

Моделирование распределения тепловых потоков в СВЧ монолитных интегральных схемах на основе нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов

Н.В. Зенченко, П.П. Мальцев, И.А. Глинский

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН,
г. Москва, Zenchenko.Nikolay@yandex.ru

Аннотация — В работе представлены результаты моделирования распределения тепловых потоков в монолитных интегральных схемах (МИС), в основе которых лежат НЕМТ-транзисторы с гетероструктурами AlGaN/GaN. Представлена методика моделирования, учитывающая профиль распределения тепловыделения в гетероструктуре НЕМТ-транзистора, рассчитанный с помощью TCAD Atlas. Исследована зависимость нагрева канала НЕМТ-транзистора от топологии и методики монтажа кристалла на оснастку.

Ключевые слова — НЕМТ, нитрид галлия, моделирование, метод конечных элементов, тепловые потоки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor – НЕМТ) на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN достаточно привлекательны для применения в мощных приемопередающих СВЧ устройствах и других силовых элементах электроники ввиду их очевидных преимуществ перед узкозонными полупроводниками. Основным преимуществом НЕМТ является высокая удельная мощность (более 10 Вт/мм), что позволяет существенно упростить топологию монолитных интегральных схем усилителей мощности, повысить эффективность и массогабаритные параметры. Это стимулирует и актуализирует многочисленные работы, целью которых является расширение и без того крупной области применения НЕМТ. Одной из важных проблем при разработке НЕМТ является перегрев [1], который приводит к ухудшению частотных характеристик, росту тока утечки, а также к необратимым процессам, приводящим к выходу устройства из строя [2]. В настоящей работе представлены результаты исследования зависимости максимального нагрева активной области [3, 4] НЕМТ-транзисторов от топологии [5, 6], с помощью моделирования методом конечных элементов. Результаты проведенного исследования позволяют усовершенствовать конструкцию, увеличить эффективность и износостойкость устройств на базе транзисторов с высокой подвижностью электронов.

II. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проведения моделирования распределения тепловых потоков в НЕМТ-транзисторе требуется определить набор исходных параметров, которые будут служить основой создаваемой модели. Наряду с геометрическими параметрами исследуемой МИС (монолитной интегральной схемы), требуется знать профиль распределения удельного тепловыделения в гетероструктуре НЕМТ-транзистора. Данный профиль (рис. 1) был получен путем моделирования в среде TCAD Atlas.

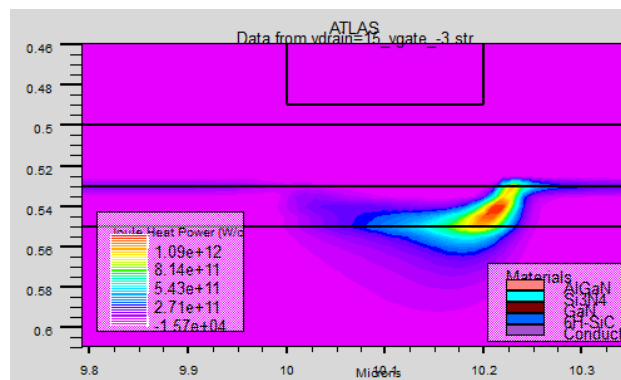


Рис. 1. Распределение удельного тепловыделения в гетероструктуре НЕМТ-транзистора

Полученный профиль был введен в модель в виде отдельной области «Q», которая впоследствии задавалась как источник тепла. Таким образом, была создана упрощенная модель МИС с НЕМТ-транзистором, специально предназначенная для проведения теплового моделирования. Для первичных оценочных расчетов была создана модель транзистора с семью затворами (рис. 2). Свойства материалов [7, 8], послужившие в качестве исходных данных, представлены в табл. 1.

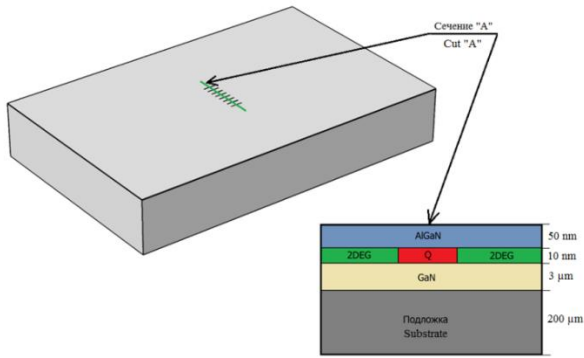


Рис. 2. Упрощенная модель НЕМТ-транзистора.
2DEG – двумерный электронный газ,
Q – область тепловыделения

Таблица 1

Свойства материалов

Материал	Функция в модели	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м*К	Теплоемкость, Дж/кг*К
GaN	Гетеро-структура	6070	130	490
AlGaIn		5184	40	604
Al ₂ O ₃	подложка	3965	35	730
SiC	подложка	3216	490	690

В расчетах также были приняты следующие условия:

- теплоотвод идеальный (принудительно задана температура на нижней части подложки 27°C);
- температура окружающей среды и начальная температура объекта 27°C.

