

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ НОВОЙ РОССИЙСКОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

Для активного развития и всестороннего внедрения прогрессивных методов проектирования и производства твердотельной СВЧ ЭКБ, основанных на стандартных технологиях и поддерживающих принцип сквозного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, в отрасли сейчас совершенно недостаточно специалистов, способных эти принципы развивать. Опыт показывает, что значительная часть разработчиков привыкла «читать схемы» по старинке, а те, кто владеет современным инструментарием — «самоучки», получившие опыт на зарубежных foundry-сервисах.

Твердотельная СВЧ-электроника является достаточно специфической областью микроэлектроники, сочетающей более простые (с точки зрения проектных норм, количества уровней металлизации и т. д.) и в меньшей степени масштабируемые технологические решения, с более сложной физикой работы приборов. Для активного развития и всестороннего внедрения прогрессивных методов проектирования и производства твердотельной СВЧ ЭКБ, основанных на стандартных технологиях и поддерживающих принцип сквозного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, необходимы не только финансовые ресурсы, но и существенная ревизия системы профессиональной подготовки специалистов, способных перестроить сложившуюся парадигму разработки и эффективно в сжатые сроки отвечать на возникающие перед отраслью вызовы.

«КИТЫ» СОВРЕМЕННОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

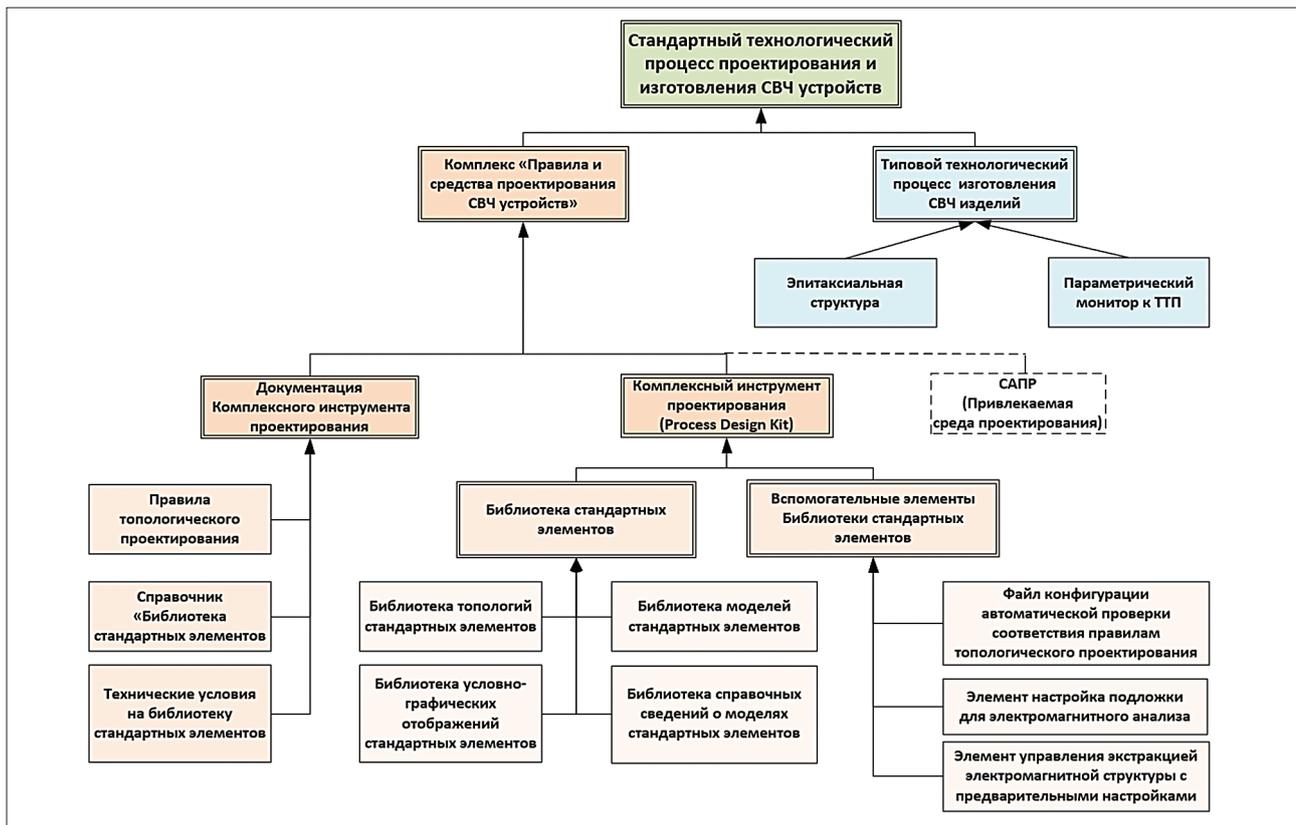
Современная СВЧ-электроника, как и микроэлектроника в целом, развивается в двух основных потребительских сегментах: массовом, требующем удовлетворения постоянно возрастающего спроса на различные общедоступные средства коммуникации между людьми и механизмами (мобильная связь, системы геолокации, управления движением, «Интернет вещей» и т. п.), и в сегменте доверенных применений, характеризующемся повышенными требованиями к параметрам, в том числе относительно мелкосерийных изделий (системы безопасности, военные и космические применения) [1]. Несмотря на существенные различия указанных потребительских сегментов и разные механизмы формирования технических требований к изделиям в каждом из них, оба имеют общую черту, а именно — необходимость быстрой смены поколений разрабатываемых устройств при повышении уровня их качества. Такая возможность в течение последних нескольких десятков лет за рубежом обеспечивается развитием и повсеместным внедрением стандартных технологий, которые служат основой реализации метода разработки и производства, известного как foundry. Этот метод основан на разделении ответственности между конструкторским и технологическим звеньями разработки, позволяющим максимально эффективно выполнять присущие им компетенции, и, вместе с тем, на их целевом единстве. На каких же «китах» базируется методология, столь

