DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.4

УДК: 621.382.029

НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АНАЛОГОВОЙ МИКРОСХЕМЫ С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА В КРИСТАЛЛЕ

И.В. Фролов[1], А.М. Ходаков[1], В.А. Сергеев[1], Д.В. Клейменкин[2]

[1]Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

[2]Донской государственный технический университет
344000, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2025 г.

Аннотация. В среде компьютерного моделирования Comsol Multiphysics разработана тепловая модель микросхемы операционного усилителя, работающей в диапазоне температур окружающей среды от −60 °С до 200 °С. Основная рассеиваемая микросхемой тепловая мощность выделяется транзисторами выходного каскада, расположенными несимметрично вблизи края кристалла. Модель учитывает нелинейную температурную зависимость коэффициента теплопроводности материала кристалла и взаимное тепловое влияние источников тепла. Выполнен расчет коэффициента неоднородности распределения температуры в кристалле микросхемы при различных значениях температуры окружающей среды для трех материалов кристалла микросхемы: кремния, карбида кремния и арсенида галлия. Установлено, что с ростом температуры окружающей среды неоднородность распределения температуры в кристалле возрастает нелинейно. Наименьшее значение неоднородности достигается в кристалле, изготовленном из карбида кремния, а наибольшая – в кристалле, изготовленном из арсенида галлия: при температуре 200 ºС коэффициент

неоднородности распределения в кристалле из GaAs в 3,3 раза выше, чем в кристалле из 4H-SiC. Показано, что учет температурной зависимости тока потребления микросхемы (потребляемой мощности) позволяет повысить точность моделирования до 10 %. Разработанная модель может быть использована при проектировании высокотемпературных аналоговых интегральных микросхем, в том числе с неоднородным распределением источников тепла.

Ключевые слова: аналоговая микросхема, кремний, арсенид галлия, карбид кремния, 3D тепловая модель, неоднородность распределения температуры.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, https://rscf.ru/project/23-79-10069/.

Автор для переписки: Фролов Илья Владимирович, info@ulireran.ru

Введение

Развитие электронных систем для работы в экстремальных условиях представляет собой одну из наиболее сложных задач современной микроэлектроники. Особый интерес вызывает температурный диапазон свыше 200 °C, критически важный для таких областей, как аэрокосмическая техника, геологоразведка (скважинная электроника), автомобильная промышленность (датчики двигателя) и энергетика (мониторинг силовых установок). В этих приложениях электронные компоненты подвергаются комплексному воздействию высоких температур, что приводит к ускоренной деградации, изменению параметров и, как следствие, к снижению надежности всей системы [1,2].

Проектирование микросхем для работы при высоких температурах связано с комплексом взаимосвязанных проблем, требующих междисциплинарного подхода. Традиционные кремниевые технологии демонстрируют существенное ухудшение характеристик при температурах выше 200 °C, что ограничивает их применение в экстремальных условиях. Как отмечается в работе [3], даже технология «кремний на изоляторе» (SOI) обеспечивает работоспособность лишь до 300 °C, что недостаточно для многих перспективных применений.

Перспективным направлением является использование широкозонных полупроводниковых материалов, таких как карбид кремния (SiC), арсенид галлия (GaAs) и нитрид галлия (GaN). Например, в работе [4] показаны исключительные возможности SiC КМОП технологии, позволяющие компараторам и операционным усилителям сохранять работоспособность при температурах до 550 °C. Однако даже при использовании указанных материалов возникают специфические проблемы: изменение пороговых напряжений, подвижности носителей, рост токов утечки, а также нелинейное поведение параметров в широком температурном диапазоне.

Несмотря на значимость проблемы проектирования элементной базы высокотемпературной аналоговой электроники, результаты теплового моделирования аналоговых микросхем, в частности, операционных усилителей, в литературе представлены крайне ограниченно, а известные тепловые модели не учитывают нелинейных тепловых эффектов, связанных с температурной зависимостью тепловых параметров материалов и неоднородностью температуры в кристалле микросхемы. Цель исследования состояла в разработке тепловой модели операционного усилителя, учитывающей неоднородное распределение источников тепла в кристалле микросхемы, их взаимное влияние и нелинейную зависимость теплопроводности материалов для кристаллов микросхем, изготовленных из кремния, арсенида галлия и карбида кремния в диапазоне температур от −60 °C до 200 ºC.