Из-за крайне малых размеров подзатворных областей, отдельной проблемой при моделировании распределения тепловых потоков в НЕМТ-транзисторах является построение сетки. Вид построенной конечно-элементной сетки представлен на рис. 3 [9].

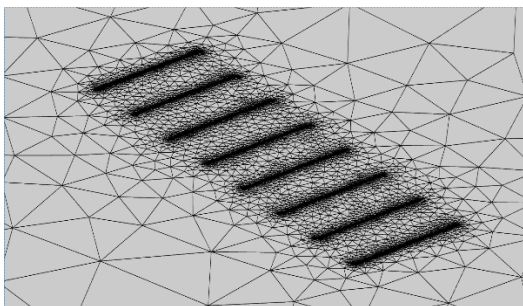


Рис. 3. Конечно-элементная сетка

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе созданной модели был проведен ряд расчетов для исследования распределения тепловых потоков в МИС с различными топологиями и способами монтажа. На рис. 4 представлено полученное поверхностное распределение температуры для 8-затворного транзистора с рассеиваемой мощностью 1 Вт.

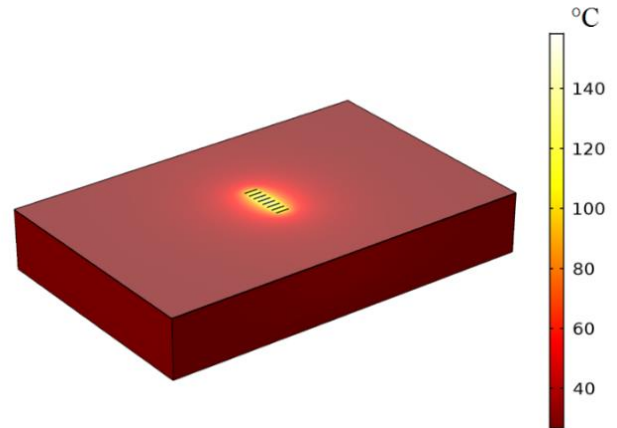


Рис. 4. Результат моделирования. Поверхностное распределение температуры

Поверхностное распределение позволяет оценить степень локализации зоны максимального нагрева на поверхности МИС. В случае НЕМТ-транзисторов локализация нагрева в подзатворных областях крайне высока. Уже на расстоянии в 50 мкм от активной области наблюдается падение температуры более чем на 50 % относительно максимального значения.

С целью исследовать влияние топологии транзисторов на максимальный нагрев, была создана параметрическая модель МИС, в которой последовательно проводилось моделирование различных конфигураций транзисторов.

Моделирование проводилось с использованием двух разных способов введения источника тепла. В первом случае на все затворы независимо от их количества было задано абсолютное значение мощности величиной 0.3 Вт. Теплоотвод идеальный, с температурой 27°C [4]. Длина затворов 100 мкм во всех случаях. Размер подложки 3000x2000x300 мкм, материал подложки – сапфир. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

По графикам видно, что распределение выделяемой мощности между большим количеством затворов позволяет сильно снижать нагрев активной области. При расстоянии между затворами 10 мкм разница температур составила 92°C. Изменение расстояния между затворами позволяет снизить нагрев на 10-30%.

