УДК 621.382

**А.С. Сальников, А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман**

# Разработка библиотеки элементов для проектирования отечественных гетероструктурных СВЧ МИС в среде Microwave Office

Рассматривается разработка в среде Microwave Office библиотеки элементов для отечественной 0,15 мкм pHEMT/mHEMT GaAs-технологии изготовления СВЧ МИС. Описываются заложенные в библиотеку возможности по автоматизации построения топологии и моделированию схем, в том числе проведение полного ЭМ-анализа, а также ряд дополнительных возможностей.

**Ключевые слова**: СВЧ, монолитные интегральные схемы, библиотека элементов, моделирование, проектирование.

**Введение.** Применение СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) в современных радиоэлектронных системах позволяет достичь высоких качественных показателей. Для организации опытного и промышленного производства СВЧ МИС требуется решить комплекс вопросов из областей технологии, измерения параметров, моделирования, проектирования. В частности, одной из важнейших проблем является создание библиотек элементов (англ. PDK – Process Design Kit), встраиваемых в САПР и позволяющих учесть особенности конкретной технологии изготовления МИС. Преимущества использования библиотек элементов при проектировании МИС СВЧ: улучшается точность моделирования; повышается удобство проектирования топологии; сокращается длительность цикла проектирования. Кроме этого, библиотеки элементов позволяют организовать одновременную работу производителя СВЧ МИС с несколькими заказчиками.

В настоящей работе рассматривается построение в среде Microwave Office (MWO) библиотеки элементов для отечественной гетероструктурной pHEMT/mHEMT GaAs-технологии изготовления СВЧ МИС, созданной в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва). Библиотека разработана в НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа. Описываются заложенные в библиотеку возможности по автоматизации построения топологии и моделированию схем.

**Разработка и возможности библиотеки элементов СВЧ МИС.** Библиотека представляет собой набор библиотечных элементов, каждый из которых включает ряд связанных между собой описаний определенного элемента (компонента) МИС – электрическую модель, топологию, трехмерное представление для ЭМ-анализа, справочную информацию и дополнительные параметры (рис. 1). При этом изменение параметров элемента МИС одновременно сказывается на его модели и топологии.

Разработка библиотек элементов для САПР MWO выполняется с помощью специальных средств, предоставляемых компанией AWR лицензионным пользователям: комплекта разработки программного обеспечения Software Development Kit (SDK) и мастера моделей (Model Wizard). Указанные средства позволяют получать гибкие модели и топологии элементов произвольной сложности посредством программирования элементов библиотеки.

После создания библиотеки для конкретной технологии изготовления СВЧ МИС её можно легко подключить к САПР и использовать для проектирования СВЧ-устройств, выполняемых по этой технологии.

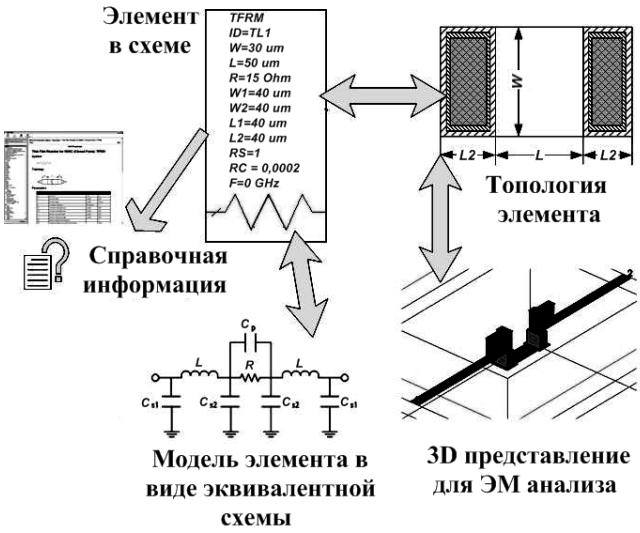


Рис. 1. Элемент в библиотеке

Рассмотрим более подробно возможности, которые могут обеспечиваться встроенными в САПР MWO библиотеками элементов, разрабатываемыми с помощью программных средств SDK и Model Wizard [1–3].

**Построение табличных нелинейных моделей.** Использование SDK позволяет получать табличные нелинейные модели СВЧ-транзисторов, в которых используется аппроксимация зависимостей элементов от напряжений с помощью полиномов или сплайнов [3]. По сравнению со стандартными моделями в виде эквивалентных схем такие модели являются более универсальными, гибкими и точнее предсказывают поведение нелинейного элемента.

**Гибкие топологические ячейки.** В библиотеку элементов можно добавить топологические ячейки для каждого элемента [1–3]. Ячейки могут быть как фиксированными (например, топологии транзисторов), так и изменяемыми (например, резистор с переменной длиной и шириной). Ячейки имеют выводы, также называемые портами, с помощью которых производится соединение элементов друг с другом. Данная возможность позволяет автоматизировать процесс построения топологии всей схемы на основе топологии отдельных её элементов.

