

Физико-топологическое моделирование теплового режима мощного субмикронного полевого транзистора СВЧ

По результатам физико-топологического моделирования рассчитаны электрические характеристики субмикронного ПТШ. Проведен анализ распределения температурных полей в мощном полевом транзисторе СВЧ.

By results of physical and topological simulation the electrical characteristics of submicron MESFET are counted. Electrical characteristics of submicron transistor was calculated by using results of physical simulation.

Введение

Мощные полевые транзисторы СВЧ с барьером Шотки и транзисторы, работающие в режиме большого сигнала, при некоторых значениях питающих напряжений могут рассеивать достаточно высокие уровни мощности. Это приводит к саморазогреву транзистора и, как следствие, к изменению его электрических характеристик. Кроме того, в субмикронных полевых транзисторах имеет место разогрев электронов сильным электрическим полем и в результате температура электронного газа может достигать тысяч градусов Кельвина. Распределение электронов по энергиям (и, следовательно по температурам) вдоль структуры транзистора имеет ярко выраженный максимум у стокового края затвора, что связано с разогревом электрическим полем и преимущественно междолинным рассеянием с последующей релаксацией в межэлектродном пространстве затвор-сток. Поэтому представляет интерес исследование взаимного влияния электродинамических и тепловых параметров, а также распределение тепловых полей по структуре транзистора.

Хотя влияние температуры на параметры полевых приборов не так существенно, как в биполярных приборах, но для мощных субмикронных транзисторов СВЧ многие предельные параметры связаны с перегревом, вызванным протекающим током. На экспериментальном уровне такой анализ практически не реализуем, но необходим для оптимального проектирования как отдельных транзисторов, так и монолитных СВЧ устройств. Самосогласованный анализ тепловых и электронных процессов в транзисторных структурах практически не возможен из-за отсутствия соответствующих программ моделирования и вследствие различного пространственного масштаба моделируемых явлений: электронные процессы протекают в активной области транзистора с размером порядка 0,1...1 мкм, а для анализа тепловых явлений необходима область моделирования порядка 100 мкм.

Принимая во внимание выше изложенное, в качестве инструментария для анализа полевых структур на основе фундаментальных уравнений переноса тепла может быть использован пакет программ Matlab, а именно входящий в его состав набор программ для решения дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП). Численное решение уравнений находится путем дискретизации области решения методом конечных элементов. Алгоритмы, используемые в программах пакета, позволяют:

- задать геометрию двумерной области решения, граничные условия и коэффициенты для ДУЧП;
- получить численное решение задачи при соответствующей аппроксимации и разбиении области решения с помощью сетки узлов, вычислить значения в узлах полученной сетки;
- реализовать графическое представление результатов решения.

Удобный графический интерфейс позволяет сократить время на определение области поиска решения. Поэтапное определение: граничных условий, коэффициентов тепловых уравнений, характеризующих заданную твердотельную структуру, количества узлов дискретизации – позволяет значительно сократить время моделирования. Разбиение процесса моделирования на этапы позволяет скорректировать условия задачи исследования на каждом этапе и возобновить процесс поиска решения с этого этапа, не изменяя последующие параметры численного эксперимента.

В качестве модельной задачи рассматривается эффект влияния саморазогрева протекающим током на параметры мощного полевого транзистора с учетом предварительного анализа общего теплового состояния всей транзисторной структуры. Результаты этого анализа позволяют в дальнейшем провести расчет тепловых полей в активной области транзистора и промоделировать их влияние на электронные процессы в канале и, соответственно, на параметры транзистора.

