

Верификация стандартных СВЧ-технологий по-русски: как подружить СРПП с JEDEC?

Д. Красовицкий, к. х. н.¹, А. Филаретов, к. ф.-м. н.²,
О. Фазылханов³, В. Чалый, к. ф.-м. н.⁴

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Повышение роли радиоэлектронной промышленности в достижении Россией экономического суверенитета требует коренной реновации полупроводниковых производств, подчас на уровне смены парадигмы. Это долговременный и многофакторный процесс, но первые результаты на выделенных «участках фронта» уже видны. Так, некоторые отечественные СВЧ твердотельные технологии и производимая с их помощью ЭКБ во многом не уступают зарубежным аналогам. Однако импортозамещение тормозится не только техническим, но и организационным отставанием – действующая система разработки и постановки на производство (СРПП) уже давно не отвечает современным условиям. Что означает тезис «уравнять в правах отечественных и зарубежных производителей»? Как решать проблемы, с которыми неизбежно столкнется отрасль, если правительство в полном масштабе реализует многочисленные анонсированные преференции и ограничительные меры при закупках ЭКБ?

Затяжной период зависимости отечественных разработок радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от поставок импортных электронных компонентов болезненно подходит к концу [1]. Болезненно – потому что установившиеся годами кооперационные связи рушатся по всему миру (обострение санкционной политики, спровоцированный пандемией «мировой кризис полупроводников»), а технологический суверенитет, ставший одним из постулатов национальной политики всех претендующих на мировое лидерство стран, не может быть достигнут на устаревшей «материально-технической базе». Пока Intel готовится заметно раскошелиться [2] на расширение собственного контрактного производства в рамках стратегии IDM-2, тайваньская TSMC, дающая около половины мирового выпуска чипов, бьет рекорды по прибылям [3] и диктует условия потребителям. В СВЧ-электронике, традиционно считающейся «младшим братом»

и по объемам производства, и по используемым технологическим решениям, указанные тенденции не только сохраняются, но и более отчетливо видны. Методология «фаундри», ставшая основой быстрого развития и базовым способом разработки и производства быстроменяющейся номенклатуры электронных компонентов в зарубежной твердотельной СВЧ-индустрии [4], понемногу укореняется и в России [5]. От того, насколько результативно проходит этот процесс в отечественных реалиях, напрямую зависит эффективность государственной поддержки отрасли, масштабы которой в последнее время беспрецедентны [6].

ФАУНДРИ В РФ: «НЕСТАНДАРТНЫЕ» СТАНДАРТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Когда потребители – разработчики РЭА (особенно не связанные необходимостью вести разработку под контролем военных представительств (ВП)) встают перед выбором, чем и как комплектовать свои новые проекты, решение, как правило, определяется скоростью получения макетов и опытных образцов ЭКБ для натурных испытаний, возможностью оперативно провести доработку изделий, а после постановки аппаратуры на производство – обеспечить его поставками комплектующих стабильного качества по приемлемой цене. Неудивительно, что разработка и производство комплектующих по методу фаундри

¹ АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург), проектный офис, ведущий инженер, d.krasovitskij@svrost.ru.

² АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург), главный конструктор направления, o.fazylhanov@svrost.ru.

³ АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург), заместитель генерального директора по развитию, a.filaretov@svrost.ru.

⁴ АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург), генеральный директор, v.chaly@svrost.ru.

отвечает всем этим критериям – благодаря основополагающей роли **принципа разделения компетенций** (читай – ответственности) проблемы технологического обеспечения проекта перед конструктором изделия не возникает. Вообще. За исключением ситуаций (в большинстве своем – это вся РЭА для доверенных применений), когда на пути к желаемому результату встает неповоротливая нормативная база, требующая вести **полную разработку** изделия и **технологии его изготовления**.

Кратко напомним, в чем же состоит основное несовершенство проектирования и изготовления ЭКБ в рамках существующей в РФ системы разработки и постановки на производство по сравнению с методом фаундри, основанным на стандартных технологиях, включающих в себя комплексные инструменты проектирования. Обычный цикл создания и постановки на производство нового дискретного СВЧ-модуля или монолитной интегральной схемы (МИС) по стандартам СРПП состоит из нескольких этапов разработки документации и изготовления по ней опытных образцов, с проведением последовательных групп испытаний и корректировок документации. Конструкторская документация здесь **первична**, а технологическая часть считается успешной, если при испытаниях достигнуты заданные параметры опытных образцов. Обычно процедура занимает от трех до пяти лет, стоит сотню-другую миллионов рублей и на выходе дает комплектующее изделие, параметры которого зачастую заданы «обратным ходом» исходя из требований к РЭА или продиктованы необходимостью замещения существующего импортного аналога, воспроизводимость технологии не определена (из-за малой статистической базы), а стоимость в производстве (которое, в лучшем случае, удастся «освоить» в ходе ОКР), оказывается, как правило, высокой.