успешно внедрявшаяся в зарубежную практику и настойчиво отвоевывающая себе место под солнцем в отечественной СВЧ-электронике? Рассмотрим упрощенную структурную схему стандартной технологии (рис. 1), являющейся основной структурной единицей любого foundry-сервиса [2].

Как видно из приведенной схемы, любая стандартная технология включает две неразрывно связанные между собой ветви: конструкторскую и технологическую. Технологическая ветвь, несмотря на кажущуюся простоту (всего-то три блока в схеме!), очень наукоемка и охватывает как минимум:

- фундаментальные физико-химические характеристики полупроводниковых материалов (объемные свойства, свойства поверхностей и границ раздела, конструкции гетероструктур, номенклатуру применяемых технологических воздействий и методов инструментальной диагностики), определяющие предельно достижимые параметры приборов;
- методики расстановки контрольных точек процесса, построения перечня его приборно-ориентированных параметров, их измерения, статистической обработки и моделирования естественной изменчивости технологического процесса;
- методики определения устойчивости (воспроизводимости) технологического процесса, построение самонастраивающейся системы его мониторинга и управления качеством, разработку комплекса технологических ограничений для правил топологического проектирования.

Неудивительно, что технологическая ветвь оказывается исключительно ресурсоемкой, особенно в части определения границ естественной изменчивости технологического процесса (характеризации) и разработки системы обеспечения его качества (стабильности). В этом кроется и одно из коренных отличий системы производства, построенной на стандартных технологиях: разработка устойчивого технологического процесса *предшествует* началу собственно конструкторской разработки изделий. Иными словами, конструктору-«прибористу» *позволено разрабатывать* лишь то, что может быть обеспечено стабильной (в пределах естественной изменчивости!) технологией изготовления. Означает ли это, что роль конструкторской мысли в этих условиях принижена? Отнюдь нет! Мы совершенно



▲ Рис. 1. Структурная схема стандартной технологии проектирования СВЧ-устройств

осознанно назвали ветви стандартной технологии неразрывно связанными, и сейчас наглядно покажем это.

