

Моделирование теплового режима в субмикронных транзисторах с гетероселективным легированием

Рассмотрена модель тепловых процессов и проведен анализ распределения тепловых полей в полевом субмикронном транзисторе с гетероселективным легированием. Описаны особенности физико-топологического моделирования тепловых процессов гетероструктур.

Thermal conditions model was considered and analysis of heat fields distribution in high-electron-mobility transistor was realized. Physical and topological simulation peculiarities of heterostructure thermal processes were described.

Введение

Постоянный рост степени интеграции и быстродействия радиоэлектронной аппаратуры, уменьшение геометрических размеров литографического затвора полевых структур до 0.1 мкм, за счет прогресса в технологии электронно-лучевой литографии, минимизация дисперсии между толщиной слоев в многослойных структурах и уровнями легирования, а также повышение частотного диапазона обусловили переход технологии производства устройств СВЧ и КВЧ диапазонов, использующихся в радиокommunikационных и вычислительных системах, на новую компонентную базу. В частности, произошло значительное улучшение параметров и рабочих характеристик субмикронных транзисторов с гетероселективным легированием (high-electron-mobility transistor – НЕМТ) по сравнению с GaAs полевыми транзисторами с затвором Шоттки и Si биполярными транзисторами. Качественные и количественные изменения в структурах НЕМТ и

физике их работы связаны с наличием гетеропереходов на слоях AlGaAs, InGaAs/AlGaAs или InAlAs/InGaAs, в результате чего коренным образом меняется процесс переноса заряда в транзисторных структурах.

Транзисторным структурам с активными слоями GaAs и InP и с гетеропереходами на слоях AlGaAs, InGaAs/AlGaAs или InAlAs/InGaAs присущи новые физические эффекты, определяющие их применение в создании устройств СВЧ и КВЧ диапазонов:

- образование области двумерного электронного газа (ДЭГ) на границе гетероперехода GaAs/AlGaAs (InAlAs/InGaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs) (на рис. 1 приведена типичная структура полевого транзистора AlGaAs/GaAs с гетероселективным легированием) вследствие разницы величин электронного сродства материалов, что приводит к снижению интенсивности рассеяния;
- повышение подвижности носителей заряда из-за пространственного разделения электронов и породивших их ионизированных атомов примеси;
- баллистическое движение электронов в GaAs и InP.

В транзисторных структурах с гетероселективным легированием различают два механизма разогрева транзисторной структуры. Во-первых, так называемый глобальный разогрев, который заключается в повышении общей температуры транзисторной структуры в целом за счет выделяемой мощности. Это увеличение тем-

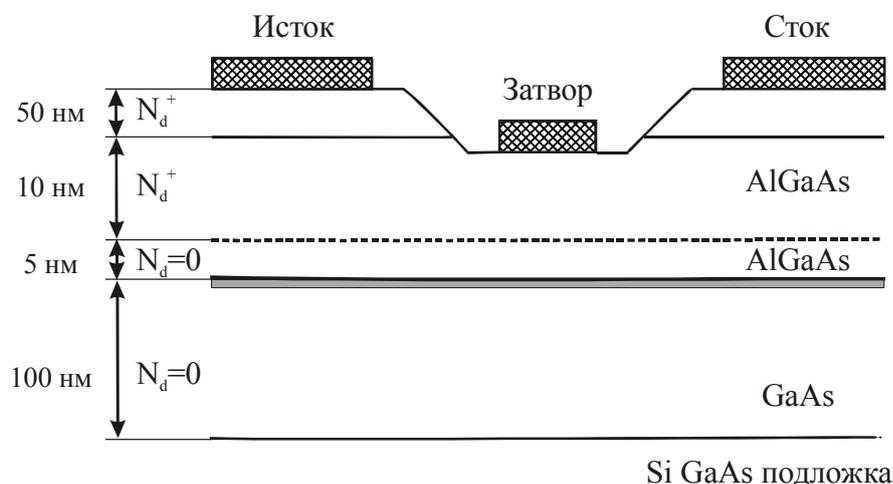


Рис. 1

пературы можно ограничить за счет правильного выбора конструкции материалов теплопроводов и корпуса с соответствующими значениями тепловых сопротивлений. Второй механизм обусловлен разогревом вследствие эффектов сильного поля под затвором и локальным разогревом электронного газа до температур, превышающих тысячу Кельвинов, который устранить конструктивными приемами не удастся.

