

Моделирование объемно-интегральных активных полевых субмикронных структур

Аннотация.

Проведен анализ подходов адаптации математической модели объемных интегральных схем (ОИС) к системам автоматизированного проектирования (САПР). Приведены характеристики и результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными для двухкаскадный усилитель мощности на основе арсенид-галлиевого ПТШ 0.2×300 мкм.

The approaches to adaptation of 3D IC mathematical models for CAD systems are analyzed. Characteristics and simulation results compared to experimental data for two-stage power amplifier with GaAs MESFET (0.2×300 μm) are represented.

Введение.

Создание современной радиоэлектронной аппаратуры (РАЭ) и вычислительной техники для радиосвязи, радиолокационной, радиобиологической и других областей техники (объединенных общим названием систем сверхбыстрой обработки информации (ССОИ)) требует большого набора разнообразных электродинамических структур, составляющих необходимую для ССОИ базу функциональных элементов (ФЭ). По своей конструкции ФЭ (волноводы резонаторы, фильтры, делители (сумматоры) мощности и др.) являются достаточно сложными для анализа, а значит и для простейшего синтеза – параметрического. Современная традиционная техника СВЧ располагает огромным набором разнообразных типов линий передачи (ЛП) и базовых элементов (БЭ), из которых строятся ФЭ и функциональные узлы (ФУ) СВЧ модулей ССОИ самого разнообразного назначения.

Серьезные успехи при производстве дешевых, надежных малогабаритных, технологичных ССОИ были достигнуты при использовании сначала плоскостных [1], а потом и объемных интегральных схем (ОИС) [2]. Особенно показателен переход к ОИС СВЧ: технология для каждого слоя ОИС остается "традиционной" плоскостной, а после сборки всех слоев в единый модуль выигрыш в массогабаритных параметрах достигает $10^1 \dots 10^3$ (по сравнению с другими конструкциями) [2]. Однако анализ плоскостных и тем более ОИС представляет весьма сложную математическую задачу.

В данной статье рассматриваются подходы к моделированию отдельных слоев ОИС на основе активных полевых субмикронных структур с применением принципа декомпозиции схемы на отдельные подсхемы.

Методы построения математической модели.

Как отмечалось в [3] существуют общие концепции построения ОИС СВЧ. В частности проблема экранирования слоев друг от друга может решаться двумя способами: экранированием металлом, либо слоями диэлектрика соответствующей толщины с учетом малой протяженности поля по вертикальной координате вследствие большого замедления рабочей волны.

Выбор той или иной схемы является компромиссом между ними и должен решаться отдельно

для каждой конкретной ситуации. Вследствие этого, анализ и проектирование ФУ на ОИС представляет собой сложную (обычно трехмерную) задачу. Для решения этой задачи обычно применяется принцип декомпозиции [3]. Первым этапом анализа является "разложение" СВЧ-модуля на ФУ и БЭ. Далее определяется матрица рассеяния (МР) $\|S_i\|$ ($i = 1, 2, \dots, N$) каждого БЭ. Зная $\|S_i\|$ и располагая достоверной информацией о взаимодействии между БЭ (т.е. известна МР канала связи), можно определить МР всего ФУ или СВЧ-модуля. Во всех системах САПР имеются стандартные процедуры образования общей матрицы рассеяния из матриц $\|S_i\|$. Они основываются на алгебраическом, топологическом, теоретико-множественном и комбинированном алгоритмах [2].

Как следует из вышесказанного, основополагающим для САПР является знание МР БЭ. По мере повышения быстродействия ССОИ на СВЧ значительно возрастают необходимые для САПР точности определения $\|S_i\|$. Единственной возможностью точного определения МР является использование математической модели на электродинамическом уровне строгости [3]. Однако реализация алгоритма для точного определения $\|S_i\|$ (уравнения Максвелла – граничные условия – интегральные уравнения (ИУ) (система ИУ) – метод Бубнова-Галеркина (или Релея-Ритца) – система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)) неизбежно связана с большими машинными ресурсами (быстродействие + время) и потерей, как правило, четкой физической картины явления. Таким образом, можно отметить два противоположных требования к САПР: скорость определения $\|S_i\|$ и высокая точность $\|S_i\|$. Одним из путей решения этой проблемы может быть построение адекватных математических моделей по строгим электродинамическим алгоритмам с последующей аппроксимацией результатов и (или) их запоминанием. Построенная таким образом математическая модель удовлетворяет требованиям точности и скорости считывания результата. Это дает возможность построения моделей ФУ СВЧ с наглядной картиной электродинамических процессов.