1. Методы теплового моделирования аналоговых микросхем

Особую сложность представляет проектирование аналоговых микросхем, где температурные эффекты непосредственно влияют на ключевые характеристики. В работе [5] подробно анализируется влияние температуры на характеристики операционных усилителей, у которых входное напряжение смещения, коэффициент усиления и полоса пропускания существенно зависят от температуры. Авторы подчеркивают, что традиционные SPICE-модели часто неадекватно

описывают характеристики компонентов при высоких температурах, что требует разработки специализированных моделей.

В научной литературе представлены результаты теплового моделирования аналоговых микросхем различными методами, которые различаются по точности, сложности и совместимости с системами автоматизированного проектирования. Можно выделить два основных класса тепловых моделей микросхем: детализированные тепловые модели и компактные тепловые модели. Детализированные модели стремятся к максимально точному воспроизведению физической структуры микросхемы. Уровень детализации напрямую влияет на точность результатов, делая такой подход наиболее достоверным и наиболее ресурсоемким.

Компактные тепловые модели, напротив, используют упрощенное представление микросхемы в виде цепочек тепловых сопротивлений и теплоемкостей, полученных на основе синтеза теплоэлектрической эквивалентной схемы, при этом представляют собой эффективный инструмент для анализа распределения температуры в сложных электронных системах [7]. Например, в работе [8] предлагается методика идентификации параметров матрицы тепловых импедансов на основе данных трехмерного моделирования методом конечных элементов. Такой подход позволяет значительно сократить вычислительную сложность при сохранении приемлемой точности прогнозирования.

В работе [5] представлена модель операционного усилителя, параметры которой зависят от температуры через полиномиальные аппроксимации, полученные на основе экспериментальных данных. Такой подход позволяет эффективно интегрировать тепловые эффекты в систему автоматизированного проектирования.

Методы снижения вычислительной сложности, такие как понижение порядка моделей, являются важным направлением для практического применения теплового моделирования. В работе [1] демонстрируется возможность сокращения

размерности моделей с 75 тыс. до 50 переменных при сохранении адекватности описания тепловых процессов.

Современные тенденции в области теплового моделирования микросхем включают разработку интегрированных платформ, объединяющих различные подходы и методы, создание библиотек тепловых моделей стандартных компонентов, а также развитие методов автоматического синтеза тепловых моделей на основе данных о топологии и технологическом процессе.

2. Тепловая модель операционного усилителя

В качестве объекта исследований была выбрана микросхема операционного усилителя, работающая в расширенном температурном диапазоне внешней среды T_0. Схема тепловой модели микросхемы представляет собой кристалл с размерами $h_{xk} \times h_{yk} \times h_{zk}$ (рис. 1). Основная рассеиваемая микросхемой тепловая мощность выделяется транзисторами выходного каскада, размерами $h_{xt} \times h_{yt} \times h_{yk}$, в количестве шести штук. Рассматривались три варианта материала кристалла: Si, SiC, GaAs.