В реальных транзисторных структурах эти два механизма действуют, как правило, одновременно, поэтому для точного определения электротепловых режимов транзисторной структуры с гетероселективным легированием актуальным является их математическое описание, которое позволило бы провести анализ распределения температурных полей. Одна из причин актуальности поставленной задачи связана с областью применения НЕМТ в режиме большого сигнала, а также в устройствах со средним и высоким уровнем рассеиваемой мощности. Другая причина связана с физическими процессами, в частности, с эффектом саморазогрева транзисторной структуры, так как тепловые эффекты являются одной из основных причин, ограничивающих достижение более приемлемых параметров, надежных и эксплуатационных показателей таких транзисторных структур.

Постановка задачи

Как отмечалось ранее [1, 2] наличие ДЭГ и изменение параметров электронного газа вследствие повышения температуры могут привести к возникновению высоких локальных

градиентов температуры, которые влияют как на электрические характеристики транзисторной структуры, так и на параметры надежности транзистора. Поэтому необходим согласованный термодинамический анализ многослойной структуры НЕМТ, например, показанной на рис. 2. Результаты этого анализа позволяют оценить распределение температурных полей НЕМТ структуры, тем самым выбрать режимы устойчивой работы транзистора с точки зрения температурного диапазона, а также выработать рекомендации по оптимальному выбору конструкции транзистора и обеспечению теплоотвода в монокристаллических ИС СВЧ. Среди математических моделей, учитывающих тепловые эффекты в НЕМТ, можно выделить следующие два класса. К первому классу можно отнести модели НЕМТ, в которых эффект саморазогрева учитывается за счет введения дополнительных слагаемых к параметрам модели, определяемым в стационарных режимах. Эти слагаемые задаются уравнениями, описывающими физические процессы эффектов саморазогрева [3]. Для схемотехнического моделирования в эти модели включают дополнительные, зависящие от температуры источники тока (рис. 3).

Тогда, суммарный ток будет равен: $I_{\Sigma} = I_{d_{ст}} + I_{th}$, где $I_{d_{ст}}$ – ток канала транзистора, определяемый в стационарном режиме; I_{th} – тепловой ток, являющийся функцией разности напряжения ΔT , протекающий через тепловое сопротивление R_{th} и тепловой емкости C_{th} , зависящих от температуры и геометрических параметров прибора.

