

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ МИС СТАТИСТИЧЕСКИЙ УЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И.Пушница, О.Токмаков, Д.Красовицкий, к.х.н., О.Фазылханов,
А.Филаретов, к.ф-м.н., В.Чалый, к.ф-м.н.
ЗАО "Светлана – Рост", info@svrost.ru

Реализация принципа сквозного проектирования – один из эффективных способов сокращения сроков разработки радиоэлектронных систем и уменьшения количества ошибок. Сквозное проектирование состоит в совмещении в единой проектной среде передачи требований на уровень вниз и результатов проектирования на уровень вверх. Из условия совместимости вытекают требования к описанию результатов проектирования по уровням в единой среде, а из условия передачи результатов проектирования на вышележащий уровень – требование адекватности результатов компьютерного моделирования реальному поведению СВЧ-микросхемы, изготавливаемой в ходе технологического процесса. Адекватность компьютерного моделирования фактическому поведению СВЧ-микросхемы достигается путем применения при проектировании изделий моделей, в описании которых учитывается изменчивость технологического процесса их изготовления.

Применение современных систем автоматического проектирования (САПР) СВЧ-устройств, таких как AWR Design Suite или Agilent (Keysight) Advanced Design System (ADS), позволяет передавать результаты моделирования СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на уровень выше – для проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

Однако просто передачи результатов моделирования на вышележащий уровень недостаточно, необходима уверенность в том, что результаты моделирования СВЧ-микросхемы при ее проектировании и экспериментально определяемые параметры изготовленной по этому проекту СВЧ-микросхемы совпадут.

ЕСТЕСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В общей практике мировой полупроводниковой промышленности отработан и в настоящее время

господствует принцип стандартных технологий [1, 2]. Термин "стандартная технология" предполагает единство специальным образом организованного технологического процесса изготовления микросхем конкретной группы конструктивно-технологического подобию и комплекса "Правила и средства проектирования" микросхем для этой группы.

Особенности организации стандартного технологического процесса состоят в том, что:

- он направлен на создание конкретной группы конструктивно и технологически подобных изделий, функциональные параметры которых могут значительно различаться;
- описывается (характеризуется) необходимым и достаточным для данной технологии набором измеряемых параметров;
- должен быть аттестован (qualified process);
- в процесс заложена возможность формализованного контроля – проверки соответствия значений параметров процесса установленным

требованиям по мере его осуществления (самоаттестация).

Комплекс "Правила и средства проектирования" представляет собой комплекс в составе конструкторской, технологической и программной документации, встраиваемой в САПР библиотеки стандартных элементов, а также настроек для автоматической проверки соответствия разработанной топологии правилам топологического проектирования (Design Rule Check) и корректности соединений элементов относительно принципиальной схемы (Layout versus Schematic). Текстовый документ "Правила топологического проектирования", входящий в комплекс, по существу является технологической инструкцией для проектирования элементов библиотеки (заводские правила). Библиотека стандартных элементов представляет собой конечный набор элементов – составных частей микросхем, разрешенных для применения при проектировании устройства (в данном случае СВЧ МИС) на основе данного стандартного технологического процесса.

Полное описание всех и каждого разрешенного к применению элемента приводится в текстовом документе "Справочник библиотеки стандартных элементов" (Primitive Library Handbook).

Встраиваемый в САПР программный модуль библиотеки представляет собой отображение базы данных, связывающей топологические изображения элементов, параметры физико-математических моделей разрешенных элементов, их условно-графическое изображение и справочные файлы для всех элементов. Встраиваемый в САПР программный модуль – по существу инструмент проектирования – получил в англоязычной литературе наименование Process Design Kit (PDK).

Введение понятий характеристики, аттестации и самоаттестации технологического процесса означает, что процесс описывается в терминах измеримых параметров. Чтобы характеризующие процесс параметры можно было бы измерить, для каждого процесса проектируется свой набор тестовых элементов, которые локализируются в поле одного кристалла и образуют так называемый параметрический монитор. Причем для каждого процесса этот параметрический монитор – свой. Параметрические мониторы для двух реализованных на нашем предприятии стандартных технологических процессов (условные названия MESFET10 и MESFET05), предназначенных для изготовления разных конструктивно-технологических групп, показаны на рис.1 и 2.

