

# Разработка моделей для проектирования усилителей мощности в NI AWR Design Environment

Валерия Брюнель, Эрик Леклерк (UMS),  
Дэвид Вай (AWR Group, National Instruments)

Современные системы автоматизированного проектирования предлагают широкие возможности для создания и верификации моделей активных компонентов. В статье описывается процесс создания таких библиотек с учётом особенностей техпроцесса GH25 в САПР NI AWR Design Environment.

Прогрессивные полупроводниковые технологии играют важную роль в высокочастотных системах связи новых поколений, основной тенденцией развития которых является переход в область волн миллиметрового диапазона. Поддержка процессов проектирования и доступность моделей, соответствующих этим полупроводниковым технологиям – ключевой фактор успешной разработки устройств и компонентов. В свою очередь, системы автоматизированного проектирования должны тесно сотрудничать с ведущими производителями для обеспечения высокой интеграции программного обеспечения и особенностей техпроцессов, а также способствовать сокращению временных и материальных затрат на разработку устройств.

Ниже описывается процесс создания, верификации и применения моделей активных устройств на основе широкозонных соединений АЗВ5 производства United Monolithic Semiconductors (UMS), а именно – техпроцесса GH25 (GaN на карбиде кремния, длина затвора 0,25 мкм), предназначенного для

создания усилителей мощности миллиметрового диапазона в современных системах связи и радиолокации. Точность создаваемых моделей проверяется путём симуляций и измерений тестового проекта, разработанного при помощи специализированной библиотеки GH25 в составе NI AWR Design Environment.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НИТРИДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Короткозатворные транзисторы из нитрида галлия уже зарекомендовали себя как перспективные устройства для усилителей мощности миллиметрового диапазона волн. Благодаря более высоким рабочим напряжениям и меньшим паразитным компонентам, нитридные транзисторы обеспечивают более высокие рабочие мощности, более широкую полосу и больший коэффициент преобразования по сравнению с их аналогами из арсенида галлия. Для того чтобы получить возможность использовать перечисленные преимущества, разработчикам необходимы масштабируемые модели для схемотехническо-

го анализа, максимально точно соответствующие реальному поведению устройства.

Существует три основных типа моделей активных устройств для использования в симуляции: физические, поведенческие и компактные. Физические модели учитывают физику работы устройства для описания его характеристик, но слишком сложны для применения в моделировании. Поведенческие модели обычно используются в системном моделировании для расчёта параметров системы в целом, рассматривая её как некий «чёрный ящик», но они недостаточно точны и подробны для учёта многих важных особенностей усилителей.

Компактные модели можно назвать компромиссным методом, поскольку они используют подстройку математических функций и значений параметров для наиболее точного повторения измеренных характеристик реального устройства, таких как ВАХ в импульсном режиме или параметры рассеяния (S-параметры). Разумеется, очень важно, чтобы модель повторяла отклик транзистора во всём рабочем диапазоне с достаточной точностью, чтобы обеспечить надёжное представление устройства во время симуляции. Математические параметры модели являются эмпирическими, однако в них должны быть учтены базовые физические закономерности для того, чтобы сделать возможной качественную экстраполяцию данных при выходе за установленные рабочие рамки модели.

Подстройка параметров компактной модели в соответствии с результатами измерений позволяет создавать целые библиотеки, которые в дальнейшем используются в таких САПР, как NI AWR Design Environment для моделирования сложных монолитных интегральных схем, в состав которых входят рассматриваемые устройства, а также соответствующие схемы питания и согласования в условиях возбуждения высокочастотными сигналами. Библиотеки также включают в себя информацию об электрических, физических и топологических характеристиках, обе-