Поскольку тепловое уравнение относится к дифференциальным уравнениям в частных производных эллиптического типа, то соответственно используются программные средства PDE Toolbox, позволяющие найти решение в заданной области. В качестве численной процедуры используется функция `parabolic`. В общем виде параболическое уравнение можно записать:

$$d \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla T) + aT = f \text{ в области } \Omega \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$T(x,0) = T_0(x) \text{ для } x \in \Omega.$$

Граничные условия могут быть определены относительно нормали границы раздела сред с различными тепловыми параметрами следующими температурными зависимостями:

- условия Дирихле: $hT = r$ на участке границы раздела $\partial\Omega$;
- обобщенные условия Неймана: $\vec{h} \cdot (c \nabla T) + qT = g$ на участке границы раздела;
- смешанные условия: непосредственная комбинация условий Дирихле и обобщенных условий Неймана (применимы только для систем с разнородной структурой).

Для задания вышеперечисленных условий необходимо определение следующих параметров: \vec{h} – единичный вектор нормали к границы раздела; g , q , h и r – функциональные зависимости, определяющие распределение температуры на границе $\partial\Omega$.

Подобные задания граничных условий несколько отличается от традиционной терминологии, где условия Неймана обычно задаются в случае $q = 0$ и с этой точки зрения принятые в настоящей модели условия Неймана можно назвать смешанными (обобщенными) условиями. Подобные условия также принято называть граничными условиями Робина (*Robin boundary conditions*). Использование условий Дирихле необходимо при постановке численного эксперимента для упрощения вычислений, поскольку функция, описывающая распределение температуры на границе области решения является линейной.

Для (1) запись теплового уравнения выглядит следующим образом:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) + h(T - T_{ext}) = f \quad (2).$$

С помощью этого уравнения описывается распределение температуры в заданной среде, где ρ – плотность проводимого теплового потока ($2,35 \times 10^9$ Вт/м²); C – теплоемкость (47,3 Дж/моль·К); k – коэффициент теплопроводности (30 Вт/м·К°); h – коэффициент конвективного теплообмена (*); T_{ext} – внешняя температура (*); f – источник подводимого тепла (4 Вт/м²).

Для массива точек треугольной сетки области решения Ω и для момента времени ($t \geq 0$) решение ДУЧП (как функции от координаты) методом конечных элементов выглядит следующим образом:

$$u(x, t) = \sum_i U_i(t) \phi_i(x) \quad (3)$$

Аппроксимация решения теплового уравнения может быть разбита на три этапа:

1. Описание геометрии области решения Ω и граничных условий. Этот этап выполняется средствами программы pdeTool, входящей в состав PDE Toolbox или с помощью функций pdegeom и pdebound, определяющих соответственно геометрию области решения и граничные условия.
2. Определения точек области Ω , в которых будет проведен поиск решения уравнения, путем разбиение области Ω с помощью треугольной сетки.
3. Дискретизация ДУЧП и граничных условий в полученных точках с целью получения линейной системы уравнений вида $K \cdot T = F$. Вектор неизвестных T содержит значения температур в точках сетки

Постановка задачи

Для решения поставленной задачи использовалось ряд допущений, упрощающих исследование:

а) рассматривалась лишь монокристаллическая пластина полупроводника (рис.1) с заданием на ее поверхности контакта с подложкой граничных условий I рода (температура принимается постоянной и равной 20 °С);

б) принимается, что материал пластины (GaAs) изотропен, теплофизические параметры материала считаются постоянными и не зависящими от температуры;

с) так как основное тепловыделение происходит в очень тонком слое, порядка 0,1 мкм, то полагается, что тепловой поток подводится к участку наружной поверхности, соответствующему зоне тепловыделений.