**Проведение полного электромагнитного анализа.** При моделировании СВЧ-устройства, представленного в виде соединения отдельных библиотечных элементов, не учитывается взаимное влияние элементов друг на друга. Поэтому для более точного моделирования, как правило, приходится проводить полный электромагнитный (ЭМ) анализ устройства. Полный трехмерный анализ проводится на основе решения уравнений Максвелла для 3D-структуры. САПР Microwave Office имеет встроенные средства проведения полного ЭМ-анализа, а также средства для экспорта топологии разрабатываемого устройства в 3D-структуру для анализа. Однако все требуемые электрофизические параметры материалов, а также толщина и взаимное расположение слоёв должны быть заданы.

С целью автоматизации подготовки информации для ЭМ-моделирования утилиты САПР MWO, обеспечивающие генерацию топологии МИС на основе представления в виде соединения библиотечных элементов, а также экспорт в программу ЭМ-анализа (AXIEM, EM Sight и др.) могут быть сконфигурированы под заданный технологический процесс. Для управления настройками экспорта топологии и моделирования в библиотеку включаются элементы управления среды MWO – EXTRACT и STACKUP, учитывающие особенности конкретной технологии. Это позволяет освободить разработчика от необходимости настройки экспорта топологии вручную и обязательного знания электрофизических параметров. Далее топология переводится в 3D-структуру для ЭМ-анализа. Данная возможность имеет обратную связь – при изменении топологии устройства будет произведено перемоделирование с учетом сделанных изменений. Использование такого инструмента разрешает выполнить оптимизацию топологии МИС посредством ЭМ-анализа.

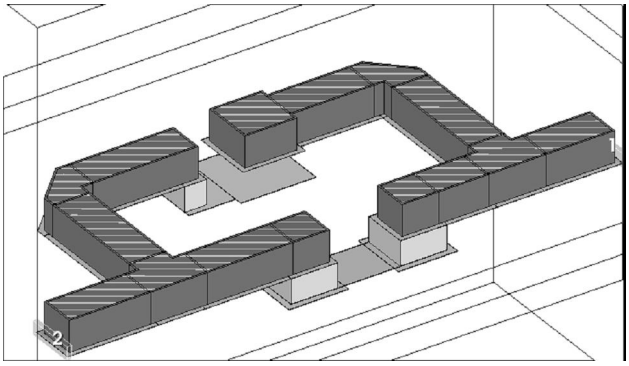

Рис. 2. Тестовая структура для 3D электромагнитного анализа

Пример тестовой трехмерной структуры для анализа, полученной из принципиальной схемы и топологии, а именно, параллельной RC-цепи в копланарном исполнении, представлен на рис. 2. На рис. 3 представлены результаты моделирования и измерений частотных зависимостей модуля и фазы параметров $S_{11}$ и $S_{21}$ указанного тестового элемента. Расчет характеристик цепи выполнялся с использованием моделей отдельных библиотечных элементов, реализованных в MWO, а также полного ЭМ-анализа. Как видно из рисунка, результаты ЭМ-анализа ближе к измерениям.

**Проверка правильности топологии.** Данная возможность библиотеки позволяет проводить проверку топологии по некоторым формализуемым требованиям, например минимальная ширина линии или наличие замкнутых контуров. Это дает возможность избежать ошибок, допущенных при проектировании топологии схемы. Требования берутся из технологических ограничений и топологических норм.

**Формирование топологии копланарных схем.** Определенные трудности в системе MWO вызывает формирование топологии копланарных схем. Для упрощения этой задачи целесообразно, помимо обычного (нормального) слоя, использовать также положительные и отрицательные слои (отрицательные слои вводятся для выполнения операции вы-

читания множеств) [4]. При этом положительный слой покрывает всю площадь кристалла, нормальный слой соответствует сигнальной линии или элементу копланарной схемы, а отрицательный слой – удалению металла между земляной и сигнальной линиями. После завершения работы над топологией при её экспорте производятся логические операции со слоями: вначале находится разность множеств (топологий), описываемых положительным и отрицательным слоями, а затем результат объединяется с нормальным слоем.

**Нестандартные графические обозначения** элементов могут быть полезны при введении новых элементов, например составных элементов.