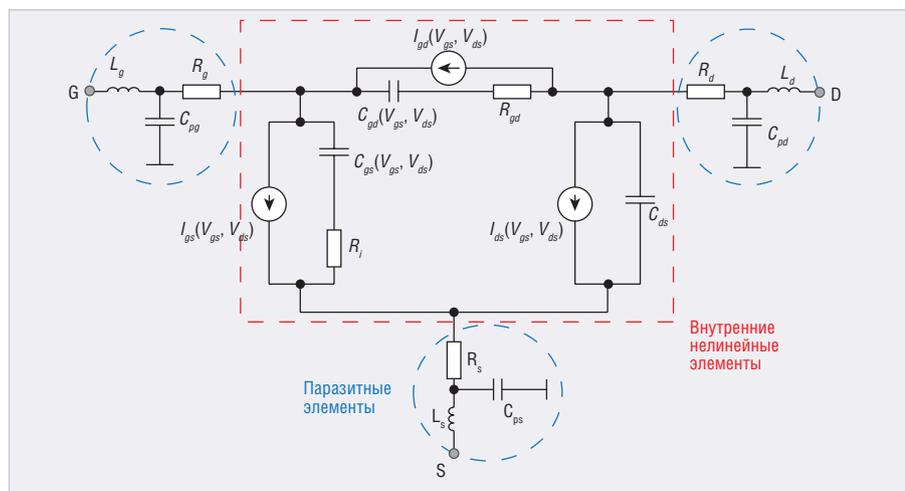


Рис. 1. Эквивалентная схема транзистора с внешними паразитными элементами

спешивая разработчика полным набором инструментов для проектирования монолитных интегральных схем (МИС) на основе GaN или GaAs.

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕХПРОЦЕССА (PDK)

Правильное описание активного устройства для построения масштабируемой модели транзистора – самый важный этап создания библиотеки. Масштабируемая модель позволяет разработчику варьировать периферию (ширину и число выводов затвора) для получения нужных характеристик. Поэтому разработка модели должна учитывать диапазон возможных состояний периферии и рабочих точек транзистора.

В статье рассматривается процедура моделирования, основанная на получении параметров устройства из измерений, экстракции моделей через эмпирическую подстройку и верификацию при помощи схемотехнического моделирования. На основе таких моделей строятся библиотеки, включающие также модификации устройств для различных применений, включая маломощные усилители, усилители высокой мощности и переключатели.

### ЭКСТРАКЦИЯ МОДЕЛЕЙ

Стандартная эквивалентная схема компактной модели транзистора представлена на рисунке 1 и включает в себя внешние линейные и внутренние нелинейные элементы. Внешние паразитные элементы транзистора ( $R$ ,  $L$  и  $C$ ) необходимы для вычета из S-параметров при переходе к внутренней опорной плоскости транзистора и для экстракции внутренних компонентов ( $C_{зи}$ ,  $C_{зс}$ ,  $g_m$ ,  $g_3$ ,  $C_{си}$ ,  $R_3$ ,  $R_{зс}$ ) при помощи уравнений в явном виде. Точная экстракция паразитных элементов основана на результатах измерений S-параметров полевого транзистора в холодном режиме ( $V_{си} = 0$ ) и электромагнитном анализе гребёнок транзистора.

Следующим шагом является определение значений параметров внутренних элементов. В случае нитридных устройств основными источниками нелинейности являются источник тока сток-исток и ёмкости затвор-исток и затвор-сток, а также входной диод Шоттки.

Помимо этого, транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) подвержены влиянию ловушек – состояний в полупроводниках типа GaN, ограничивающих дырочную

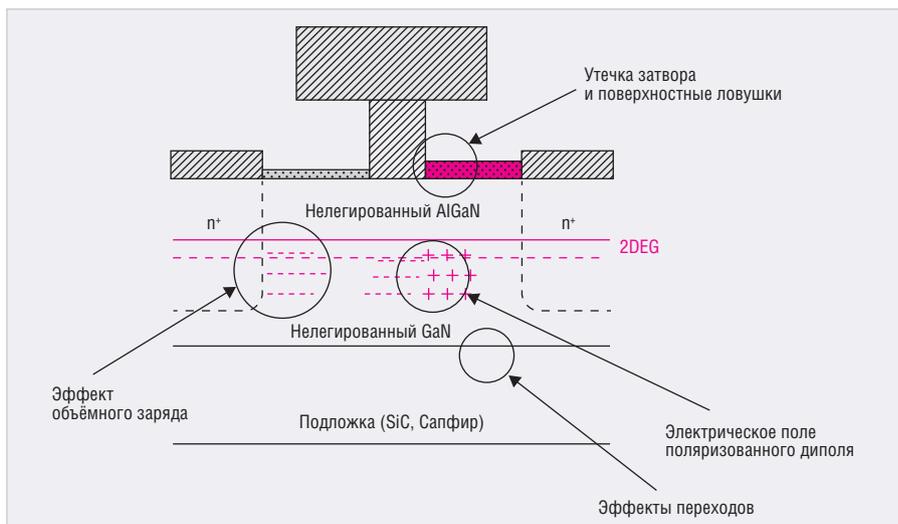


Рис. 2. Положения ловушечных центров в широкозонных полупроводниках на примере GaN-HEMT