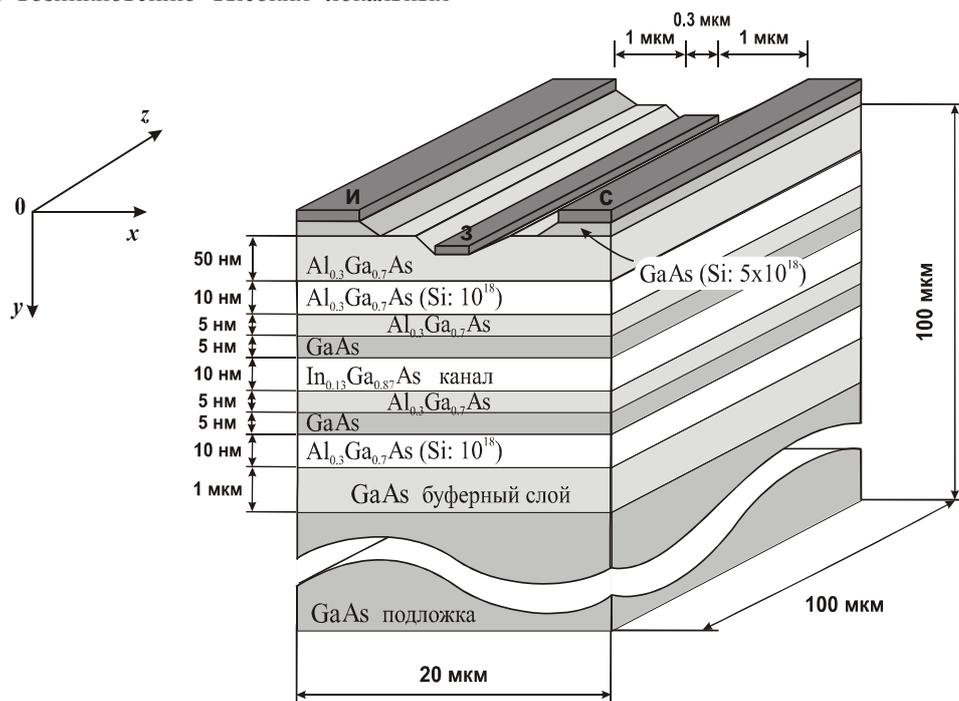


Рис. 2

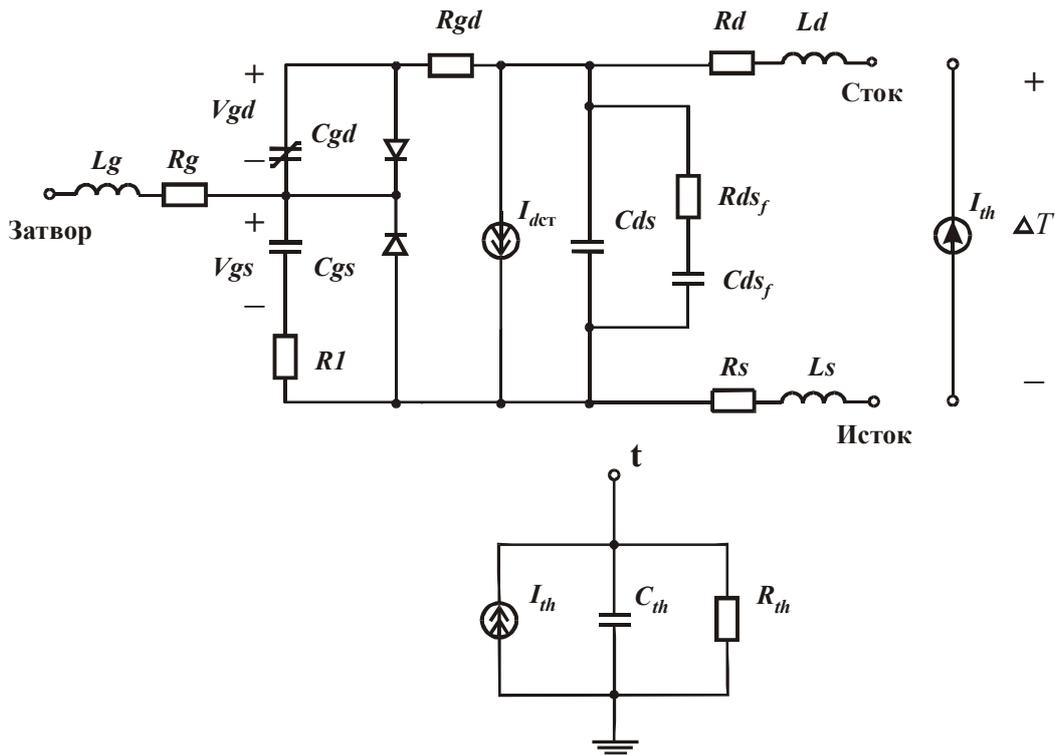


Рис. 3

Достоинством такого моделирования является простота расчета, так как параметры элементов модели определены в стационарном режиме, а выходные характеристики получаются путем суммирования напряжений и токов модели, полученных при нормальных условиях, и дополнительных источников тока и напряжения, величины которых аппроксимируют измерения тока или напряжения, в зависимости от температуры транзисторной структуры. Однако, такой подход является приближенным и позволяет лишь только оценить влияние изменения температуры (зачастую изменения обусловлены внешними факторами: разогрев корпуса, внешние изменения температуры).

Ко второму классу можно отнести модели НЕМТ, учитывающие эффекты саморазогрева транзисторной структуры уже на стадии постановки вычислительной задачи. Учет производится введением обратной связи в уравнении модели между напряжениями, токами рассматриваемого элемента и изменением температуры транзисторной структуры, вследствие выделяемой мощности. Тем самым осуществляется интегральная оценка изменения характеристик НЕМТ от физических процессов, вызванных эффектами саморазогрева. С точки зрения математической модели, вышеупомянутая обратная связь отражается нелинейными зависимостями параметров модели и тем самым ведет к усложнению модели и к увеличению жесткости системы уравнений, описывающих работу рассматриваемой транзисторной структуры. Подобная модель рассматривалась в статье [4].

Для уточнения моделирования, с использованием модели первого класса, необходимо сначала произвести термодинамический анализ, а затем зная значение температуры в каждом узле сетки, выбранной для расчета температурных полей в кристалле, произвести расчет токов и напряжений.

Для двумерного моделирования и визуализации термодинамических процессов возможно применение метода конечных элементов. Ключевыми моментами являются:

- выбор типа сетки (прямоугольная, треугольная, правильноугольная, тупоугольная, кривая треугольная и т.д.);
- определение граничных условий;
- решение уравнения теплопроводности с учетом особенности распространения тепла в многослойных структурах.