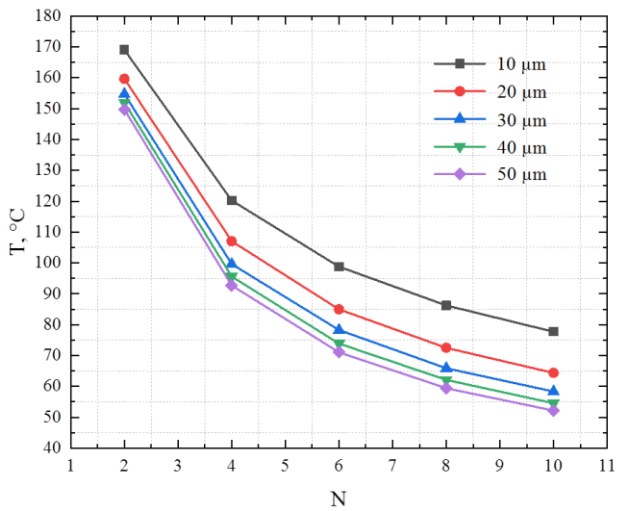


Рис. 5. Максимальный нагрев активной области транзистора в зависимости от количества затворов (N) и расстояния между ними

Во втором случае на все затворы подавалось удельное тепловыделение величиной 10^{10} Вт/м². Результаты моделирования представлены на рис. 6.

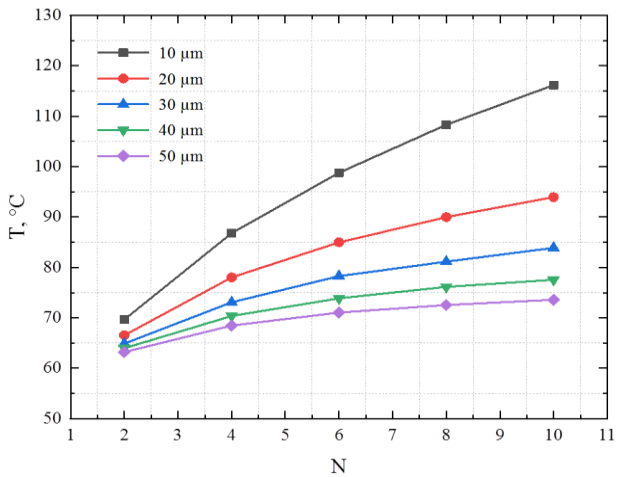


Рис. 6. Максимальный нагрев активной области транзистора в зависимости от количества затворов (N) и расстояния между ними

На рисунке видно, что изменение числа затворов увеличивает максимальный нагрев, так как в данном случае при увеличении количества затворов увеличивалось и суммарное тепловыделение. Разница температур в случаях 2 и 10 затворов и расстояния между ними 10 мкм. составила 46°C. Изменение расстояния между затворами позволяет снизить нагрев на 10-33% [10].

Методика моделирования с помощью упрощенной модели была так же отработана на исследовании распределения тепловых потоков в МИС малошумящих усилителей диапазонов частот 57-64 ГГц и 34-36 ГГц (рис. 7, 8).

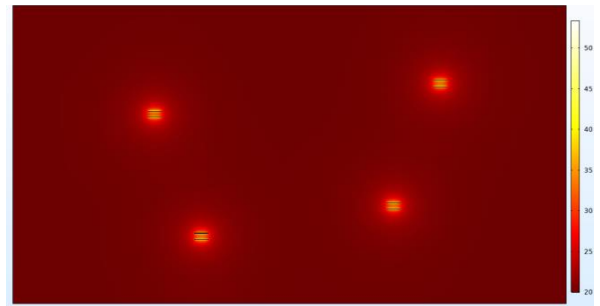


Рис. 7. Поверхностное распределение температуры в МИС малошумящего усилителя диапазона частот 57-64 ГГц

При мощности усилителя 0,4 Вт нагрев активной области составил 50°C. В данной модели температура окружающей среды составляла 20°C.

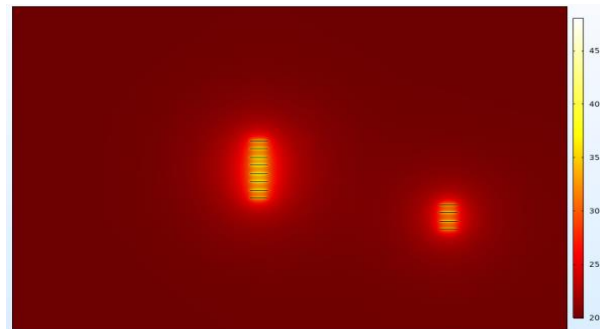


Рис. 8. Поверхностное распределение температуры в МИС малошумящего усилителя диапазона частот 34-36 ГГц