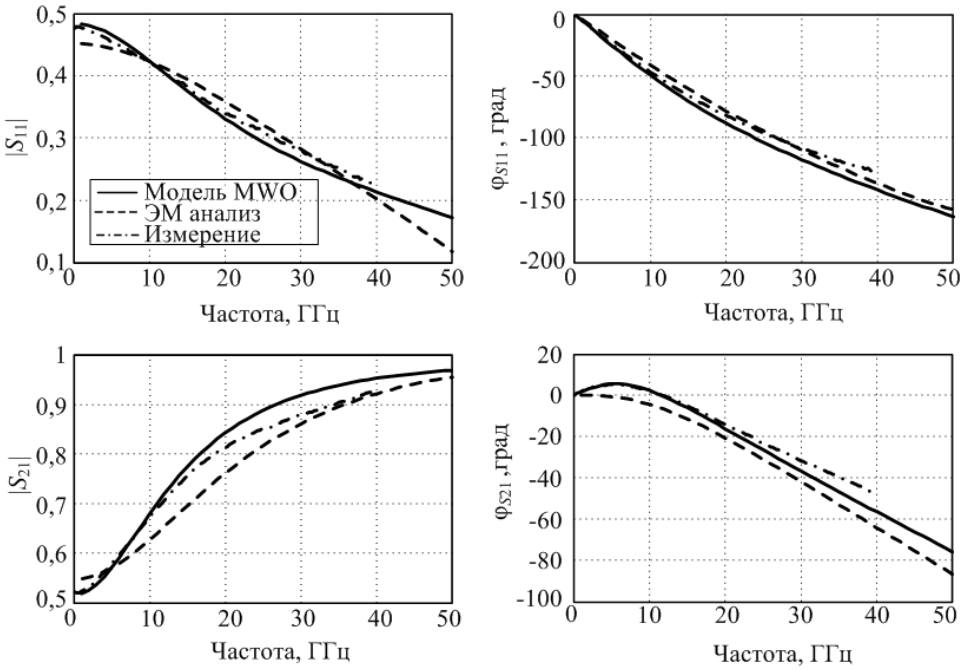


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования и измерений для RC-цепи в копланарном исполнении

**Встроенная справка по библиотеке** содержит информацию по моделям элементов, особенностям топологии и позволяет проектировщику разрешать вопросы, возникающие при использовании библиотеки. Справка подключается к каждому элементу для описания его индивидуальных особенностей.

Все описанные выше возможности были реализованы в разработанной библиотеке элементов для отечественной опытной 0,15 мкм pHEMT/mHEMT GaAs-технологии ИСВЧ-ПЭ РАН. Краткий перечень элементов приведен в таблице. Описание и верификация используемых в библиотеке электрических моделей элементов СВЧ МИС представлены в [4, 5].

**Краткий перечень элементов библиотеки**

| Группа элементов | Описание | Количество элементов в группе |
|---|---|---|
| CoplanarElements | Элементы копланарных схем | 10 |
| Interconnects | Межсоединения (отверстия, площадки) | 5 |
| Lumped Elements | Сосредоточенные элементы | 3 |
| Microstrips | Отрезки микрополосковых линий | 5 |
| Substrate | Вспомогательные элементы | 6 |
| Transistors | Линейные модели HEMT<br>Нелинейная модель HEMT | 10<br>1 |

**Заключение**. Была выполнена работа по созданию в среде Microwave Office первой в России библиотеки элементов для гетероструктурной технологии изготовления СВЧ МИС. Библиотека элементов имеет все возможности для проектирования МИС в частотном диапазоне до 40 ГГц. Появление отечественных гетероструктурных технологий изготовления МИС и библиотек элементов для них должно ускорить создание в стране современных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем.

Работа выполнялась в рамках проектов 08-07-99034-р_офи, 09-07-99020-р_офи при поддержке РФФИ и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Нанотехнологии и наноматериалы» (государственный контракт П1418), «Создание электронной компонентной базы» (П1492, П2188), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

*Литература*

1. Сальников А.С. Разработка библиотек элементов в среде Microwave Office для отечественных технологий изготовления СВЧ МИС / А.С. Сальников, А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман // Сб. трудов 12-й конф. молодых учёных и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск: Изд-во СФУ, 2010. – С. 335–338.

2. Шеерман Ф.И. Создание библиотек моделей элементов СВЧ монолитных интегральных схем для системы Microwave Office / Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак // Сб. трудов 19-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо`2009). – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1. – С. 107–108.

3. Дмитриенко К.С. Построение нелинейной модели pHEMT-транзистора / К.С. Дмитриенко, Л.И. Бабак // Сб. трудов 19-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо`2009).–Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1. – С. 119–120.

4. Applied Wave Research, Inc. Microwave Office/Analog Office User Guide. Version 7.5, July. – 2007. – 354 p.

5. Добуш И.М. Моделирование и экспериментальное исследование копланарных элементов для проектирования СВЧ монолитных интегральных схем / И.М. Добуш, А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Сб. трудов 20-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо`2010). – Севастополь: Вебер, 2010. – Т. 1. – С. 208–209.

6. Коколов А.А. Методика и оценка точности экстракции малосигнальной модели mHEMT-транзистора / А.А. Коколов, А.А. Савин, Л.И. Бабак // Сб. трудов 20-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо`2010). – Севастополь: Вебер, 2010. – Т. 1. – С. 210–211.

---

**Сальников Андрей Сергеевич**
Мл. науч. сотрудник каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Тел.: +7-913-866-44-65
Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

**Коколов Андрей Александрович**
Мл. науч. сорудник каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7-923-405-93-59
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

**Шеерман Федор Иванович**
Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7-913-805-94-54
Эл. почта: sfi1493@ms.tusur.ru

Salnikov A.S., Kokolov A.A., Sheyerman F.I.

**Microwave Office PDK development for designing MMICs based on domestic HEMT technology**

The development of PDK in Microwave Office environment for Russian pilot 0,15 μm pHEMT/mHEMT process is described. PDK abilities for layout design automation, MMIC modeling including full 3D electromagnetic simulation, and some auxiliary abilities are presented.
**Keywords:** microwave monolithic integrated circuit (MMIC), PDK, modeling, design.