Итак, рассмотрим конструкторскую составляющую стандартных технологий (рис. 1), представляющую собой комплекс правил и средств проектирования. Ядро комплекса — это основанный на библиотеке стандартных элементов инструмент проектирования Process Design Kit (далее — PDK), подключаемый к системе автоматического проектирования (САПР) и служащий интерфейсом между сложной структурой данных о стандартных элементах, содержащихся в библиотеке, и разработчиком (конструктором) СВЧ-устройств. Исчерпывающая информация о перечне и параметрах стандартных элементов, правилах топологического проектирования и практическое руководство по использованию PDK содержатся в документации комплекса. Перечисленные инструменты и документация непосредственно предназначены для передачи разработчикам и, казалось бы, не содержат в явном виде сведений о технологическом процессе. Однако незримая, но неразрывная связь, о которой мы говорили выше, пронизывает практически все части структурной схемы. Так, требования к перечню и параметрам стандартных элементов являются одной из важнейших частей технического задания на разработку технологического процесса, в том числе на конструкции используемых гетероструктур. Параметрический монитор технологического процесса в обязательном порядке разрабатывается с включением в него стандартных элементов или их масштабируемых фрагментов, а программы и методики межоперационного и выходного контроля формируются при непосредственном участии конструкторов, разрабатывающих PDK. В свою очередь, ограничения, накладываемые технологическим процессом (в том числе в силу его естественной изменчивости), являются одними из важнейших аспектов при разработке правил топологического проектирования, входящих в документацию PDK и снабженных автоматическими средствами их проверки.

Таким образом, стандартная технология представляет собой сложный, высокоорганизованный инновационный объект,

разработке которого в настоящее время, увы, в отечественных вузах не учат. В то же время наш многолетний опыт показывает, что даже в условиях избыточного предложения на рынке импортных услуг foundry (ситуация недавнего прошлого, которая в силу ужесточения санкционной политики стремительно меняется!), отечественные разработчики СВЧ ЭКБ нередко оказывались не готовы эффективно использовать их. В немалой степени такая ситуация обусловлена отсутствием соответствующей подготовки молодых инженеров-конструкторов, но не только. Более серьезная проблема кроется в устаревшей парадигме разработки, основанной на первенстве конструкции изделия над технологией его изготовления. И менять эту парадигму нужно со студенческой скамьи.

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ — СФОРМИРОВАТЬ МИРОВОЗЗРЕНИЕ КОНСТРУКТОРА

Очевидно, что для повсеместного внедрения стандартных технологий в практику разработки и производства СВЧ ЭКБ, во-первых, нужно научиться разрабатывать и аттестовывать указанные технологии, и, во-вторых, грамотно ими пользоваться. Как ни парадоксально, сложность переориентации обучения студентов-технологов и студентов-конструкторов обратно пропорциональна объему затрат ресурсов на применение ими полученных новых знаний. Ранее мы указывали, что разработка, характеристика и аттестация технологического процесса сопряжены с колоссальными материальными и временными издержками. В то же время фундаментальные основы обучения студентов технологических специальностей не требуют значительной ревизии — необходимо лишь сделать акценты на методологии определения границ естественной изменчивости разрабатываемых технологических процессов, проведения межоперационного и выходного контроля, мониторинга и статистических методов управления качеством технологии. Это наглядно подтверждается опытом: начиная с 2012 года в стенах АО «Светлана-Рост» в инициативном порядке ежегодно проводятся летние ознакомительные практики для студентов ряда вузов Санкт-Петербурга. Впоследствии неко-