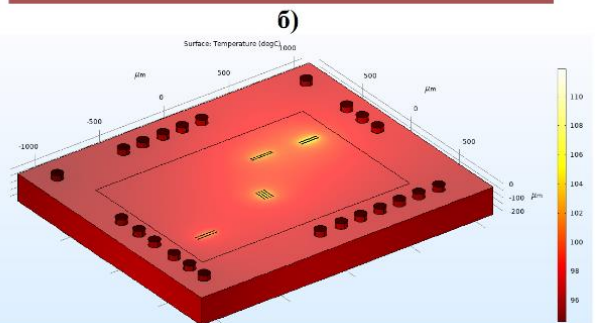
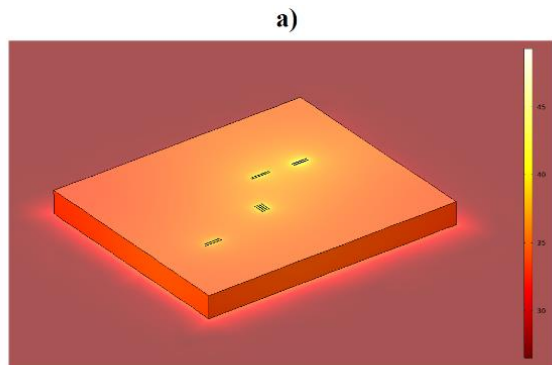


Рис. 9. Распределение температуры по поверхности МИС диапазона частот 23-25 ГГц, помещенной на стеклотекстолит FR4 классическим способом (а) и с помощью flip-chip монтажа (б)

При мощности усилителя 0,4 Вт нагрев активной области составил 47°C. Более низкое значение температуры относительно маломощного усилителя диапазона частот 57-64 ГГц обусловлено распределением мощности по большему количеству затворов.

Также с использованием данной методики были получены распределения температуры для различных типов монтажа кристалла на текстолитовую основу. На рис. 9 представлено распределение температуры при классическом и flip-chip монтаже кристалла на примере модели МИС диапазона частот 23-25 ГГц мощностью 0,2 Вт, помещенной на стеклотекстолит FR4.

Максимальное значение температуры при классическом способе монтажа (а) составило 49 °С. При использовании flip-chip метода (б), максимальный нагрев составил 112 °С. Более высокий нагрев обусловлен меньшей площадью контакта кристалла с поверхностью платы.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика моделирования позволяет оценивать риски перегрева и получать данные по распределению температуры внутри всего объема монолитной интегральной схемы и может применяться при проектировании любых устройств, в состав которых входят HEMT. В результате уже проведенных расчетов определено влияние топологии, параметров подложки и кристалла на максимальный нагрев активной области HEMT. Исследования показали существенную зависимость нагрева активной области HEMT-транзистора от способа монтажа, а также влияние топологии затворов на максимальный нагрев активной области. Разработанная методика была апробирована на моделировании реальных проектируемых образцов МИС маломощных усилителей мощности диапазонов частот 23-25 ГГц, 34-36 ГГц и 57-64 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pernot J., Zawadski W., Contreras S., Robert J.L., Neyret E., Cioccio L. Di. Electrical transport in n-type 4H silicon carbide // Journal of Applied Physics. 2001. V. 90. , P. 1869-1878.
- [2] Turin V. O., Balandin A. A. Electrothermal simulation of the self-heating effects in GaN-based field-effect transistors // Journal of Applied Physics. 2006. V. 100, P. 054501.
- [3] Yang L., Ai S., Chen Y., Cao M., Zhang K., Ma X., Hao Y. A self-heating study on multi-finger AlGaIn/GaN high electron mobility transistors // Journal of Semiconductors. 2013. V. 34. № 7. P. 074005.
- [4] Noh J., Ryoo Y., Jeon N., Cha H.Y., Seo K.S. Structural effects on heat dissipation in InGaAs MHEMTs // Semiconductor science and technology. 2013. v. 28. № 4. P. 045012.
- [5] Ponomarev D.S., Vasil'evskii I.S., Galiev G.B., Klimov E.A., Kulbachinskii V.A., Uzeeva N.A. Electron mobility and effective mass in composite InGaAs quantum wells with InAs and GaAs nanoinserts // Semiconductors. V. 46. № 4. P. 484-490.
- [6] Kulbachinskii V.A., Yuzeeva N.A., Galiev G.B., Klimov E.A., Vasil'evskii I.S., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts // Semiconductor science and technology. 2012 V. 27. № 3. P. 035021.
- [7] Zenchenko N.B., Рубан О.А., Алёшин А.Н., Глинский И.А., Мельников А.А. Моделирование нестационарных тепловых режимов HEMT-транзистора // Нано- и микросистемная техника. 2014. №12. С. 3-6.
- [8] Глинский И.А., Рубан О.А., Алёшин А.Н., Zenchenko N.B., Мельников А.А. Расчет тепловых режимов HEMT-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 43-48.
- [9] Zenchenko N.B. Глинский И.А. Моделирование распределения тепловых потоков в СВЧ HEMT-транзисторах // Сборник научных статей конференции «РАДИОИНФКОМ-2019». 2019. С. 423-426.
- [10] Zenchenko N.B. Исследование тепловых процессов в мощных полевых транзисторах на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2019. № 12. С. 738-742.