Выбор типа сетки определяется двумя условиями: точностью описания распределения тепла в транзисторной структуре и минимальными вычислительными затратами.

Выбор формы ячейки сетки осложняется в случае нерегулярной, с точки зрения геометрии, структуры, так как тогда необходимо уточнять разбиение области острых углов. На данный момент существует два основных типа получения массива узлов сетки: прямоугольная, когда близлежащие узлы сетки представляют собой прямоугольник, в случае нерегулярной структуры производится кратное разбиение прямоугольника, и треугольная.

Первый тип удобен для приближенных вычислений, так как увеличение разбиения сетки по алгоритму прямоугольника приводит к

увеличению количества узлов в $(2n+1)$ раз, что увеличивает вычислительные затраты. Современные вычислительные пакеты программ, такие как MATLAB, MAPPLE, PISCES, используют алгоритм разбиения треугольниками. Подобная дискретизация имеет преимущества [5], поскольку пересчет производится только в трех соседних точках, что уменьшает вычислительные затраты.

Граничные условия могут задаваться различными температурными зависимостями тепловых параметров относительно нормали границы раздела сред [1]:

- условия Дирихле: $h \cdot T = r$ на участке границы раздела $d\Omega$, где h – коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$); r – функция, определенная на области $d\Omega$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$); T – определяемое значение температуры (К).
- условия Неймана: $\vec{n} \cdot (c \cdot \nabla T) + q \cdot T = g$ на участке границы раздела $d\Omega$, где c , q , g – функции, определенные на области $d\Omega$; \vec{n} – нормаль к границе раздела двух сред; T – искомое значение температуры (К).
- смешанные условия – комбинация условий Дирихле и Неймана.

Так как исследуемый объект имеет разнородную структуру, то целесообразно использование смешанных условий Дирихле и Неймана.

Существует несколько типов уравнений теплопроводности, с помощью которых описывается распределение температуры в исследуемой среде: параболическое, гиперболическое, эллиптическое и характеристическое.

Для исследования многослойной транзисторной структуры, приведенной на рис. 2, выбрана эллиптическая форма уравнения:

$$-\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = Q + h \cdot (T_{ext} - T)$$

на области Ω с начальными условиями $T(x,0) = T_0(x)$ для $x \in \Omega$

- где Ω – замкнутая область на плоскости;
- k – коэффициент теплопроводности ($30 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$);
- Q – источник тепла (4 Вт);
- T_{ext} – внешняя температура (К).

Результаты моделирования

В отличие от типичных полевых структур актуальными для теплового анализа являются многослойные структуры, в которых чередуются слои с высокой электропроводностью и обедненные слои, близкие по своим свойствам к диэлектрику. Такие структуры с

гетеропереходами, квантовыми ямами и потенциальными барьерами дают многообразную картину тепловых полей в плоскости, перпендикулярной к направлению токопереноса в транзисторе. В многослойных структурах увеличивается ток через транзистор, что приводит к увеличению выделяемой мощности. Кроме того, увеличивается и общая толщина проводящего слоя под затвором. Эти факторы приводят к тому, что в некотором слое, толщиной 20 мкм имеет место неярко выраженный максимум температуры. Этот максимум становится более заметным при увеличении длины затвора. Это видно из рис. 4 для двух транзисторных структур с длиной затвора 1 мкм (а) и 0.4 мкм (б).

Локальное тепловое поле вдоль канала транзистора приводит к дополнительным факторам разогрева электронного газа. Особенностью является то, что область разогрева простирается от омического контакта истока, проходит через область сильного поля под затвором и достигает омического контакта стока. В результате такого разогрева нарушается термодинамическое равновесие в приконтактных областях транзистора, что приводит к росту энергии электронов, уменьшению их подвижности и росту паразитных сопротивлений контактов. Из температурной зависимости подвижности электронов, приведенной на рис. 5 [6], и из распределения теплового поля транзисторной структуры в плоскости xu (рис. 6) видно, что подвижность электронов в подзатворной области по сравнению с подвижностью электронов при 300 К уменьшается в три раза, а подвижность электронов в канале уменьшается в два раза.

Кроме того, за счет перераспределения электронов в потенциальных ямах возможно изменение потенциального рельефа, особенно в области проводящих слоев транзистора, что ухудшает управление транзистора полем затвора и приводит к уменьшению крутизны транзистора. Как показано в работе [7] повышение температуры кристаллической решетки полевого субмикронного транзистора с барьером Шотки на 10 градусов приводит к уменьшению крутизны транзистора на 9%. Как ожидается в рассматриваемом транзисторе эти величины могут быть сопоставимыми.