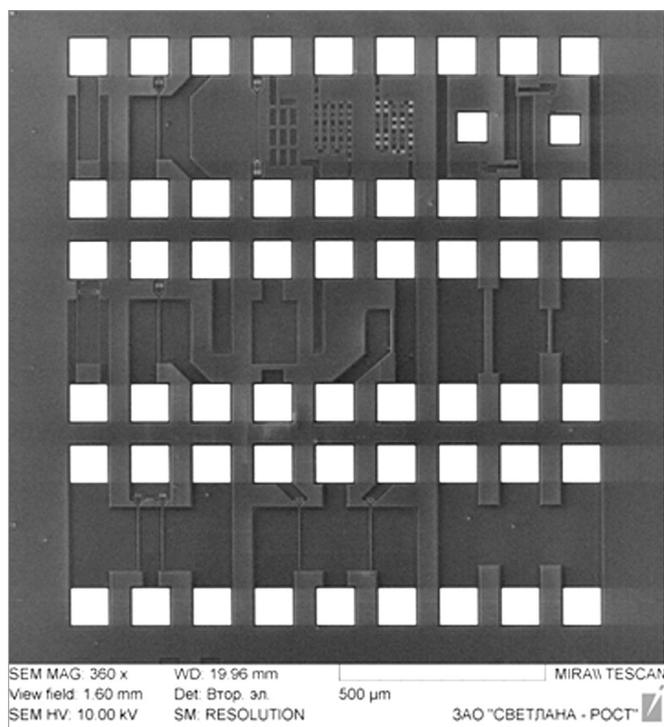


Рис.1. Параметрический монитор к стандартному технологическому процессу MESFET10

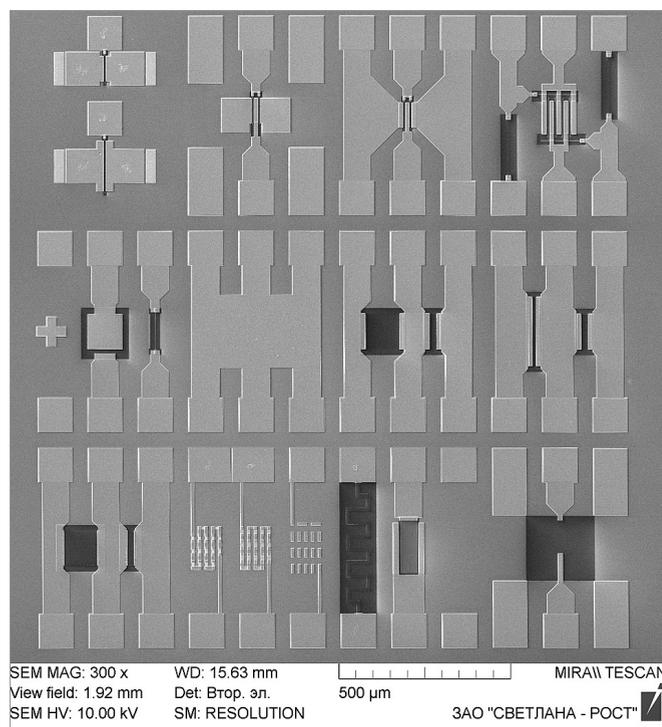


Рис.2. Параметрический монитор к стандартному технологическому процессу MESFET05

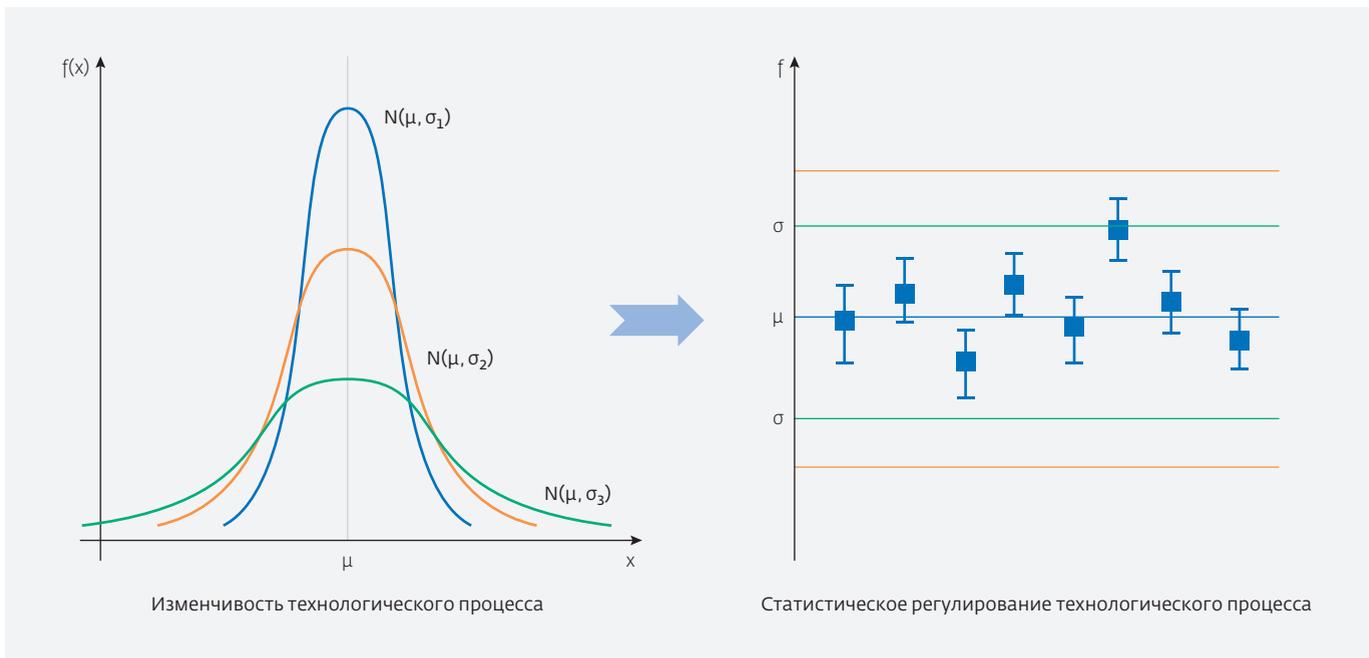


Рис.3. Переход от определения изменчивости технологического процесса к его статистическому регулированию

Изготовление параметрического монитора на каждой пластине при выполнении технологического процесса позволяет (путем проведения измерений на входящих в монитор тестовых элементах) получать объективные свидетельства межоперационного и выходного контроля. Обычно количество параметрических мониторов на пластине таково, что для обработки результатов измерений можно применять методы статистического описания. По статистическому описанию определяется присущая процессу естественная изменчивость. Так, на рис.3 приведено распределение значений параметра N из описания технологического процесса для трех разных величин его стандартного отклонения от среднего σ при одинаковом среднем значении μ . Сам же технологический процесс становится объектом статистического регулирования, с учетом его естественной изменчивости (см. рис.3). Такое положение дает не только уверенность в целостности и подконтрольности технологического процесса, но и при необходимости позволяет предпринимать предупреждающие действия для предотвращения выхода процесса за пределы контролируемого состояния.

Понимание того, что любой технологический процесс обладает естественной изменчивостью, является ключевым фактором в разрешении проблемы обеспечения взаимного соответствия результатов моделирования и характеристик

реальной СВЧ-микросхемы. Второй, не менее важный фактор, – понимание того, что возможность учесть изменчивость технологического процесса еще на этапе проектирования изделия оказывает прямое влияние на выход годных изготавливаемых микросхем. Эти два фактора обусловили поиск такого способа моделирования СВЧ-микросхем, который учитывал бы изменчивость технологического процесса.