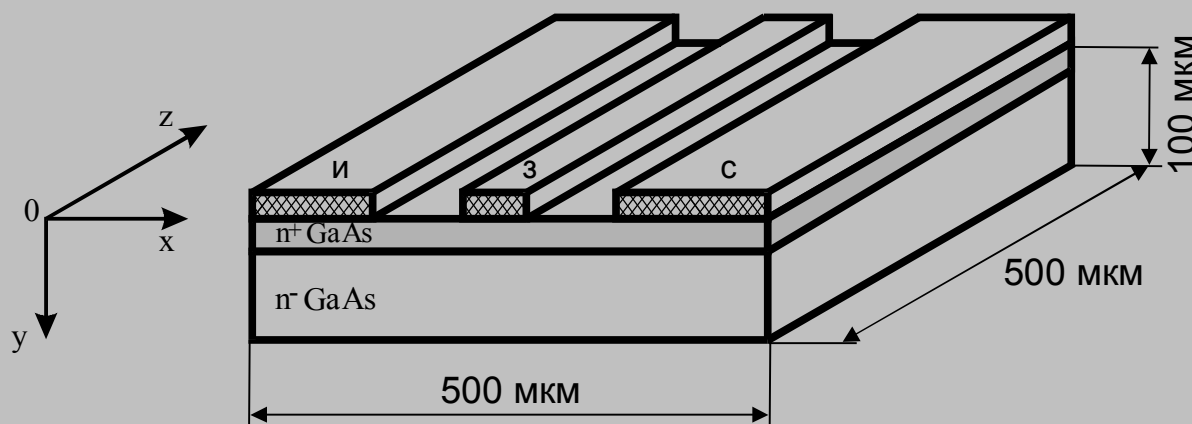


Рис. 1

Температура электронов под затвором может существенно отличаться от равновесной вследствие разогрева и междолинных переходов. При этом «медленные» электроны верхних

долин уменьшают среднюю дрейфовую скорость коллективного движения, что приводит к процессам накопления носителей в области сильного электрического поля под затвором.