торые заинтересовавшиеся студенты приходили на предприятие писать выпускные квалификационные работы, становились сотрудниками технологических подразделений. Почему технологических? Ведь к нам приходили не только студенты, обучающиеся «нанотехнологическим» специальностям. Дело в том, что старшекурсники — будущие конструкторы, с интересом прослушав лекции о преимуществах foundry и стандартных технологий, не находили отклика полученной информации в стенах своих учебных заведений. Молодых специалистов, пришедших на работу в конструкторский отдел АО «Светлана-Рост», приходилось интенсивно обучать «в боевых условиях». Обучать не основам микроволновой теории и не принципам схемотехнического проектирования СВЧ-цепей — этому по-прежнему неплохо учат в наших вузах. Основным камнем преткновения для овладения практическими навыками проектирования при помощи стандартных технологий является осмысление упоминавшейся ранее парадигмы: *технология определяет перечень и параметры* (в том числе и их разбросы) *стандартных элементов*, библиотека которых является исходными данными для проектирования целого *класса конструктивно-подобных* изделий. Казалось бы, что же тут сложного? В традиционной микроэлектронике студенты, выполняя практические работы по проектированию СБИС или систем на кристалле, даже не задумываются над тем, кем и как будет изготавливаться их изделие — им достаточно строчки в документации с упоминанием «техпроцесса с проектной нормой такой-то...». Тем не менее опыт общения с потребителями — разработчиками СВЧ ЭКБ и РЭА на ее основе — показывает, что повседневная практика разработки СВЧ-модулей, в том числе и твердотельных, до сих пор пребывает в прокрустовом ложе ЕСКД/ЕСТД. А уж чему в этой системе отдается приоритет — всем известно, достаточно взглянуть на титульные листы комплектов КД и ТД.

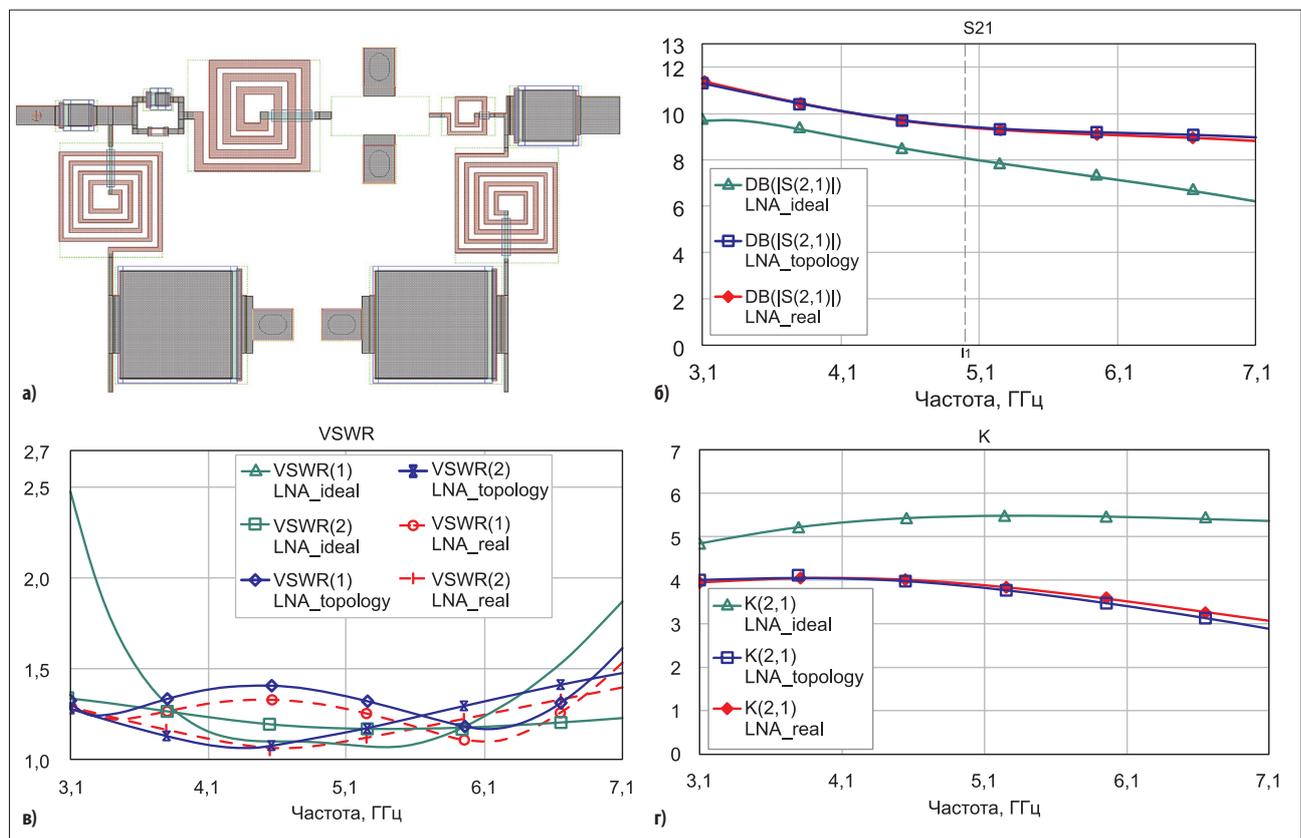
Таким образом, в сегодняшних реалиях представляется совершенно необходимой модернизация системы подготовки конструкторов-разработчиков СВЧ-устройств, направленная на выработку, во-первых, парадигмы разработки, основанной