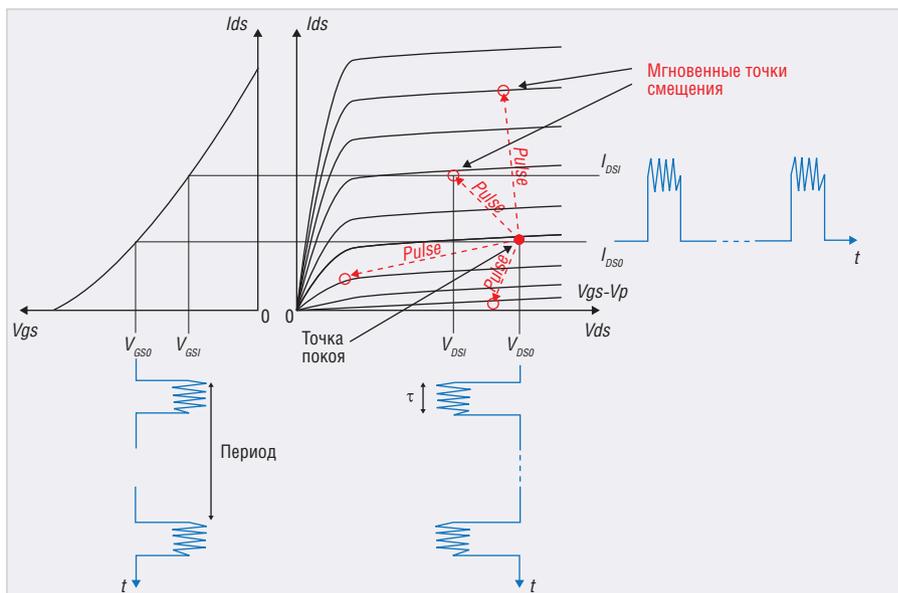


Рис. 3. Импульсный метод измерений

проводимость за счёт неоднородностей кристаллической решётки и оборванных связей на поверхности полупроводника или на переходах между слоями (см. рис. 2) [1]. Эти ловушечные центры формируют паразитные области объёмного заряда, влияющие на плотность двумерного электронного газа [2].

В AlGaN/GaN-транзисторах существует множество различных явлений, связанных с наличием ловушечных состояний. В частности, эффект запаздывания тока, который зависит от напряжения смещения стока и температуры канала. Для его учёта применяют квази-изотермические ВАХ и S-параметры в импульсном режиме. Методика заключается в измерении S-параметров во время действия коротких импульсов с высокой скважностью,

позволяющих не допускать значительного нагрева. Благодаря этому мгновенные значения смещений затвора и стока перемещаются из точки покоя таким образом, чтобы точнее описывать рабочие характеристики транзистора без изменения заданных начальной рабочей точкой температурных и ловушечных параметров (см. рис. 3). Полученные таким образом данные используются для формирования компактной модели на основе разработанных уравнений, позволяющих с высокой точностью рассчитывать производные тока стока и паразитных зарядовых ёмкостей в широком диапазоне напряжений стока и затвора.