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ БИБЛИОТЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В конце 1990-х годов с развитием систем автоматического проектирования СВЧ-устройств большое внимание было уделено применению метода Монте-Карло для вариации параметров эквивалентных схем библиотечных элементов. Казалось, что общее развитие компьютерной техники способно предоставить необходимые вычислительные мощности. Однако развивались не только компьютерные технологии, но и модели транзисторов. Так, в основу наших инструментов проектирования (PDK) положена масштабируемая нелинейная модель транзистора с барьером Шоттки ЕЕНЕМТ [3], в описание которой включено более 70 параметров. Учитывая, что обычно в состав библиотеки стандартных элементов включено не менее 5–6 транзисторов различной конфигурации, можно представить,

какие вычислительные мощности потребовались бы при моделировании каждой разрабатываемой микросхемы. К 2000 году в полной мере ощущалась проблема больших вычислительных мощностей, кроме этого стало ясно, что просто Монте-Карло вариации параметров эквивалентных схем не обеспечивают корреляции этих вариаций с реальной изменчивостью технологического процесса [4]. Вслед за авторами [4] мы отказались от применения метода Монте-Карло и пошли по другому пути.

Если технологический процесс обладает изменчивостью и является объектом статистического описания, то естественно воспринимать каждый библиотечный элемент как объект, который обладает присущей именно ему изменчивостью. Естественным будет и переход к описанию библиотеки стандартных элементов с привлечением языка статистики, учитывающего вариации характеристик библиотечных элементов, вызванные изменчивостью применяемого технологического процесса (рис.4). В этом случае объектом статистической обработки становятся измеряемые параметры L всех элементов библиотеки со своими средними значениями μ и стандартными отклонениями от среднего σ .

ОТОБРАЖЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ИНСТРУМЕНТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Обычная, в том числе и применяемая в наших разработках, процедура определения изменчивости измеряемых параметров элементов библиотеки состоит в следующем. Для каждого стандартного процесса проектируются входящие в библиотеку элементы. Затем проектируется и изготавливается комплект фотошаблонов и управляющей информации для электронного литографа. По подготовленному комплекту изготавливается статистически достаточное количество "библиотечных" пластин, которые затем поступают на измерения.

В нашем случае измерения проводятся на стенде, где в автоматическом режиме на изготовленных пластинах снимаются характеристики на постоянном токе (вольт-амперные, переходные и т.д.), определяются частотно-зависимые малосигнальные СВЧ-параметры (S-параметры) – коэффициенты передачи, отражения, а также измеряются полные сопротивления библиотечных элементов, емкости конденсаторов и индуктивности катушек, удельные сопротивления резисторов. Для полноты

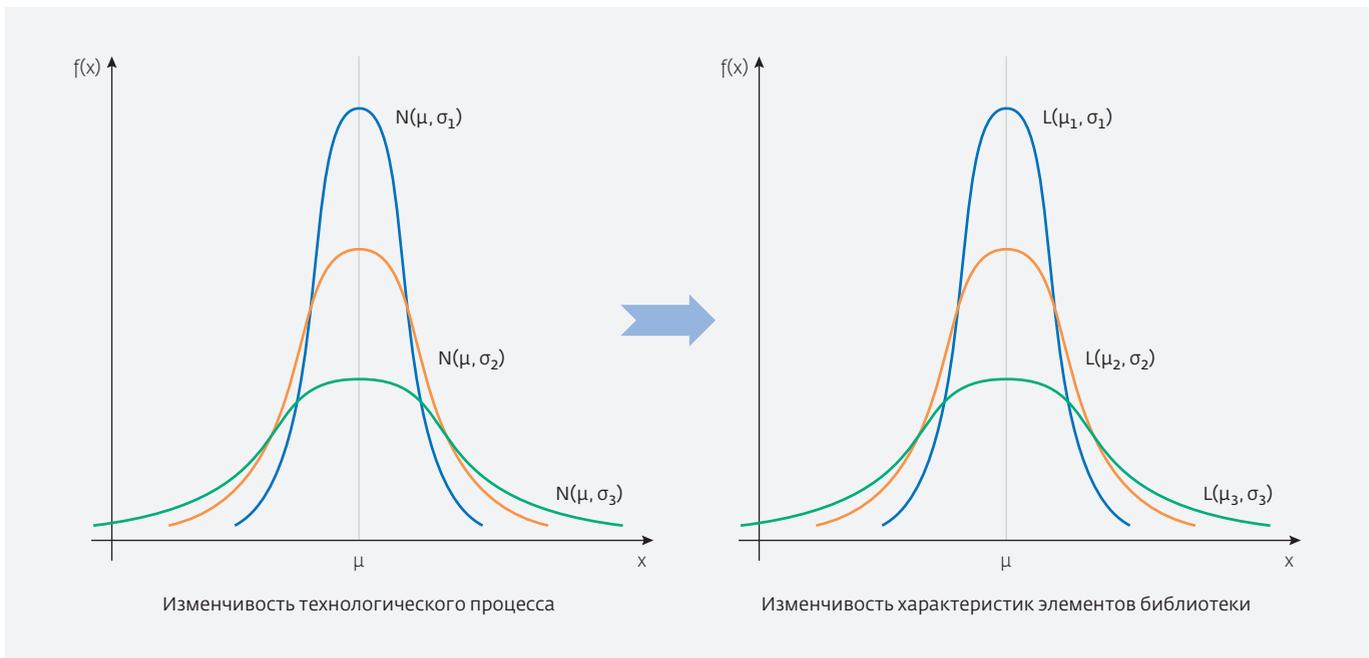


Рис.4. Переход от изменчивости технологического процесса к изменчивости характеристик библиотечных элементов

описания библиотеки необходимо учесть влияние температуры на измеряемые параметры. Поскольку термокамера зондовой станции измерительного стенда аттестована в диапазоне

температур от -60 до 150°C , то все измерения проводятся в нескольких (обычно пяти-семи) точках в диапазоне температур от -60 до 125°C .

В дополнение к привычным характеристикам библиотечных транзисторов при разработке библиотеки к стандартному технологическому процессу с условным наименованием рНЕМТ025 в описание транзисторов удалось включить (впервые в России) результаты измерений на пластине частотной зависимости коэффициента шума транзисторов. Управление измерениями, сбор и обработка результатов осуществляются с помощью созданного на предприятии программного обеспечения.

