

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-

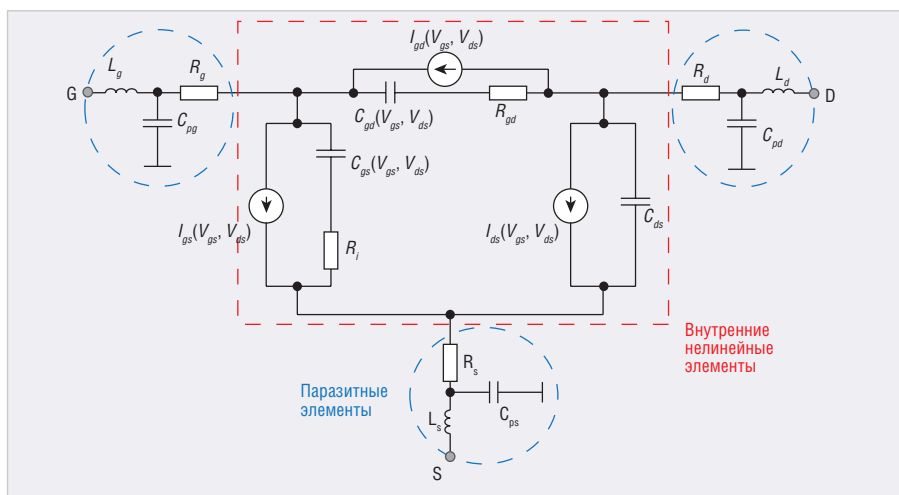


Рис. 1. Эквивалентная схема транзистора с внешними паразитными элементами

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

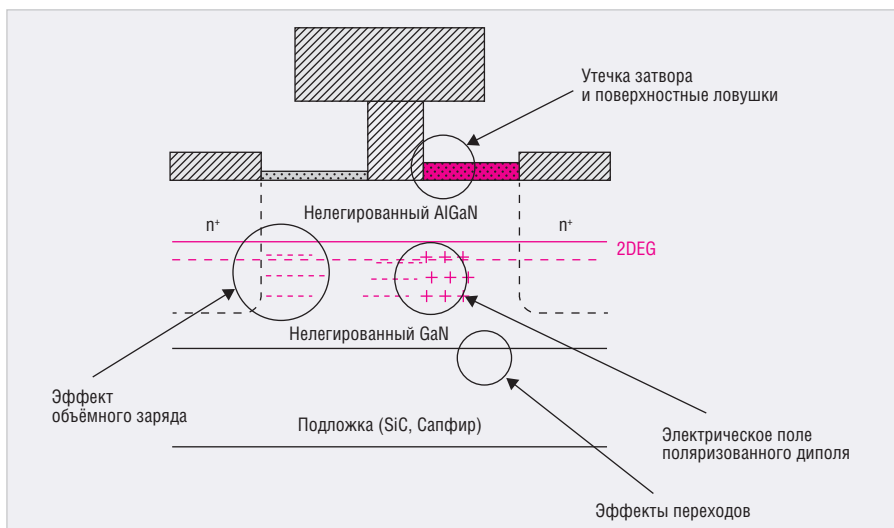


Рис. 2. Положения ловушечных центров в широкозонных полупроводниках на примере GaN-HEMT