Таким образом, распределение тепловых полей в многослойных гетероструктурах имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе топологии и конструкции транзистора с гетероселективным легированием. В частности, влияние рассмотренных эффектов можно уменьшить при уменьшении активной области транзистора как за счет уменьшения длины затвора, так и толщины активных слоев транзистора.

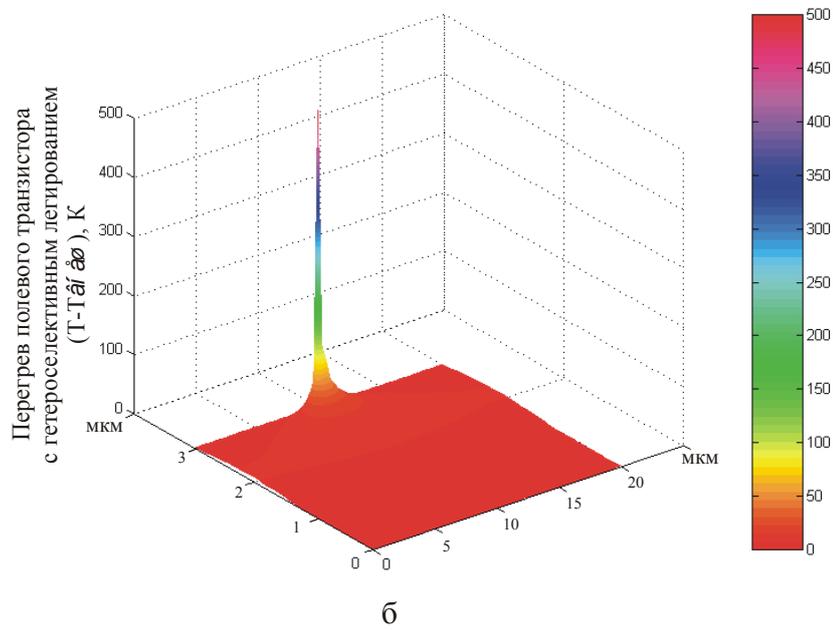
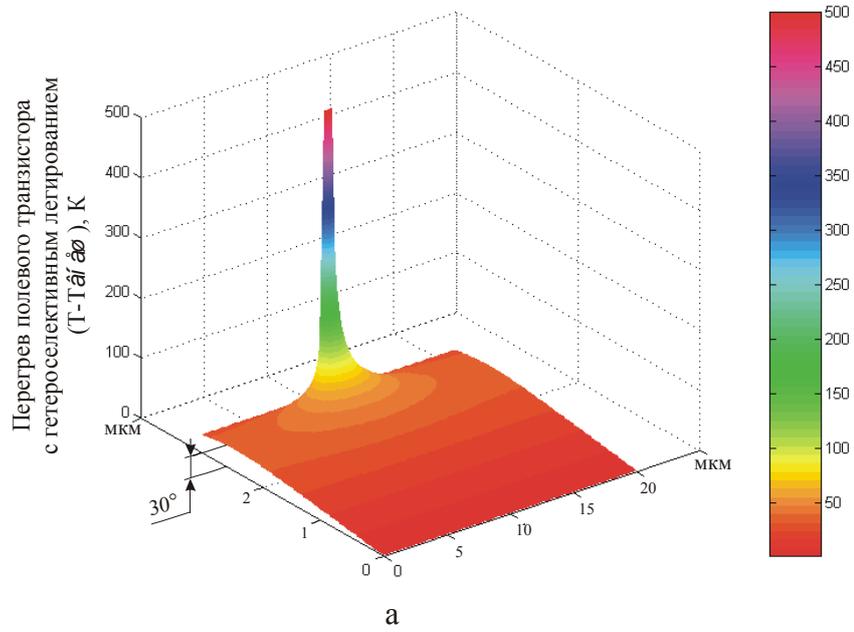


