

Современные тенденции разработки и применения spice моделей для автомобильной техники

Рубцов Ю.В.

Генеральный директор АО «ЦКБ «Дейтон», эксперт по стандартизации

8 (926) 009 37 00

Rubtsov@Deyton.ru

Аннотация

В данной статье рассмотрены современные тенденции разработки и применения SPICE моделей для автомобильной техники на примере изделий электронной компонентной базы на основе карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN).

Ключевые слова: изделия электронной компонентной базы (ЭКБ), модель SPICE, система автоматизированного проектирования (САПР), радиоэлектронная аппаратура (РЭА).

Modern trends in the development and application of spice models for automotive vehicles

Rubtsov U.V.

Abstract

This article discusses current trends in the development and application of SPICE models for automotive technology using the products of electronic component base products based on silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN).

Keywords: products of electronic component base, model SPICE, computer-aided design system, electronic equipment.

Введение

В последние годы стремительно растут требования к изделиям электронной компонентной базы (ЭКБ) не только по направлениям расширения функциональных возможностей, миниатюризации и уменьшению веса, но и к энергосбережению. Производители радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) ориентируются на снижение ее потребляемой мощности. Для выполнения таких требований необходима оценка характеристик схемы, таких как эффективность преобразования энергии, скорость отклика, величина тока во время переключения. Однако, если подобные оценки могут быть реализованы с высокой точностью и за короткое время путем моделирования схемы, эффективность разработки РЭА повышается также за счет применения новых типов

ЭКБ, уменьшения количества прототипов узлов в РЭА и сокращения времени разработки. На этом фоне симуляторы схем на базе SPICE моделей активно используются при проектировании РЭА в САПР.

С другой стороны, широко развивается область автомобилестроения, в которой существует острая потребность в предварительных прогнозах, основанных на моделировании внешнего воздействия в виде шума, излучаемого механизмами, и рассеиваемой мощности всей системы. Поэтому растет спрос на SPICE модели для изделий ЭКБ, которые могут с высокой точностью предсказывать эффективность преобразования энергии, электромагнитные помехи и другие факторы для устройств, установленных в системы. В этом плане в зарубежных компаниях проявляются очевидные

тенденции к разработке моделей SPICE, совместимых с устройствами с дискретным питанием. В дополнение к классическим моделям SPICE, которые ориентированы на скорость вычислений, также применяются высокоточные модели SPICE, которые более точно могут воспроизводить переходные характеристики.

В современном мире электроники изделия на основе карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) приобрели заметное значение в автомобильной технике. Они обладают более высокими свойствами, чем изделия на кремнии (Si), такими как напряжение пробоя, ток и плотность мощности. Физические свойства GaN позволяют разрабатывать новые силовые устройства: GaN-HEMT транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT – High Electron Mobility Transistors). Последние имеют более высокое напряжение пробоя (≤ 650 В), чем SiC. Наиболее важным свойством GaN-HEMT является высокочастотное переключение, которое позволяет снизить сопротивление в открытом состоянии. Высокочастотное переключение и более низкое сопротивление во включенном состоянии позволяют снизить потери на переключение и проводимость.

Типичными объектами для применений GaN-HEMT являются преобразователи напряжений, обеспечивающие быструю зарядку источников питания. В большей степени GaN-HEMT имеют лучшие характеристики по сравнению с Si MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors). Следовательно, эта новая технология требует новых стратегий моделирования для воспроизведения правильного поведения GaN-HEMT в РЭА.

1 Обзор публикаций по решению задач моделирования современных изделий ЭКБ

Эффективные модели силовых устройств с широкой запрещенной зоной необходимы для анализа и оценки их влияния на характеристики схемы; обзор различных типов моделей представлен в работах [1] и [2]. В работе [3] предлагается имитационная модель поведения, основан-

ная на наборе собранных данных измерений. Выходные характеристики, зависящие от температуры, моделируются с использованием гибридного подхода, состоящего из интерполяционных таблиц и аналитических уравнений. Больше моделей в зарубежной литературе используют уравнения для эмуляции выходной характеристики, этот подход указывается в [4]. В работе [5] представлена упрощенная модель поведения для моделирования систем силовой электроники, требующая точности как в установившемся режиме, так и в условиях переключения. Важная особенность, зависимость температуры от тока прибора реализована в [6]. В [7] статические характеристики описаны путем введения зависящих от температуры источника напряжения и источника тока. При моделировании также учитывается влияние отрицательного напряжения затвора выключения.