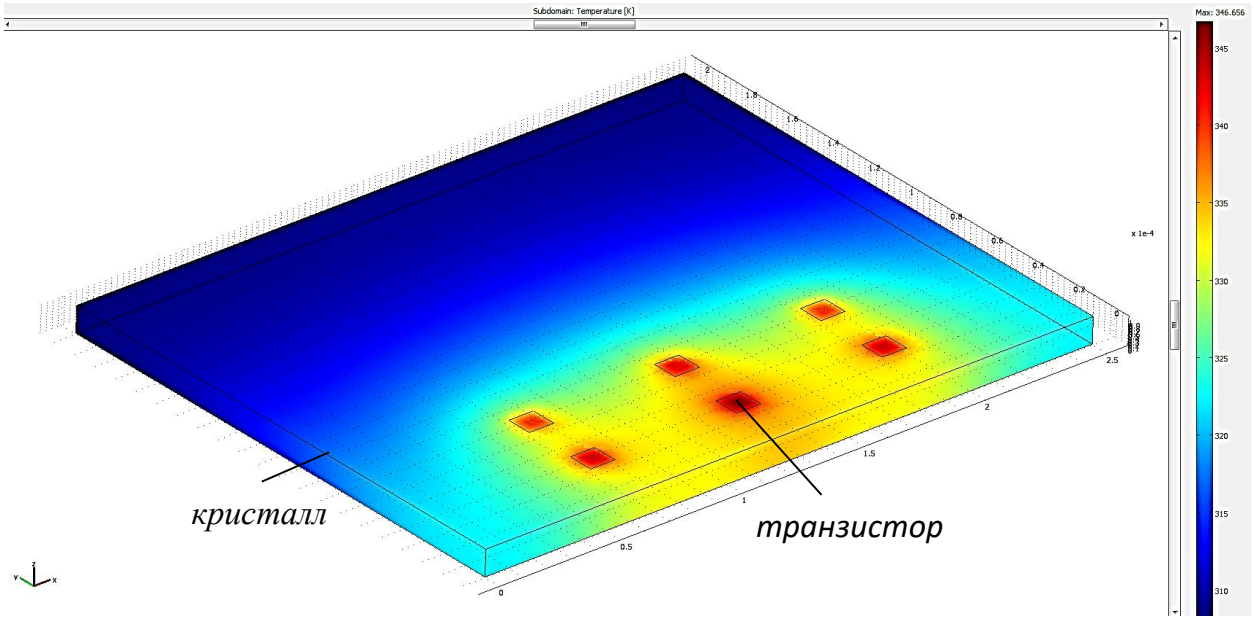

Рис. 1 Схема тепловой модели микросхемы.

Решалось стационарное уравнение теплопроводности, с зависящим от температуры коэффициентом теплопроводности материала кристалла:

$$\nabla\left(\lambda_k\left(T\right)T\right)=0\,, \tag{1}$$

где $T = T_k - T_0$; T_k – температура кристалла; λ_k – коэффициент теплопроводности кристалла.

В областях расположений транзисторов задавалось граничное условие для плотности тепловой мощности [9]:

$$-\lambda_k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_{z=h_{zk}}=\begin{cases}P/S_t,\ (x,y)\in S_t\\ 0,\ (x,y)\in(S_k-S_t)\end{cases}, \tag{2}$$

где P – рассеиваемая микросхемой тепловая мощность; $S_k = h_{xk}\times h_{yk}$ и $S_t = 6\times h_{xt}\times h_{yt}$ – площади верхней поверхности кристалла и транзисторов.

Влияние на процесс распространения тепла в микросхеме материалов ее корпуса, а также теплоотвода, моделировалось граничными условиями:

1) на всех внешних поверхностях Π кристалла микросхемы, кроме нижнего основания, задавалось условие теплообмена с внешней средой:

$$\lambda_{ефф}\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Pi}+\alpha_{корп}\left(T\big|_{\Pi}-T_0\right)=0\,, \tag{3}$$

где $\alpha_{корп}(\lambda_{ефф})$ – коэффициент теплообмена корпус-внешняя среда; $\lambda_{ефф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности корпуса микросхемы. В процессе расчета, значение величины $\alpha_{корп}$ корректировались итерационным методом таким образом, чтобы выполнялось условие равенства теплового сопротивления переход-корпус R_{jc} заданному значению.

2) температура основания корпуса равна температуре окружающей среды (идеальный теплоотвод):

$$T\big|_{z=0}=0\,. \tag{4}$$

Моделирование температурного поля в микросхеме проводилось методом конечных элементов, с использованием программной среды Comsol Multiphysics и учетом температурной зависимости теплофизических параметров материалов микросхемы. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности материала кристалла λ_k определялась по формуле:

$$\lambda_k(T) = \lambda_k(300)\left(\frac{T}{300}\right)^a, \tag{5}$$

где для: GaAs $\lambda_k(300)$ = 40 Вт/м/К, a = −1.25 [10]; для Si $\lambda_k(300)$ = 149 Вт/м/К, a = −1.2 [11]; для 4H-SiC $\lambda_k(300)$ = 202 Вт/м/К, a = −1.26 [12]. Размеры кристалла микросхемы 2.5 × 2.0 × 0.1 мм, области поверхности расположения транзистора 70 × 70 мкм. Общая рассеиваемая микросхемой тепловая мощность составляет P = 3 Вт. Значения величин для расчета $\alpha_{корп}$: $\lambda_{ефф}$ = 30 Вт/м/К, R_{jc} = 3 К/Вт [13,14]. Температура внешней среды изменялась в пределах T_0 = (213 − 473) К, или (−60 − 200) °С.

Потребляемая операционным усилителем мощность зависит от температуры. Эта зависимость в первую очередь обусловлена поведением статического тока покоя. С ростом температуры кристалла в полупроводниковой структуре усилителя возрастают токи утечки и подпороговые токи, что ведет к заметному росту потребляемого тока и, как следствие, увеличению рассеиваемой мощности даже в режиме покоя. Данная положительная обратная связь вызывает рост потребляемой от источника питания мощности и дополнительный нагрев, который, в свою очередь, провоцирует дальнейшее рост потребляемой мощности.

В разрабатываемой модели учитывалась зависимость потребляемого микросхемой тока от температуры T_0, которая характерна для высокотемпературных операционных усилителей [13]. Эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией: $I_{sc} / I_{300} = A \times T_0 + B$,

где I_{sc}, I_{300} – потребляемый микросхемой ток и значение этого тока при комнатной температуре, для расчетного варианта A = 1.68e-3 1/K, B = 3.33e-1.

В результате расчета получено температурное распределение по кристаллу микросхемы, один из вариантов которого, когда материалом кристалла является кремний, а температура внешней среды составляет 300 K, представлен на рисунке 1. Проведены расчетные исследования зависимости коэффициента неоднородности температурного распределения по верхней поверхности микросхемы, определяемого как:

$$\delta = \frac{T_{\max} - T_{av}}{T_{av}}, \tag{6}$$

где $T_{\max}$ и T_{av} – максимальный и средний перегрев верхней поверхности кристалла микросхемы. Расчетные зависимости нормированного коэффициента неоднородности, равного $\delta_n = \dfrac{\delta}{\delta_{Si}}$, где δ_{Si} = 1.97 – коэффициент неоднородности в случае, когда материалом кристалла является кремний (T_0 = 300 K), представлены на рисунке 2.

Проведенные исследования показали, что при изменении температуры внешней среды T_0 в указанных выше пределах, зависимости коэффициента неоднородности температурного распределения по верхней поверхности кристалла микросхемы имеют нелинейный характер (рис. 2), при этом коэффициент неоднородности распределения δ GaAs кристалла при T_0 = 200 °C в 3,3 раза выше чем у 4H-SiC кристалла. Это необходимо учитывать в определении тепловых режимов работы микросхемы, для обеспечения работоспособности и надежности всего изделия.

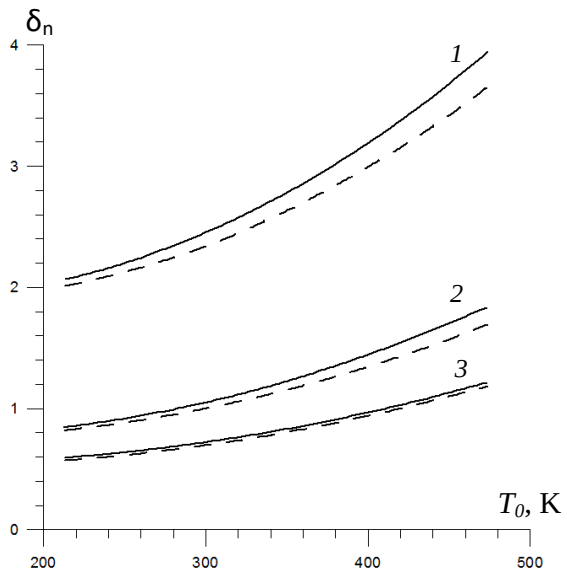

Рис. 2. Нормированный коэффициент неоднородности от температуры внешней среды: *1* – GaAs, *2* – Si, *3* – 4H-SiC; пунктирная линия – без учета температурной зависимости потребляемого микросхемой тока.