### ПРОВЕРКА МОДЕЛИ

Созданная компактная модель верифицируется путём сравнения резуль-

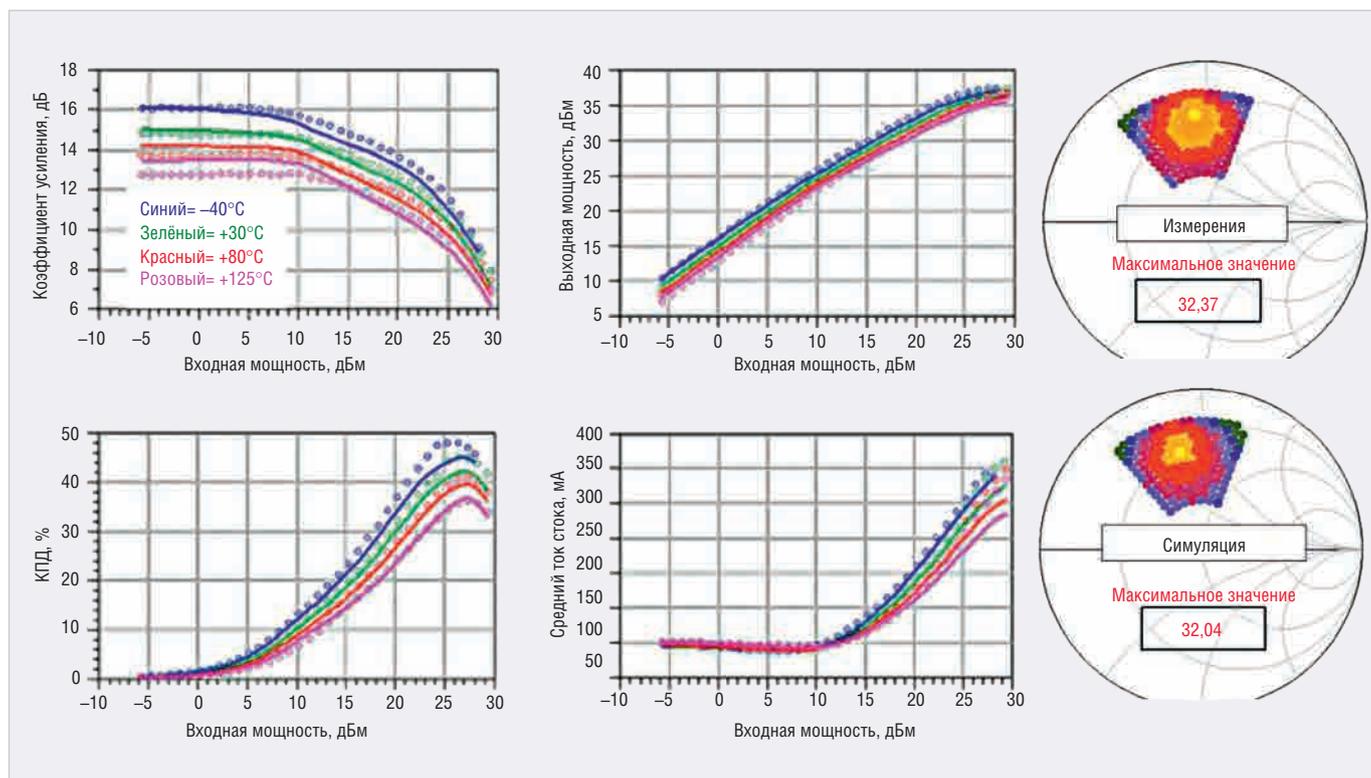


Рис. 4. Проверка модели гетероструктурного полевого транзистора GH25-10 на частоте 10 ГГц

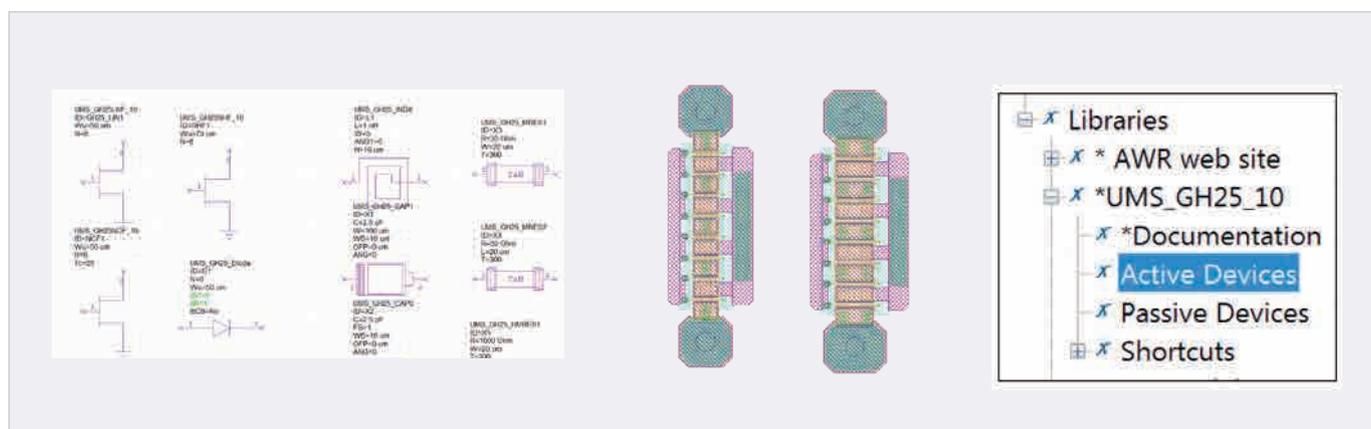


Рис. 5. Различные компоненты библиотеки UMS GH25 в NI AWR Design Environment

татов моделирования с результатами измерений для нескольких рабочих точек и конфигураций затвора (от 2×30 мкм до 10×300 мкм для технологии 0,25 мкм).