Как указано выше, модели GaN-HEMT основаны на моделях Si. Подход к ним на базе поведенческой модели SPICE является наиболее часто применяемым. Этот подход основывается на математических формулах для воспроизведения статических или динамических характеристик. При этом, в зарубежной практике имеются разработки, предлагающие новые математические формулы для моделирования GaN-HEMT с использованием некоторых особенностей моделей Si. Модели зачастую проверяются путем сравнения смоделированных кривых статических характеристик с кривыми, полученными с помощью измерений.

2 Современные подходы к SPICE моделированию на примере изделий GaN-HEMT

В зарубежных публикациях доступны различные подходы к моделированию GaN-HEMT, которые подразделяются на четыре категории: численные модели; частично физические модели; физические модели; поведенческие модели.

Численное моделирование требует подробной информации о внутренней структуре, геометрии устройства и свойствах материала GaN-HEMT и использует сложные инструменты моделирования.

Точность численных моделей очень высокая, но сложность также высока.

Модели, основанные на физике, включают решение уравнений физики полупроводников, чтобы получить электрические характеристики GaN-HEMT. Однако эти модели не подходят для моделирования силовой электроники из-за сложного извлечения параметров и длительного времени вычислений.

Модели на основе частично физики основаны на поведенческих уравнениях и на физике полупроводников. Модели точны, быстры и применимы к разным устройствам одного класса, хотя некоторые из их эмпирических параметров лишены физического смысла.

Популярным подходом к моделированию является подгонка математических уравнений к экспериментальным данным без какой-либо информации о физическом механизме действия, что считается поведенческим моделированием. Основным преимуществом поведенческих моделей является их вычислительная эффективность. Однако при изменении условий эксплуатации точность поведенческих моделей становится достаточно низкой. Поскольку точная информация о внутренних параметрах, структуре устройства, геометрии устройства и свойствах материала не всегда известна. Проблемы с поведенческими моделями заключаются в том, что они не работают хорошо во всех условиях эксплуатации и не могут быть адаптированы к различным устройствам одного класса. Следовательно, для точности и скорости вычислений в современных условиях в основном используется частично физическая модель.

Среди многих инструментов и способов моделирования, которые используются для проектирования и оценки схем, SPICE модели наиболее широко используются. Другая причина популярности SPICE заключается в том, что почти все производители зарубежных изделий ЭКБ предоставляют бесплатные модели SPICE для своих изделий. Стандартные библиотеки САПР для SPICE моделей были разработаны в то время, когда основное внимание уделялось транзисторам с биполярным переходом

(BJT – Bipolar-Junction Transistors), полевым транзисторам с p-n переходом (JFET – Junction Field-Effect Transistors) и полевым транзисторам MOSFET. По этой причине САПР не включают в библиотеки модели для GaN-HEMT. Учитывая необходимость моделирования схем с GaN-HEMT, производители GaN, такие как GaNSystems, Efficient Power Conversion Corporation, Transform и т. д., предоставляют основанные на поведении модели SPICE в виде подсхем для своих GaN-HEMT. Кроме того, многие исследователи предложили модели GaN-HEMT, которые можно включить в библиотеки САПР. Однако эти модели SPICE не всегда ясны и прозрачны. Кроме того, большое количество подбираемых параметров затрудняет использование этих моделей. Некоторые из этих моделей создают проблемы сходимости, требуют больших вычислительных затрат и не могут быть легко адаптированы к другим GaN-HEMT. Остается метод использования модели Si, однако, исследования показали, что использование модели Si в качестве модели GaN-HEMT требует модификации путем введения частично физических параметров.

3 Моделирование на основе внутренней структуры стандартного GaN-HEMT изделия

Внутренняя структура стандартного GaN-HEMT показана на рисунке 1.

Для изготовления GaN-HEMT на кремниевой подложке, нитрид алюминия используется в качестве буферного слоя для обеспечения возможности эпитаксиального роста активного слоя GaN. Формирование двумерного электронного подслоя (2DEG) достигается за счет роста резистивного слоя с нитридом алюминия (AlGaN) поверх высокоомного слоя GaN. Переход от GaN к AlGaN создает поляризационный заряд, который притягивает подвижные электроны, образующие 2DEG. Чтобы сформировать нормально выключенный HEMT, электроны под затвором отталкиваются с помощью различных методов, таких как внедрение отрицательного заряда в слой AlGaN и использование материалов затвора с подходящей работой выхода. Учитывая, что