С этой точки зрения, аппроксимация физических моделей активных субмикронных полевых ФУ СВЧ с помощью математических моделей полевых структур с распределенными параметрами позволяет выделить еще одно направление для уточнения и ускорения анализа ОИС. В этом случае принцип декомпозиции применяется непосредственно к слоям ОИС, что позволяет рассматривать каждый слой как открытую или квазизакрытую структуру. Такой подход позволяет применить широкий спектр математического аппарата для моделирования отдельной плоскостной структуры [1, 3]. В дополнение к этому, подобный подход позволяет анализировать физические процессы в слоях ОИС непосредственно во временной области [4].

В результате, процесс адаптации математической модели ОИС к системам автоматизированного проектирования (САПР) сводится к следующим этапам:

- построение схмотехнической модели текущего слоя ОИС в зависимости от его функционального назначения;
- численный анализ полученной модели как системы (квазизакрытая система), в которой входное воздействие определяется реакцией с выхода предыдущего слоя, а нагрузка определяется свойствами последующего слоя;
- определение выходной реакции ОИС как результат последовательного пересчета реакций составляющих ОИС слоев.

Подобный подход был применен при анализе двухкаскадного усилителя мощности, выполненного по гибридной технологии.

Результаты моделирования и эксперимента.

В качестве ОИС рассматривался двухкаскадный усилитель мощности на основе арсенид-галлиевого ПТШ 0.2×300 мкм. Электрическая схема усилителя представлена на рис. 1.

Возможным вариантом компоновки ОИС двухкаскадного малошумящего усилителя могло бы быть послонное размещение в диэлектрике первого и второго каскадов с учетом емкостной связи между каскадами. В качестве согласующих элементов для для усилительных каскадов использовались отрезки линий передачи, электрические длины которых рассчитаны на частоте 15 ГГц.