Рис. 4

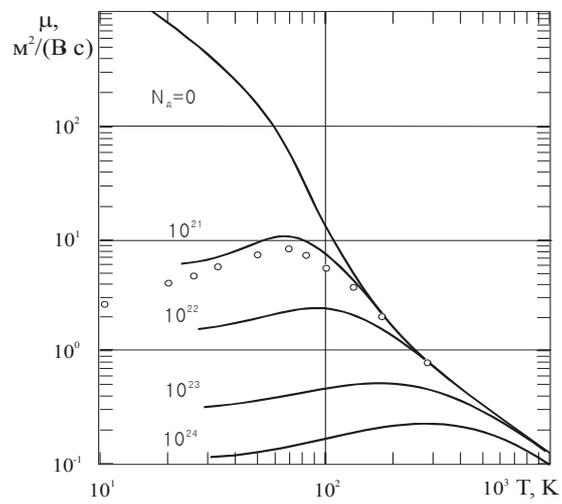


Рис. 5

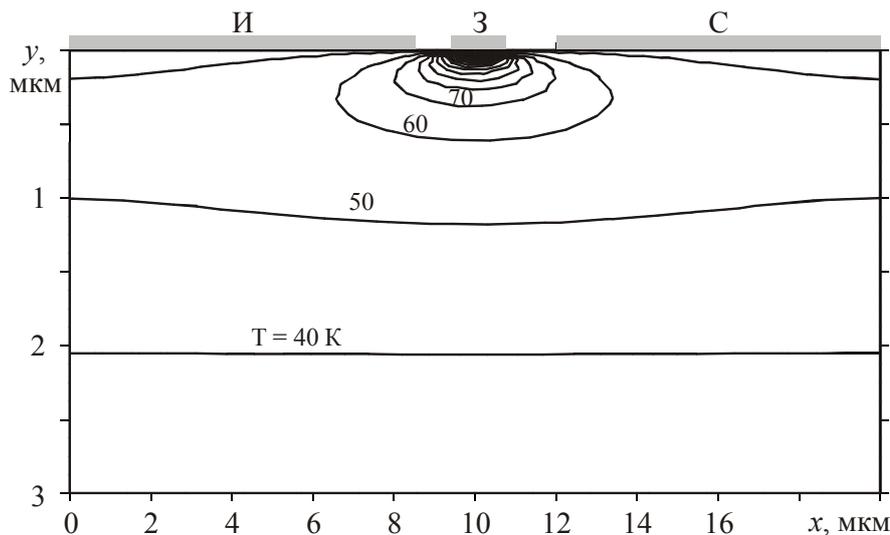


Рис. 6

Выводы

- 1) Предложена физико-топологическая модель для теплового анализа транзисторов с гетероселективным легированием, основанная на двумерном уравнении теплопроводности. Вычислительная процедура адаптирована к расчету многослойных структур с точки зрения выбора шага дискретизации пространственной сетки и ее формы, а также условий, включая условия на границе металл-полупроводник.
- 2) Полученные результаты свидетельствуют об особенностях распределения тепловых полей в подзатворной области транзисторной структуры, связанных с наличием приповерхностного слоя с повышенной температурой, что увеличивает эффект саморазогрева в транзисторе как за счет дополнительного разогрева электронов в канале, так и за счет их разогрева в истоковой и стоковой областях за пределами активной области.
- 3) Ухудшение параметров транзисторной структуры при дополнительном разогреве обусловлено как увеличением паразитных сопротивлений, так и разогревом электронного газа в канале, что приводит к уменьшению подвижности электронов.

Литература

1. Семеновская Е.В., Приходько Н.В., Тимофеев В.И. Физико-топологическое моделирование теплового режима мощного субмикронного полевого транзистора СВЧ // Научно-технический сборник «Электроника и связь» – 2000. – № 9.– С. 140–142.
2. Петросянц К.О., Рябов Н.И., Харитонов И.А., Мальцев П.П., Маляков Е.П. Программное обеспечение для моделирования тепловых режимов интегральных схем // «Автоматизация проектирования» – 1997. – № 3.
3. Apostolos Samelis and Dimitris Pavlidis, Analysis of the large-signal characteristics of power heterojunction bipolar transistors exhibiting self-heating effects, / IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 45, no. 4, pp.534–541, April 1997.
4. Семеновская Е.В., Тимофеев В.И., Приходько Н.В., Анализ моделей и тепловых режимов гетеробиполярных субмикронных транзисторов // Научно-технический сборник «Электроника и связь» – 2001. – № 10.– С. 133–136.
5. Mahesh V. Patil New discretization scheme for two-dimensional semiconductor device simulation on triangular grid / IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, vol. 17, no. 11, November 1998, pp. 1160–1165.
6. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия: Пер. с англ.– М.: Мир, 1991.–632 с., ил.
7. Москалюк В.А., Тимофеев В.И. Моделирование процессов переноса электронов в канале и подложке субмикронного полевого транзистора // Электронная техника Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990 – Вып. 2 (246). С. 22–27.