на стандартных технологиях, и, во-вторых, практических навыков применения этой парадигмы в условиях, приближенных к реальным. Что же делать? Ведь разработка и внедрение новых образовательных стандартов — дело непростое и небыстрое? Потом на подготовку специалистов опять понадобится время, а курс России на возрождение отечественной радиоэлектроники требует результата уже сейчас. Но, как нередко случается в отечественной практике, кое-что удается осуществить на инициативной основе, при условии объединения усилий заинтересованных сторон.

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР ДОЛЖЕН СТАТЬ ЗАРАЗИТЕЛЬНЫМ

Уже более 15 лет АО «Светлана-Рост», с момента своего основания, ориентировано на реализацию метода foundry для проектирования и производства твердотельных компонентов для опто- и СВЧ-электроники ответственного применения [3]. Описанные выше проблемы поиска и (само)обучения специалистов компании пришлось решать собственными силами, непосредственно в ходе разработки и внедрения стандартных технологий. По мере их появления и ввода в коммерческую эксплуатацию, сформировалась уникальная для РФ возможность попытаться распространить полученный опыт в профильные вузы. Выше было указано, что ознакомительная практика, проводимая в стенах предприятия для студентов младших курсов, неплохо служила и служит целям профориентации (особенно для технологических направлений подготовки), но явно недостаточна для формирования и практического использования современных навыков конструирования СВЧ ЭКБ. Идея внедрения уникальной методологии в образовательный процесс витала в воздухе.

В начале 2020 года совместно с руководством кафедры электронного приборостроения СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» было принято решение о разработке учебного курса, основанного на изучении и практическом использовании студентами PDK стандартных технологий АО «Светлана-Рост». Указанный курс [4], введенный в учебный план кафедры уже в текущем учебном году, предпола-



▲ Рис. 2. Топология и параметры схемных моделей МИС СВЧ-усилителя, спроектированного в рамках учебного курса при помощи PDK стандартной технологии GA025D

гает ознакомление с возможностями PDK в части проектирования различных монолитных интегральных схем (МИС) из области применения соответствующих стандартных технологий, анализ технического задания на разработку некоторых типовых МИС и практическое выполнение разработки МИС при помощи предоставленного PDK. В задании на лабораторный практикум по разработке МИС входят все основные этапы работы конструктора-дизайнера на предприятиях отрасли:

- запуск САПР и подключение необходимой библиотеки элементов, задание граничных условий и иных параметров моделирования;
- создание схемной модели МИС СВЧ из рекомендованных стандартных элементов библиотеки и ее анализ, включающий расчет коэффициента передачи S21, коэффициента стоячей волны VSWR входа/выхода и коэффициента устойчивости K;
- создание топологии МИС СВЧ с учетом встроенных топологических ограничений;
- оптимизация МИС СВЧ по целевым параметрам технического задания.