Заключение

Разработана тепловая модель аналоговой микросхемы, работающей в диапазоне температур окружающей среды от −60 °C до 200 °C с неоднородным распределением источников тепла в кристалле. Модель учитывает нелинейную температурную зависимость коэффициента теплопроводности материала кристалла и взаимное тепловое влияние источников тепла. По результатам моделирования определено, что относительная неоднородность распределения температуры в кристалле из GaAs в 3,3 раза выше, чем в кристалле из 4H-SiC, а при повышении температуры окружающей среды неоднородность распределения температуры в кристалле возрастает нелинейно. Показано, что учет температурной зависимости потребляемой микросхемой мощности позволяет повысить точность моделирования до 10 %. Разработанная модель может быть использована при проектировании высокотемпературных аналоговых интегральных микросхем, в том числе с неоднородным распределением источников тепла.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, https://rscf.ru/project/23-79-10069/.

Литература

1. Jancke R. et al. Modeling and simulation of electro-thermal interaction effects in electronic circuits //Proc. 1st Conf. on multiphysics simulation: Advanced methods for industrial engineering. – 2010. – V. 1. – № 1. – P. 1-11.
2. Baccar S. et al. A behavioral and temperature measurements-based modeling of an operational amplifier using VHDL-AMS //2010 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – IEEE, 2010. – P. 343-346. https://doi.org/10.1109/ICECS.2010.5724523
3. Rahman A. et al. High-temperature SiC CMOS comparator and op-amp for protection circuits in voltage regulators and switch-mode converters //IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2016. – Т. 4. – №. 3. – С. 935-945. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2584599
4. Rahman A. et al. High temperature data converters in silicon carbide CMOS //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – V. 64. – № 4. – P. 1426- 1432. https://doi.org/1432.10.1109/TED.2017.2665520
5. Baccar S. et al. Analog to digital converters for high temperature applications: The modeling approach issue //2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings. – IEEE, 2010. – P. 550-554. https://doi.org/10.1109/IMTC.2010.5488109
6. Savidis I., Vaisband B., Friedman E. G. Experimental analysis of thermal coupling in 3-D integrated circuits //IEEE transactions on very large scale integration (VLSI) systems. – 2014. – V. 23. – № 10. – P. 2077-2089. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2014.2357441
7. Фролов И.В., Ходаков А.М., Сергеев В.А., Клейменкин Д.В. Моделирование тепловых характеристик высокотемпературных монолитных интегральных схем с неоднородным распределением источников тепловыделения в кристалле. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 4. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.7

8. Taghikhani P. et al. Temperature-dependent characterization of power amplifiers using an efficient electrothermal analysis technique //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2021. – V. 70. – № 2. – P. 1349-1360. https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3134664
9. Сергеев В. А., Ходаков А. М. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 160 с.
10. Sharma R. C. et al. Gallium arsenide and gallium nitride semiconductors for power and optoelectronics devices applications //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – V. 2426. – № 1. – P. 012008. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2426/1/012008
11. NSM Archive – Physical Properties of Semiconductors [электронный ресурс]. – URL: http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond\index.html (дата обращения 24.11.2025).
12. Wei R. et al. Thermal conductivity of 4H-SiC single crystals //Journal of Applied Physics. – 2013. – T. 113. – №. 5. https://doi.org/10.1063/1.4790134
13. AD8229 datasheet [электронный ресурс]. – URL: https://www.analog.com/en/index.html (дата обращения 24.11.2025).
14. Galloway J., Bornoff R. Theta-JC Measurements: Steady-State Compared to Transient Methods // Electronics Cooling. – Fall 2024. – P. 24-29.

Для цитирования:

Фролов И.В., Ходаков А.М., Сергеев В.А., Клейменкин Д.В. Нелинейная тепловая модель высокотемпературной аналоговой микросхемы с неоднородным распределением источников тепла в кристалле. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 12. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.4