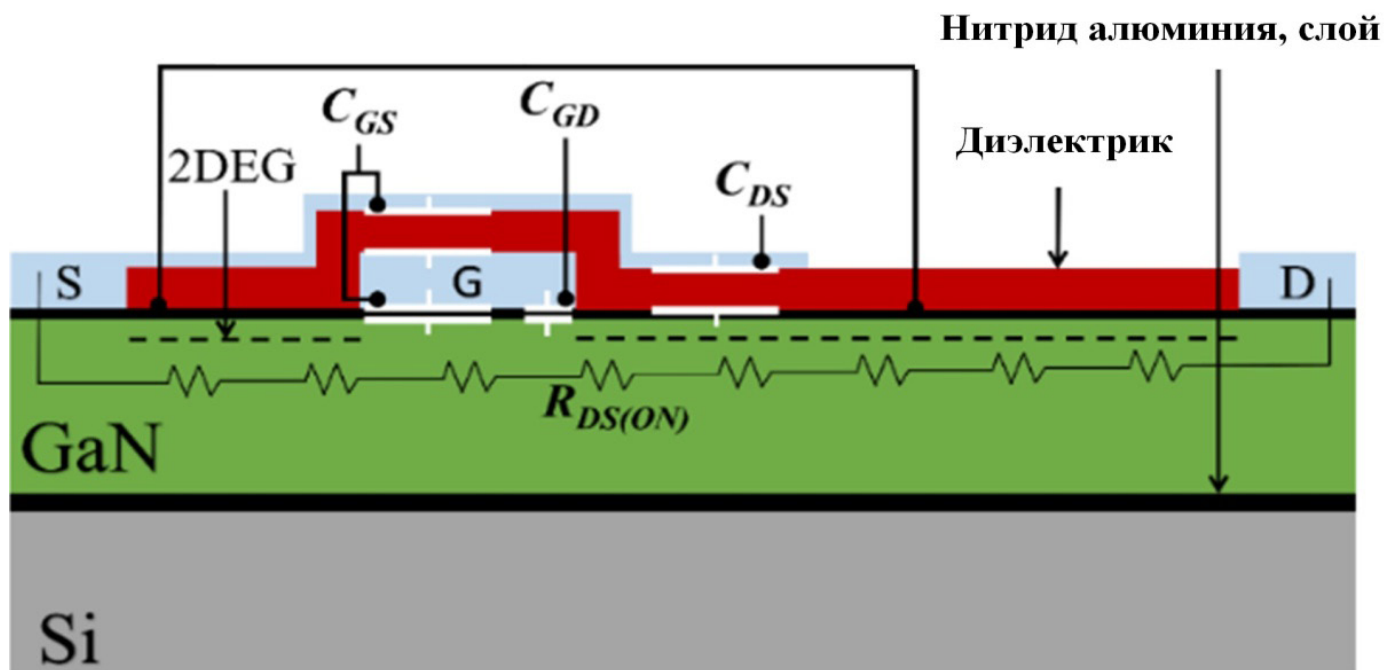


Рисунок 1 – Внутренняя структура стандартного GaN-HEMT

для восстановления 2DEG под затвором необходимо положительное напряжение, эта область HEMT аналогична нормально выключенному MOSFET. Области затвор-сток и затвор-исток отличаются от структуры MOSFET, однако они моделируются как фиксированные сопротивления стока и истока.

Коммутационная способность изделий зависит от их паразитных емкостей, которые представляют собой емкость затвор-исток (C_{GS}), емкость затвор-сток (C_{GD}) и емкость сток-исток (C_{DS}). Три паразитные емкости, показанные на рисунке 1, аналогичны паразитным емкостям в структуре MOSFET. Важным количественным отличием является то, что паразитные емкости в HEMT намного меньше, что позволяет работать на гораздо более высоких частотах переключения. Основное различие между GaN-HEMT и MOSFET заключается в отсутствии внутреннего диода в корпусе. Однако собственный диод в моделях MOSFET можно легко исключить, приняв нулевые значения его основных параметров. Следовательно, к GaN-HEMT применяют стандартные уравнения MOSFET.

Значения параметров уравнения могут быть получены путем нелинейной подгонки к экспериментальным данным. Однако сходимость нелинейной аппроксимации пол-

ностью зависит от их заданных начальных значений. Неправильный выбор начальных значений может привести к плохим результатам. Следовательно, в качестве первого шага применяется метод извлечения начальных значений выбранных ключевых параметров с последующей нелинейной подгонкой для корректировки значений всех параметров в уравнениях.