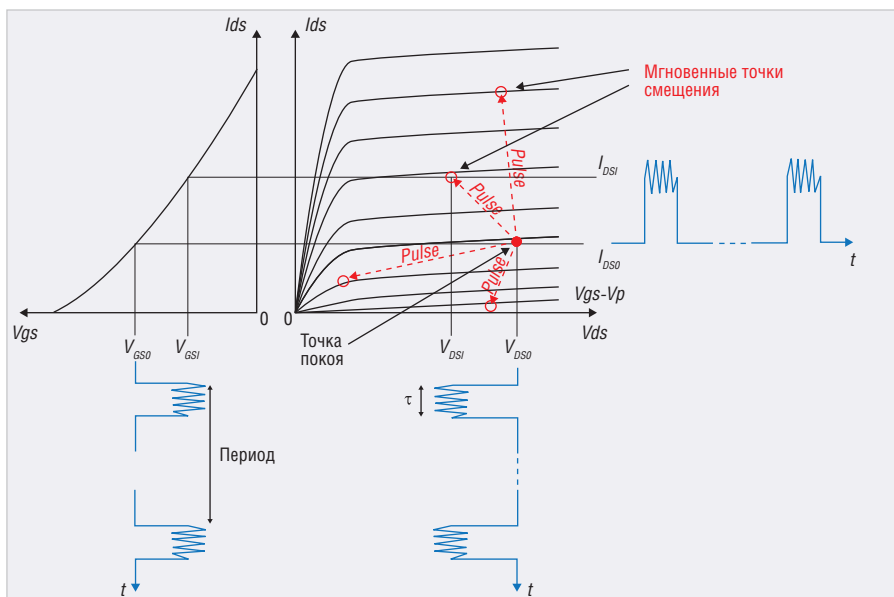


Рис. 3. Импульсный метод измерений

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-

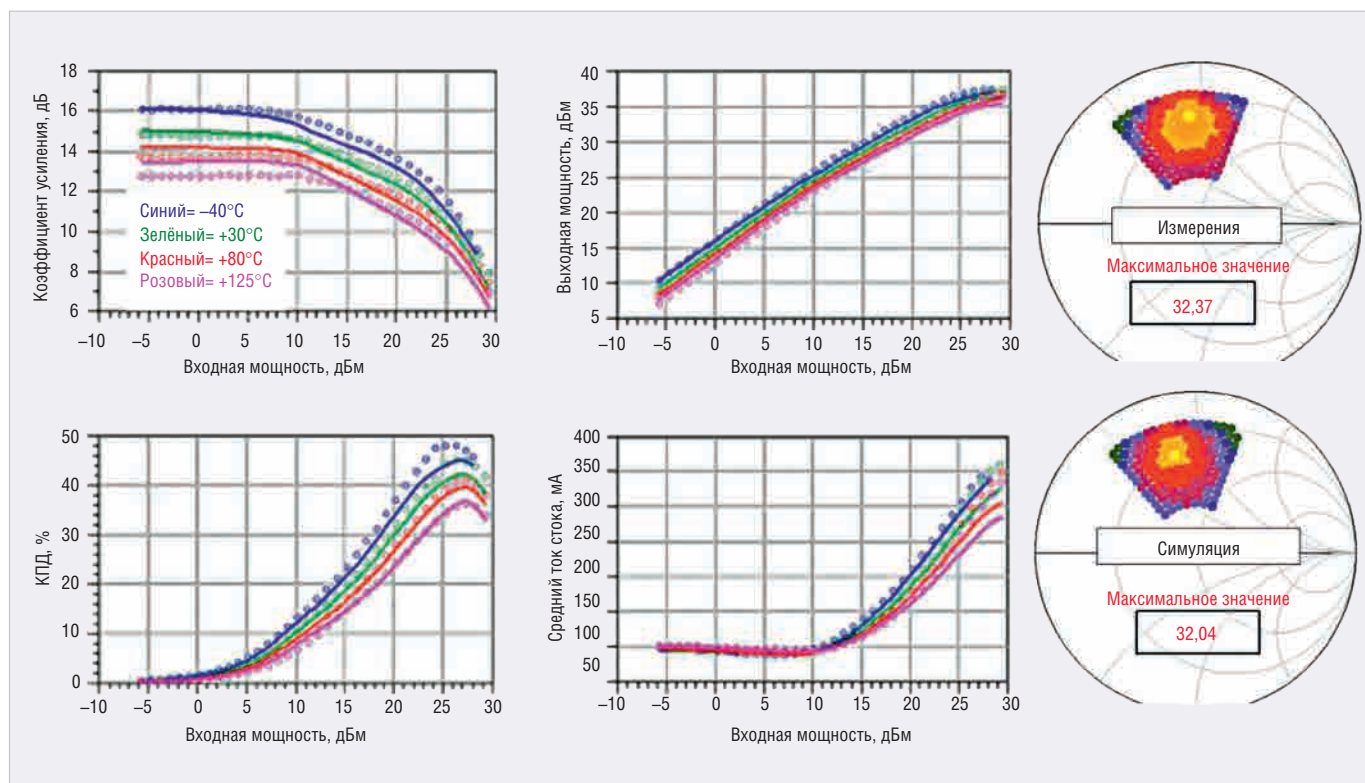


Рис. 4. Проверка модели гетероструктурного полевого транзистора GH25-10 на частоте 10 ГГц

