отвод тепла от рабочей области транзистора в направлении, перпендикулярном оси X , объясняет слабую чувствительность величины градиентов температуры к изменению скважности СВЧ сигнала при больших длительностях СВЧ импульса.

Обсуждение результатов теплового моделирования

Результаты расчётов указывают на существенную неоднородность распределения температуры вдоль поверхности мощного GaN СВЧ транзистора. Градиент температуры между областью затвора транзистора и областью истока составляет ~ 70 °C, а неравномерность температурных максимумов вдоль кристалла по оси X составляет ~ 5 °C. Полученный результат может быть объяснён тем, что тепло от рабочей области транзистора преимущественно отводится в направлении, перпендикулярном оси X .

Изменение градиентов

Анализ зависимости саморазогрева рабочей области СВЧ транзистора ΔT от длительности импульса τ для кристалла СВЧ транзистора для различных значений скважности Q показывает, что при изменении скважности в диапазоне $Q = 3-20$ при $\tau \geq 30$ мс независимо от величины скважности величина саморазогрева близка к величине саморазогрева для непрерывного сигнала. Это означает наличие предела отвода тепла у транзисторной структуры при увеличении длительности импульса СВЧ сигнала.

Наиболее перспективным для подложек СВЧ транзисторов при работе с длительностями импульсов $\tau \leq 200$ мкс является карбид кремния, при использовании которого значение саморазогрева рабочей области составляет $\Delta T < 150$ °С при всех значениях скважности СВЧ импульсов.

При длительности СВЧ импульсов 200 мкс и менее могут быть использованы подложки как кремния, так и карбида кремния, причём при всех значениях скважности саморазогрев при использовании подложек из карбида кремния меньше на 60%, чем для подложки из кремния.

Выводы

Проведённое моделирование показало существенную неоднородность распределения температуры вдоль поверхности кристалла мощного GaN СВЧ транзистора.

Установлено, что при уменьшении длины затвора СВЧ транзистора с 0,5 мкм до 0,35 мкм температура в области затвора транзистора возрастает на 30%.

При длительности СВЧ импульсов 200 мкс и менее могут быть использованы подложки из кремния или карбида кремния, причём при всех значениях скважности саморазогрев для карбида кремния меньше на 60%, чем для кремния.

Литература

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках // М.: Техносфера. – 2011. – 416 с.
2. Darwish A., Bayba A., Hung H. // IEEE International Microwave Symposium Digest, Fort Worth. – 2004. – P. 2039-2042.
3. Darwish A., Bayba A., Hung H. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2004. – V. 52. – P. 2611.
4. Freeman J. // IEEE International Microwave Symposium Digest, Fort Worth. – 2004. – P. 2039-2042.
5. Bertilsson K., Harris C., Nilsson H. // Solid-State Electron. – 2004. – V. 48. – P. 2103.
6. Batten T., Pomeroy J.W., Uren M.J. et al. // J. Appl. Phys. – 2009. – V. 106. – P. 094509.
7. Воробьев А. А., Воробьева Е. В., Галецкий А. В. // Электронная техника. Серия 1. – 2011. – Вып. 3(510). – С. 42.