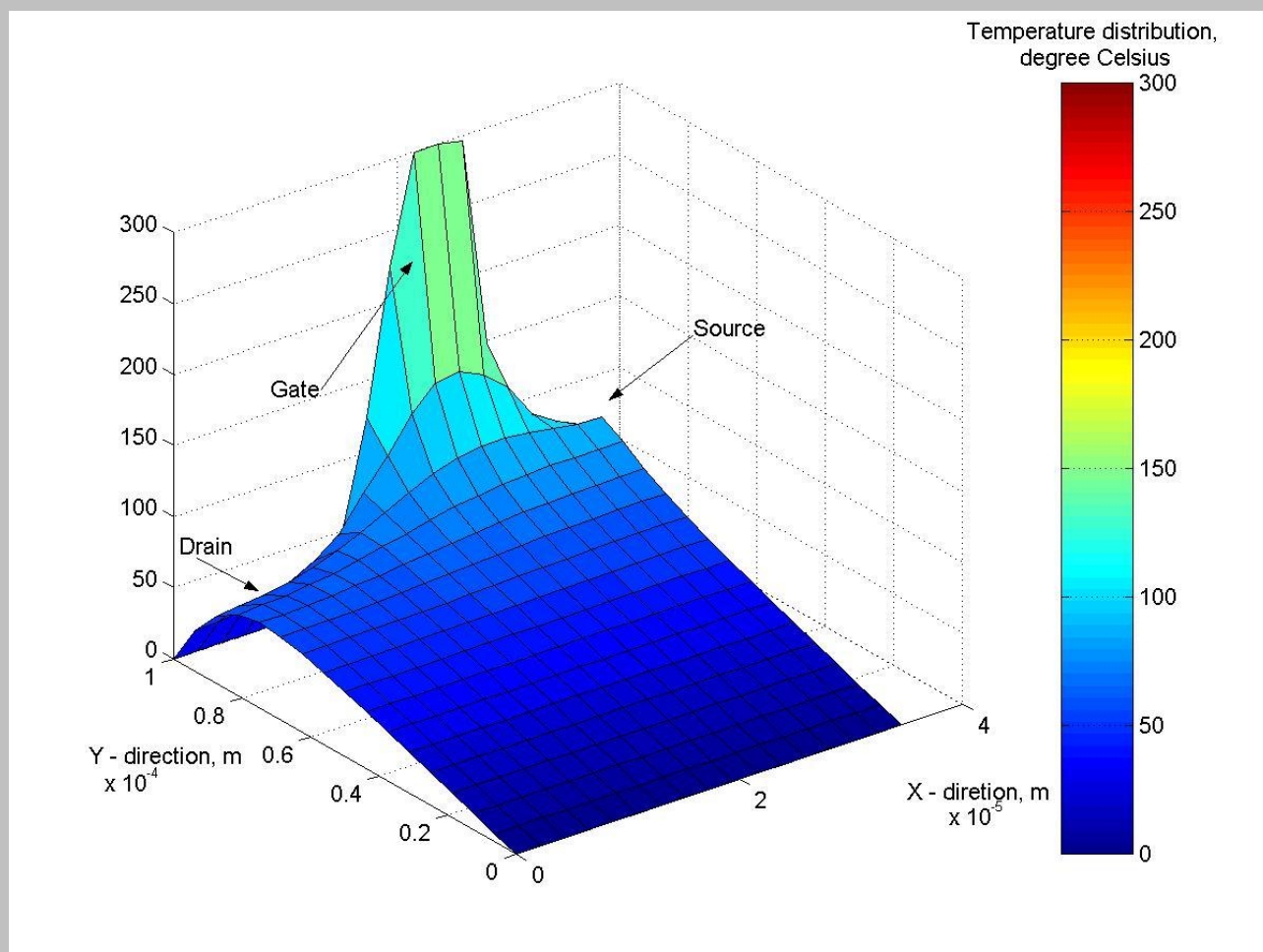


Рис. 2

Как видно из графика (рис.***), в транзисторе имеют место заметные продольные и поперечные теплоперетоки из зон диссипативных тепловыделений в периферийные зоны кристалла, где тепловыделения отсутствуют. Вблизи зоны диссипативных выделений процесс теплопереноса имеет многомерный характер (рис.***), а вдали от этой зоны и в глубине кристалла почти одномерный характер. Т.е. тепловой поток направлен только по толщине кристалла (вдоль оси OY), распространение теплового потока вдоль оси OX пренебрежимо мало, температура вдоль оси OX практически постоянная и изменяется только по оси OY. Наличие таких теплоперетоков приводит к некоторому снижению температурного уровня транзистора в целом, однако, в центральной части кристалла, где температура максимальна, этот эффект проявляется в наименьшей мере. Следовательно, при предварительном анализе общего теплового состояния всей транзисторной структуры можно рассматривать лишь центральную зону.

Отмеченная выше особенность позволяет упростить решение задачи теплопереноса за счет поэтапного уточнения результатов. Т.е., сначала находится приближенное решение и производится оценка величины зоны высоких температур, а затем рассматривается не вся транзисторная область, а лишь зона высоких температур, размеры которой были определены на предыдущем этапе. Поскольку эта зона относительно не велика, то это позволяет использовать достаточно мелкую ее дискретизацию (см. рис.***), что обеспечивает высокую точность получаемых результатов.

Литература:

1. Прокопов В.Г., Тариелашвили Г.Т., Шеренковский Ю.В., Юрчук В.А. Моделирование мощных полевых транзисторов. ч. 1 Тепловой режим. В сб. докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы физической и биомедицинской электроники». Киев, 1995, с. 240-244.
2. Захаров А.Л., Асвадунова Е.И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1983. – 184 с.
3. Могилевский В.М., Чудновский А.Ф. Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972. – 536 с.
4. Теплопроводность твердых тел: Справочник/ А.С. Охотин, Р.П. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский; Под ред. А.С. Охотина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
5. Е.В. Семеновская, В.И. Тимофеев СВЧ методы измерения температурных полей // Электроника и связь, №8, том 2, 2000. – С. 236–265
6. Берман Р. Теплопроводность твердых тел/ Пер. с англ. Л.Г. Асмазова; Под ред. В.В. Кресина. – М.: Мир, 1979. – 286 с.
- 7.