Длина и ширина канала (L и W) являются параметрами геометрического дизайна, характерными для моделируемого изделия. Эти значения не раскрываются производителями и их очень трудно определить. Однако для целей моделирования схемы устанавливают значение W и L равным 1 мкм, что делает отношение $W/L = 1$. Значения остальных параметров устанавливают с помощью нелинейной аппроксимации, используя их типовые значения или значения по умолчанию.

Для силовых изделий GaN-HEMT хорошим способом проверки динамических характеристик является проверка того, как разработанная модель ведет себя в условиях переключения. Например: производитель GaNSystems предоставляет собственные разработанные модели LTSpice для использования в целях моделирования. Кроме того, в GaNSystems разработаны полумостовой двухимпульсный тест (DPT

– Double-PulseTest) в LTSpice для оценки характеристик переключения разработанных ими моделей по сравнению с экспериментальными измерениями. Модель такого производителя хорошо согласуется с экспериментальными условиями переключения. Поскольку LTSpice использует те же основные библиотеки, что и любая другая САПР для SPICE, модель MOSFET может применяться в моделировании LTSpice с адекватно заданными значениями параметров. Стоит отметить, что еще два параметра, а именно сопротивление затвора (RG) и шунтовое сопротивление сток-исток (RDS) добавляются при преобразовании моделей SPICE в модели LTSpice, чтобы избежать проблемы сходимости в LTSpice. Добавление этих параметров не оказывает большого влияния на электрические характеристики моделируемого GaN-HEMT. Значение RG берется из таблицы данных на изделие. RDS теоретически бесконечен; следовательно, в моделях используются очень высокие значения 1 МОм.

Заключение

Современные тенденции развития SPICE моделей показывают, что стандартные уравнения MOSFET, доступные в симуляторе схем SPICE, можно использовать для моделирования GaN-HEMT. Обоснованность этого подхода, включая предлагаемые методы извлечения параметров, проверяется путем демонстрации адекватного соответствия между смоделированными и измеренными статическими и динамическими характеристиками. Кроме того, выполняются тесты для одного из GaN-HEMT и результаты сравниваются с данными производителя. Как правило, простая модель MOSFET дает адекватные результаты с точки зрения общих потерь энергии при переключении. Прозрачность модели MOSFET также помогает адаптироваться к GaN-HEMT. Показанные в статье результаты исследований подтверждают, что этот подход идеально позволяет проводить проектирование схем с GaN-HEMT и выполнять анализ их работы. Также необходима дальнейшая проработка улучшения моделирования емкостей, зависящих от напряжения,

для получения величин потерь энергии при переключении как можно ближе к условиям эксплуатации автомобильной техники.

Библиография

- [1] Mantooth, H.A. & Peng, Kang & Santi, Enrico & Hudgins, Jerry. Modeling of Wide-Bandgap Power Semiconductor Devices.
- [2] B. W. Nelson et al., Computational Efficiency Analysis of SiC MOSFET Models in SPICE: Static Behavior.
- [3] A. Endruschat, C. Novak, H. Gerstner, T. Heckel, C. Joffe and M. März, A Universal SPICE Field-Effect Transistor Model Applied on SiC and GaN Transistors.
- [4] H. L. Yeo and K. J. Tseng, Modelling technique utilizing modified sigmoid functions for describing power transistor device capacitances applied on GaN HEMT and silicon MOSFET,
- [5] M. Turzynski and W. J. Kulesza, A Simplified Behavioral MOSFET Model Based on Parameters Extraction for Circuit Simulations. H. Li, X. Zhao, K. Sun, Z. Zhao, G. Cao and T. Q. Zheng, «A Non-Segmented PSpice Model of SiCmosfet With Temperature-Dependent Parameters,» in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 5, pp. 4603-4612, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2865611
- [6] H. Li, X. Zhao, K. Sun, Z. Zhao, G. Cao and T. Q. Zheng, A Non-Segmented PSpice Model of SiCmosfet With Temperature-Dependent Parameters. K. Sun, H. Wu, J. Lu, Y. Xing and L. Huang, «Improved Modeling of Medium Voltage SiC MOSFET Within Wide Temperature Range,» in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2229-2237, May 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2273459.
- [7] K. Sun, H. Wu, J. Lu, Y. Xing and L. Huang, Improved Modeling of Medium Voltage SiC MOSFET Within Wide Temperature Range.