На рис. 2 показана топология МИС СВЧ-усилителя, спроектированного в рамках лабораторной работы студентов второго курса магистратуры «ЛЭТИ» при помощи PDK, входящего в состав стандартной технологии АО «Светлана-Рост» «GA025D», основанной на нормально открытых полевых транзисторах типа рHEMT с проектной нормой 0,25 мкм. На рис. 2 представлены также параметры схемных моделей, полученные в результате проектирования. «Прелесть» ситуации заключается в возможности экспериментальной проверки разработанных моделей путем изготовления спроектированных МИС СВЧ на реальных пластинах, производимых по данной технологии АО «Светлана-Рост».

Введение подобного практикума не только имеет ряд очевидных преимуществ, но и потенциально несет в себе широкие возможности развития:

- будущие инженеры-конструкторы получают правильное представление о современной парадигме проектирования и производства СВЧ ЭКБ, предполагающей главенство стандартных технологий при выборе инструментов проектирования (PDK), подходящих для выполнения конкретного технического задания;
- студенты получают возможность воспользоваться **реальными** средствами проектирования, основанными на **отечественных стандартных технологиях**, что исключительно важно для формирования у них представления о высоком уровне развития технологий в РФ, не уступающих современным зарубежным трендам;
- вузы получают возможность организовать в своих стенах собственные дизайн-центры, которые потенциально могут

развиться из чисто учебных подразделений в настоящие центры науки, осуществляющие как послевузовскую подготовку, так и самостоятельные разработки в интересах промышленных потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одними из основных тенденций в развитии мировой СВЧ-электроники являются быстрая смена поколений электронной компонентной базы и рост доли компонентов, специализированных по области применения. Обе тенденции предъявляют жесткие требования к срокам разработки и постановки на производство новых образцов СВЧ ЭКБ, при обязательном сохранении уровня их качества. Эффективным способом удовлетворения указанным требованиям за рубежом стала методология foundry, основанная на стандартных технологиях проектирования и производства изделий твердотельной электроники. В нашей стране до недавнего времени методология СВЧ-foundry активно не развивалась, в силу чего сложился дефицит специалистов, способных не только разрабатывать современные средства проектирования, но даже просто использовать их на практике. Проблема восполнения указанного пробела требует немедленных действий на всех уровнях системы подготовки кадров. Примером практического решения одного из аспектов проблемы стала разработка учебного курса «Гибридные и монолитные интегральные схемы сверхвысоких частот» для студентов магистратуры кафедры электронного приборостроения СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», основанного на использовании PDK в составе стандартных технологий, разработанных и освоенных АО «Светлана-Рост». Преимущества и перспективы применения результатов подобного сотрудничества достойны их повсеместного распространения среди профильных вузов и предприятий отрасли, а также поддержки на уровне Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Semiconductor Foundry Market — Growth, Trends, and Forecast (2020–2025)*. Mordor Intelligence. www.mordorintelligence.com/industry-reports/semiconductor-foundry-market
2. Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Физико-технологические аспекты построения foundry производства СВЧ ЭКБ: опыт АО «Светлана-Рост». В сб. «Мокеровские чтения». 10-я Юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. 2019.
3. Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Первая отечественная СВЧ-фабрика-фаундри с военной приемкой: методология, проблемы и перспективы//СВЧ-электроника. 2020. № 1.
4. Вьюгинов В. Н. Гибридные и монолитные интегральные схемы сверхвысоких частот: учебно-методическое пособие. СПб., Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.