По результатам статистической обработки измерений параметров каждого из изготовленных стандартных элементов библиотеки находится объект ($GD_{\sigma 0}$), соответствующий среднему значению измеренных параметров конкретного вида элемента, и объекты ($GD_{\sigma +}$

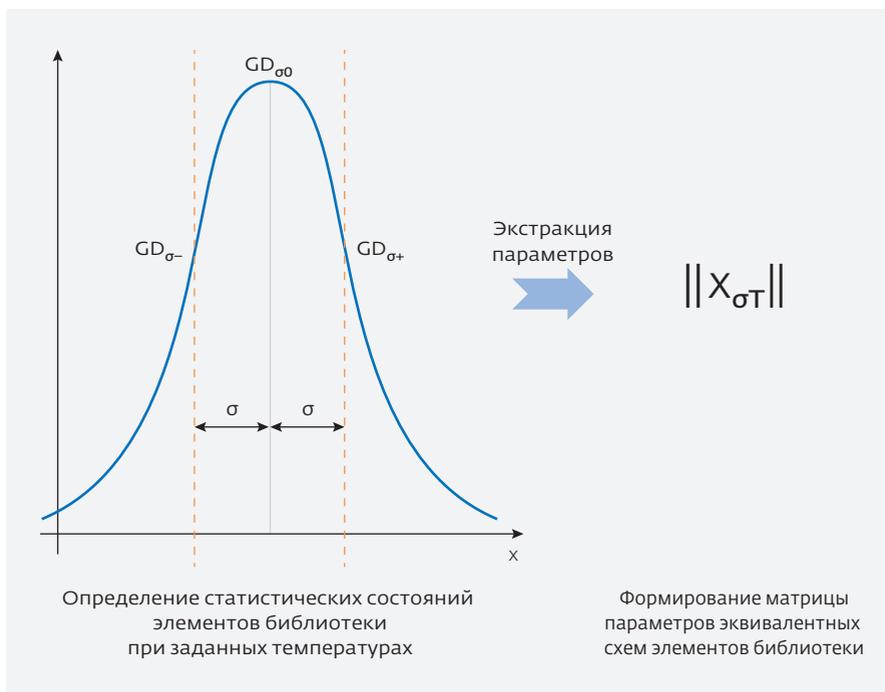


Рис.5. Формирование матрицы параметров эквивалентных схем библиотечных элементов

и $GD_{\sigma-}$), соответствующие параметрам, отстоящим на величину среднеквадратичного отклонения по обе стороны от среднего значения. Экстракция параметров эквивалентной схемы библиотечных элементов проводится в указанных трех статистических состояниях $GD_{\sigma-}$, $GD_{\sigma+}$ и $GD_{\sigma 0}$ (рис.5) при нескольких значениях температур с использованием собственного программного обеспечения и лицензионного САПР, в нашем случае AWR Design Environment. Таким образом формируется матрица параметров эквивалентных схем для каждого библиотечного элемента.

Полное описание топологических изображений элементов, матриц параметров физико-математических моделей разрешенных элементов, их условно-графических изображений и справочных файлов для всех элементов обеспечивается путем организации реляционной базы данных библиотеки соответствующего технологического процесса. Ее программное отображение (встраиваемый в САПР модуль библиотеки) и есть основной инструмент проектирования – Process Design Kit.

В результате мы получаем библиотеку – инструмент проектирования (Design Kit),

отображающий естественную изменчивость применяемого при изготовлении СВЧ МИС статистически регулируемого технологического процесса. Это означает, что результаты компьютерного моделирования, передаваемого в САПР с уровня проектирования СВЧ МИС на уровень проектирования радиоэлектронного устройства, адекватно отображают поведение реально изготавливаемой СВЧ-микросхемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зверев А.В., Попов В.В., Филаретов А.Г., Чалый В.П.** Модели организационного развития предприятий полупроводниковой промышленности // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2011. № 4. С. 107–109.
2. **Красовицкий Д.М., Филаретов А.Г., Чалый В.П.** Стандартизованные процессы производства нитридной СВЧ ЭКБ, состояние и ближайшие перспективы // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2013. № 3. С. 70–74.
3. MWO/AO Element Catalog, AWR Corporation, 2014 <https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Elements/EEHEMT.htm>.
4. **Tsai R. et al.** Forecasting Methods for MMIC RF Yield, 2000 GaAsMantech Technical Digest, 2000. P. 113–116.