Для проверки способности модели предсказывать характеристики транзистора при разных значениях импеданса нагрузки были проведены load-pull измерения. Для каждой конфигурации транзистора были проведены измерения при разных напряжениях смещения, уровнях входной мощности и частотах сигнала. Результаты load-pull измерений можно легко сравнить с результатами симуляции в Microwave Office благодаря развитой поддержке load-pull моделирования.

На рисунке 4 представлены результаты сравнения измерений и моделиро-

вания таких параметров, как коэффициент усиления, выходная мощность, КПД и ток стока на частоте 10 ГГц. Как видно из графиков, результаты измерений отлично совпадают с данными моделирования для четырёх значений температуры в диапазоне от -40 до +125°C. Положения оптимальных значений коэффициента отражения на диаграмме Смита также совпали с высокой точностью, что видно на контурах выходной мощности в правой части рисунка 4.

**ПРИМЕНЕНИЕ БИБЛИОТЕК ТЕХПРОЦЕССОВ**

Модели активных устройств и пассивных компонентов вместе с их параметризованными топологически-

ми ячейками (PCells) собираются в библиотеки для поддержки разработки МИС по соответствующим техпроцессам. Библиотеки для Microwave Office предоставляются непосредственно UMS и включают в себя подробный файл описания топологических правил (LPF), задающий параметры слоёв и материалов для ЭМ-анализа. Разработчикам доступна подстройка параметров моделей активных и пассивных компонентов, включая ширину затвора, количество выводов и значения ёмкостей и индуктивностей. Помимо топологических чертежей модели снабжены специальными схемными символами. На рисунке 5 показаны компоненты библиотеки техпроцесса GH25 на схеме Microwave Office.

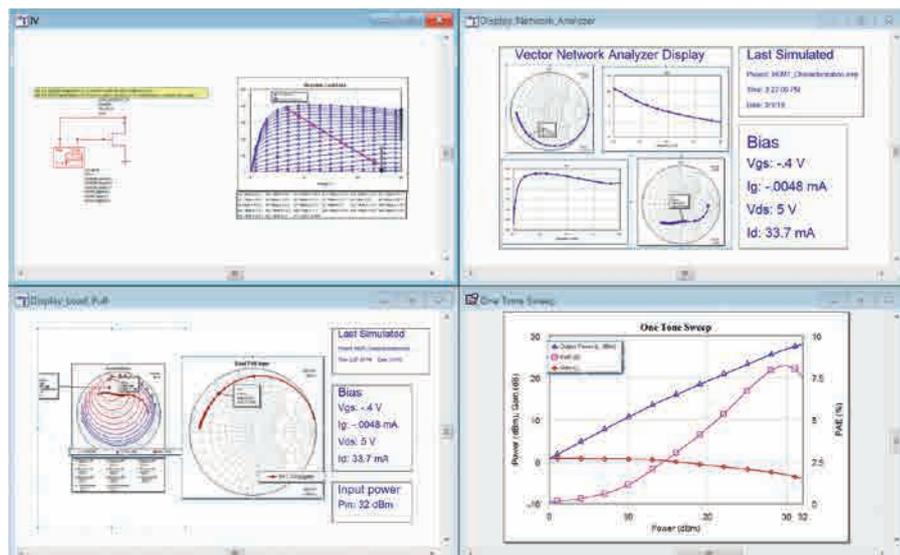
Аналогичные библиотеки будут созданы для техпроцессов GH15 и GH10, как только будут верифицированы соответствующие модели.

Среди встроенных примеров в Microwave Office есть подробная предустановленная тестовая схема для тестирования транзисторов, которую можно использовать для анализа базовых параметров модели транзистора перед тем, как приступить к работе над проектом. Для этого необходимо лишь заменить модель по умолчанию на требуемую нелинейную модель транзистора и запустить симуляцию. После добавления библиотеки UMS в топологическом редакторе будет открыт соответствующий файл LPF, а модели появятся в библиотеке элементов для размещения в схемах Microwave Office. Тестовый проект «FET\_Characterization» включает в себя заранее настроенные измерения ВАХ, S-параметров, а также одно- и двухсигнальные измерения нелинейных характеристик с развёрткой по мощности, в числе которых – усиление, выходная мощность, КПД и контуры load-pull (см. рис. 6).