Simulation of Heat Flux Distribution in Microwave Monolithic ICs Based on Gallium Nitride HEMT Transistors

N.V. Zenchenko, P.P. Maltsev, I.A. Glinskiy

V.G. Mokerov Institute of ultra-high frequency semiconductor electronics of the Russian academy of sciences (IUFSE RAS), Moscow, Zenchenko.Nikolay@yandex.ru

Abstract - The paper presents the results of modeling of heat fluxes distribution in monolithic ICs, which are based on HEMT transistors with AlGaIn / GaN heterostructures. A simulation method is presented that includes the heat distribution profile in the heterostructure of the HEMT transistor, calculated using Atlas TCAD. The influence of topology and mounting method on HEMT transistor channel heating is studied. Presented method were used to calculate heat flux distribution for 8-gate HEMT transistor, as well as for calculating topology influence on active area of HEMT-

transistor maximum temperature. Heat fluxes for two cases of IC mounting methods were calculated. Flip-chip mounting showed temperature of active region 112 °C compared to 49 °C when using direct mounting method.

Keywords — HEMT, gallium nitride, modeling, finite element method, heat fluxes.

- [1] Pernot J., Zawadski W., Contreras S., Robert J.L., Neyret E., Cioccio L. Di. Electrical transport in n-type 4H silicon

- carbide // Journal of Applied Physics. 2001. V. 90. , P. 1869-1878.
- [2] Turin V. O., Balandin A. A. Electrothermal simulation of the self-heating effects in GaN-based field-effect transistors // Journal of Applied Physics. 2006. V. 100, P. 054501.
- [3] Yang L., Ai S., Chen Y., Cao M., Zhang K., Ma X., Hao Y. A self-heating study on multi-finger AlGaIn/GaN high electron mobility transistors // Journal of Semiconductors. 2013. V. 34. № 7. P. 074005.
- [4] Noh J., Ryoo Y., Jeon N., Cha H.Y., Seo K.S. Structural effects on heat dissipation in InGaAs MHEMTs // Semiconductor science and technology. 2013. v. 28. № 4. P. 045012.
- [5] Ponomarev D.S., Vasil'evskii I.S., Galiev G.B., Klimov E.A., Kulbachinskii V.A., Uzeeva N.A. Electron mobility and effective mass in composite InGaAs quantum wells with InAs and GaAs nanoinserts // Semiconductors. V. 46. № 4. P. 484-490.
- [6] Kulbachinskii V.A., Yuzeeva N.A., Galiev G.B., Klimov E.A., Vasil'evskii I.S., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts // Semiconductor science and technology. 2012 V. 27. № 3. P. 035021.
- [7] Zenchenko N.V., Ruban O.A., Alyoshin A.N., Glinskij I.A., Mel'nikov A.A. Modelirovanie nestacionarnykh teplovykh rezhimov HEMT-tranzistora // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2014. №12. P. 3-6. (In Russian).
- [8] Glinskij I.A., Ruban O.A., Alyoshin A.N., Zenchenko N.V., Mel'nikov A.A. Raschet teplovykh rezhimov HEMT-tranzistorov na osnove geterostruktury AlGaIn/GaN // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2014. № 11. P. 43-48. (In Russian).
- [9] Zenchenko N.V., Glinskij I.A. Modelirovanie raspredeleniya teplovykh potokov v SVCH HEMT-tranzistorah // Sbornik nauchnykh statej konferencii «RADIOINFORMKOM-2019». 2019. P. 423-426. (In Russian).
- [10] Zenchenko N.V. Issledovanie teplovykh processov v moshchnykh polevykh tranzistorah na osnove nitrida galliya // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2019. № 12. P. 738-742. (In Russian).