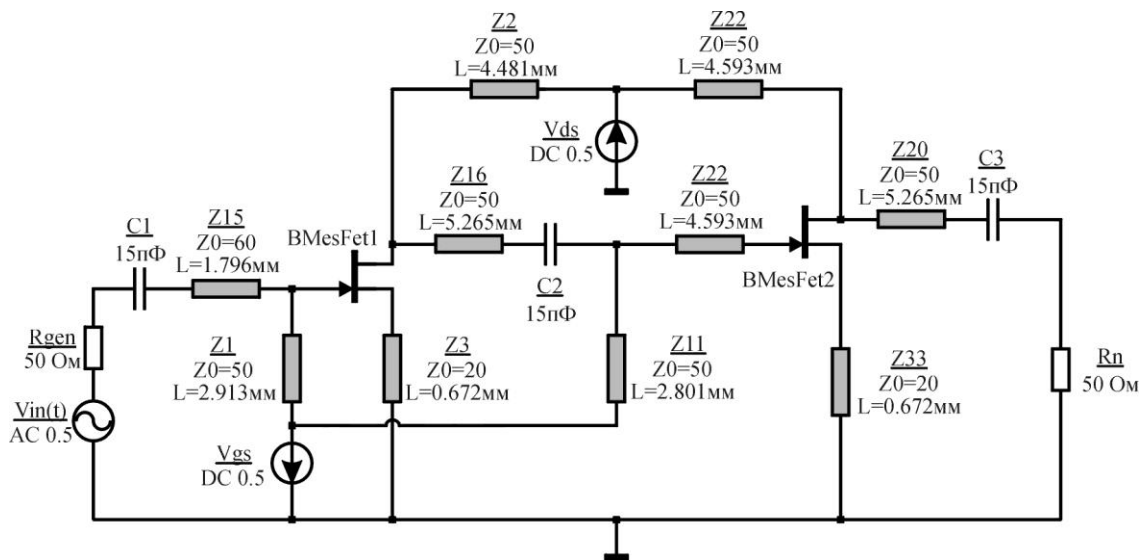


Рис. 1

Такая компоновка позволяет значительно уменьшить один из геометрических размеров микросхемы, что особенно актуально при использовании в качестве согласующих элементов отрезков линий передачи.

Параметры математической модели для арсенид-галлиевого ПТШ (модель Рейтона) описаны в табл. 1.

Табл. 1

Параметр	Значение
Vto	-1.56 В
α	1.46
β	12.0 мА
λ	0.56
Cзи	0.08 пФ
Cзс	0.02 пФ
Cси	0.1 пФ
Rз	1.08 Ом
Rи	3.2 Ом
Rc	3.35 Ом
Kf	10^{-10}
Af	0.7
τ	4.1 псек

Результаты сравнительного анализа полученных усилительных и шумовых характеристик малошумящего усилителя мощности представлены на рис. 2 и рис. 3.

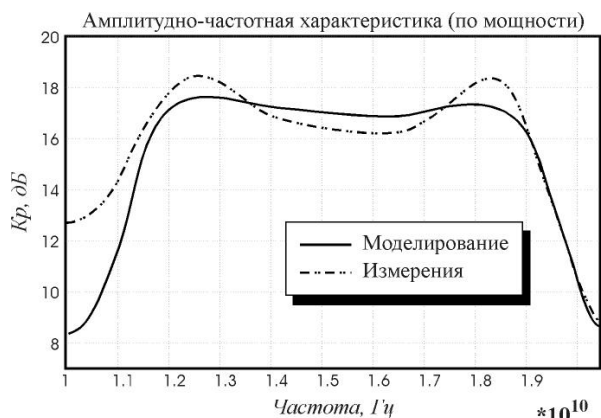


Рис. 2

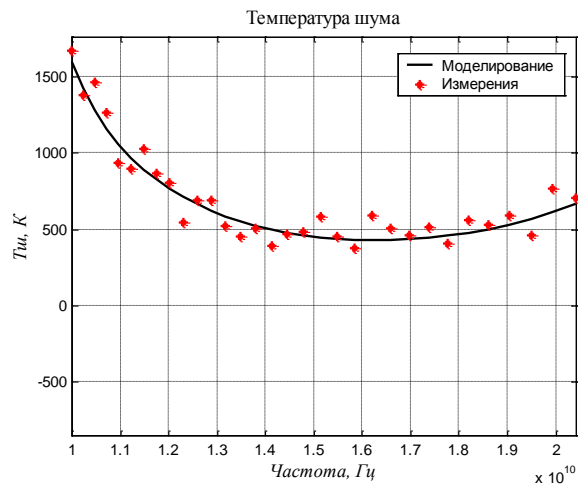


Рис. 3

Выводы.

Рассмотрены подходы к моделированию объемных интегральных схем на основе методов декомпозиции. Приведены результаты анализа маломощного двухкаскадного СВЧ усилителя в сравнении с экспериментальными данными. Показаны возможность послойного размещения каскадов многокаскадного маломощного усилителя в объемных интегральных схемах СВЧ.

Литература.

1. Нефедов Е.И., Фиалковский А.Т. Полосковые линии передачи: электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ. М.: Наука, 1980.
2. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ – элементная база аналоговой и цифровой радиоэлектроники. М. Наука. 1987.
3. Нефедов Е.И. Электродинамика объемных интегральных схем СВЧ и крайневых частот. Радиотехника и электроника. Вып.4 1993.
4. Приходько Н.В., Тимофеев В.И. Численный анализ полевых структур // Электроника и связь, № 8, том 2, 2000. – С. 173-174.