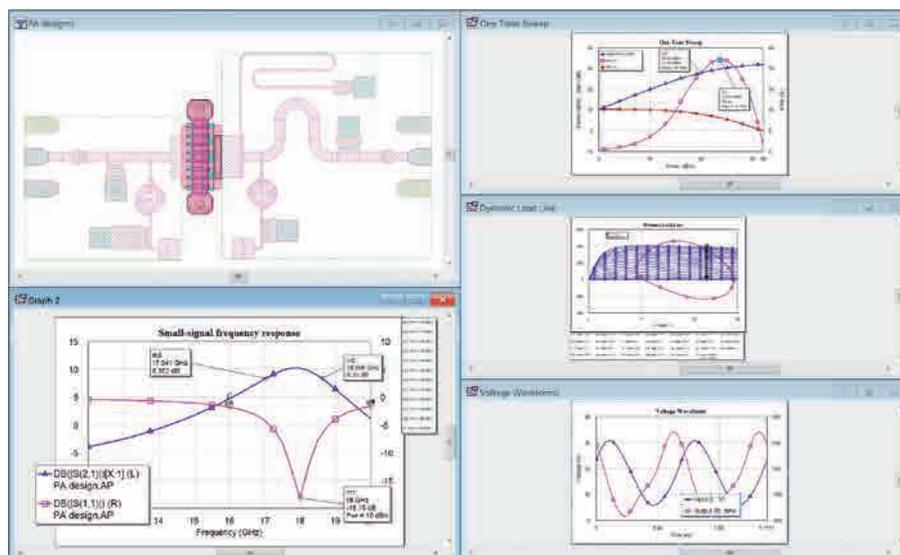
Библиотеки различных техпроцессов позволяют разработчикам применять любые комбинации методик линейного и нелинейного анализа, включая load-pull. Появившийся в последней версии Microwave Office инновационный модуль синтеза цепей согласования поддерживает разработку цепей питания и согласования на основе S-параметров и данных load-pull для непосредственного достижения оптимальных характеристик по мощности, линейности и/или эффективности. Данные возможности были протестированы для определения оптимальных импедансов источника и нагрузки для нитридного транзистора (8×75 мкм) на частоте 18 ГГц (см. рис. 7). На второй гармонике (36 ГГц) на выходе транзистора в качестве нагрузки была размещена параллельная ёмкость для повышения пикового КПД до 36%.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Технологии GaN на SiC обретают всё большую популярность как перспективные материалы миллиметрового диапазона длин волн для применения в составе систем нового поколения. Успех проектов на основе этих технологий напрямую зависит от наличия качественных и точных нелинейных моделей активных



**Рис. 6. Результаты моделирования транзистора (0,25 мкм, GaN, 8×75 мкм) в рамках предустановленной тестовой схемы Microwave Office**



**Рис. 7. Результаты моделирования усилителя мощности на 18 ГГц на основе нитридного транзистора (8×75 мкм) по техпроцессу 0,25 мкм**

устройств, основанных на измерениях и учитывающих различные сложные явления, такие как ловушечные состояния в нитридных гетероструктурах.

Построение компактной модели, обеспечивающей разработчика полной информацией о характеристиках используемых транзисторов, значительно упрощается благодаря применению продвинутых программных инструментов компании AWR. Поддержка построения библиотек техпроцесса, возможность проведения load-pull моделирования и сравнения с результатами измерений, глубокая интеграция библиотек в процесс проектирования и мощные методы анализа позволяют существенно упростить и ускорить разработку монолитных

интегральных схем. Помимо описанной в данной статье библиотеки техпроцесса 0,25 мкм и уже существующих библиотек, UMS планирует представить новые PDK для Microwave Office, в том числе и для нитридного техпроцесса 0,1 мкм в ближайшем будущем.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Benvegnù A.* «Trapping and Reliability Investigations in GaN-based HEMTs Electronics» Université de Limoges. 2016.
2. *Nsele S.D., Escotte L., Tartarin J.G., Piotrowicz S. and Delage S.L.* «Broadband Frequency Dispersion Small-Signal Modeling of the Output Conductance and Transconductance in AlInN/GaN HEMTs» IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 60, No. 4, April 2013, pp. 1372–1378.