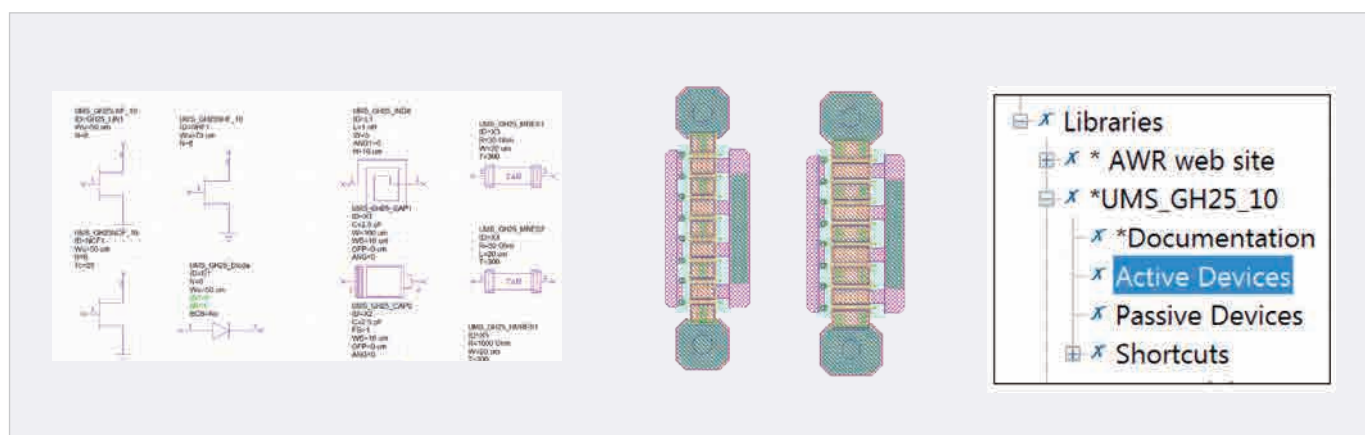


Рис. 5. Различные компоненты библиотеки UMS GH25 в NI AWR Design Environment

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

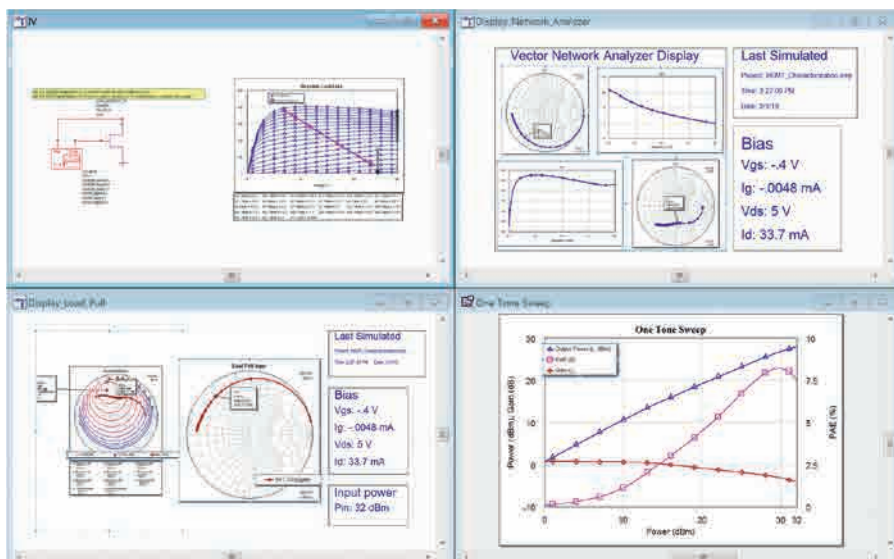


Рис. 6. Результаты моделирования транзистора (0,25 мкм, GaN, 8×75 мкм) в рамках предустановленной тестовой схемы Microwave Office

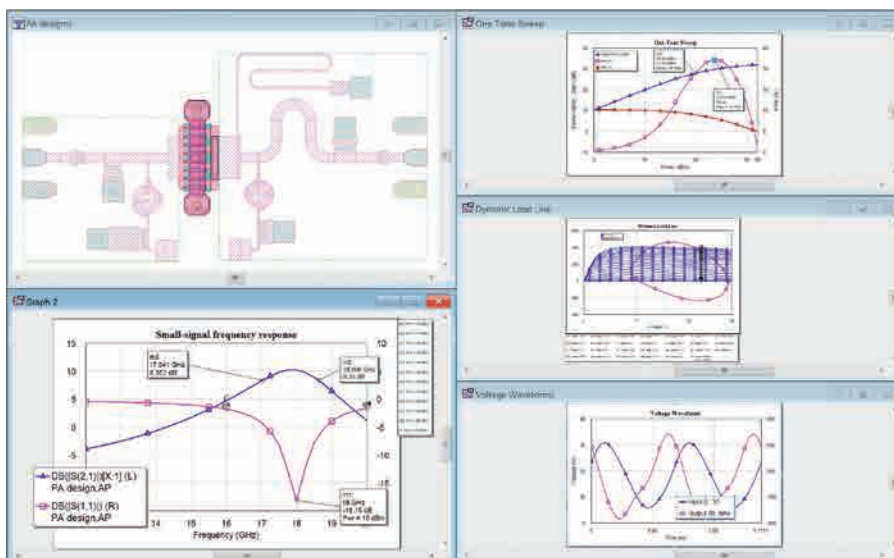


Рис. 7. Результаты моделирования усилителя мощности на 18 ГГц на основе нитридного транзистора (8×75 мкм) по техпроцессу 0,25 мкм

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.