Раз метод фаундри так хорош, почему же до сих пор в Российской Федерации не разработана полная линейка стандартных технологий, обеспечивающая все возможные потребности разработчиков ЭКБ? В значительной мере – именно потому, что **технологии**, как таковые, в существующей парадигме **«не имеют права» существовать** сами по себе, **в отрыве от изделия**. Процесс разработки и квалификации стандартных технологий (который мы подробнее рассмотрим далее) в ведущих мировых компаниях занимает до пяти лет, при этом количество пластин, задействованных только на этапе квалификации, составляет обычно сотню-полторы. Себестоимость планарного цикла по технологии рНЕМТ на четырехдюймовой пластине GaAs составляет, в современных реалиях, 3–4 млн руб. Потратить более полумиллиарда рублей (и это только на заключительном этапе!) и не получить на выходе ни одного конкретного серийного изделия ЭКБ считается невиданным расточительством. Но финансовый вопрос, как оказывается, тут далеко не основной. На протяжении

последнего десятилетия усилия, направленные на разработку полноценных стандартных технологий, предпринимались нами неоднократно, сначала – в ходе отдельных ОКР в рамках федеральных целевых программ, затем – в рамках Научно-технических программ Союзного государства РФ и Республики Беларусь. Достигнутые результаты [7], безусловно, позволили сдвинуть дело с мертвой точки, но получены они, как говорится, скорее «вопреки». Попробуем определить основные «концептуальные разрывы» сложившейся за эти годы практики разработки.

Рассмотрим упрощенную структурную схему стандартной технологии (рис. 1), являющейся основной структурной единицей любого фаундри сервиса. Как видно из приведенной схемы, она включает в себя две неразрывно связанные между собой ветви: конструкторскую и технологическую. Технологическая ветвь, несмотря на кажущуюся простоту (всего-то три блока в схеме!), охватывает как минимум:

- фундаментальные физико-химические характеристики полупроводниковых материалов (гетероструктур), 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, разработка комплекса технологических ограничений для правил топологического проектирования.

Неудивительно, что эта 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. Следствием этого противоречия является полная **неопределенность требований к технологии** как таковой: ведь в СРПП главное требование к техпроцессу – обеспечение достижения параметров изделий! Что (какие физические объекты) испытывать при разработке технологического процесса? А как сформулировать требования к самим этим физическим объектам? И где в СРПП найти основания даже к **поиску**



Рис. 1. Структурная схема стандартной технологии проектирования и производства СВЧ МИС

методологии подобных испытаний? Как «перекинуть мостик» от требований к параметрам объектов испытаний к характеристикам устойчивости (воспроизводимости) технологического процесса?

Нельзя сказать, что в существующей нормативной базе совсем нет понятий и терминов, подходящих для реализации разработки стандартных технологий. «Характеризацию технологического процесса» (изучение и статистическое описание его естественной изменчивости) можно с натяжкой считать определительными испытаниями, «верификацию библиотеки стандартных элементов» по параметрам тестовых СВЧ МИС из области применения – испытаниями сравнительными. Но попытки «разработать» один или несколько выделенных блоков приведенной схемы (например, технологию роста эпитаксиальных структур с «тестовыми модулями» в рамках отдельной «ОКР по материалам»), равно как попытки выстроить логическую последовательность испытаний технологии в рамках «приборно-ориентированных» ОКР неизменно наталкивались на неразбериху при приемке таких ОКР. Даже технические задания на разработки ряда стандартных технологий, успешно выполненные нами в рамках весьма «лояльных» требований научно-технических программ

Союзного государства («Прамень» (2012–2015) и «Луч» (2016–2019)), в прокрустовом ложе СРПП выглядели урезанными и позволили получить лишь прототипы (правда, полностью работоспособные) ряда перспективных технологий. Что же необходимо поменять в стандартах, чтобы исправить ситуацию?

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ФАУНДРИ-ПРОИЗВОДСТВ

Ответы на вопросы, поставленные в конце предыдущего раздела, разумеется, есть – система фаундри за рубежом повсеместно внедрена и успешно действует именно благодаря четко определенным взаимосвязям внутри приведенной на рис. 1 схемы и процедурам проверки их функционирования. Физическим объектом, выполняющим роль «индикатора качества» выполнения технологического процесса, является параметрический монитор, а «целевым продуктом» – набор стандартных элементов, образующих в итоге библиотеку, подключаемую к системе автоматического проектирования (САПР). Ядро «конструкторской части» стандартной технологии представляет собой основанный на библиотеке стандартных элементов инструмент проектирования Process Design Kit



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001



(далее – PDK), подключаемый к 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 ЭКБ 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 и, 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.

Что же делает построенные таким образом технологии действительно «работающими», а основанную на них методологию – столь удобной для разработчиков? Ключ к пониманию лежит в самом определении «процесса», используемом в стандартах Объединенного совета разработчиков электронных устройств (JEDEC): это «объединение людей, процедур, методов, оборудования, материалов, измерительного оборудования и/или условий конкретных видов деятельности, целью которого является производство определенного продукта или оказание услуги» [8]. Важно, что процесс является универсальным понятием, которое можно отнести как к любой технологической или измерительной операции (или их совокупности – маршруту), так и к более разнородным видам деятельности – разработке, моделированию... Надлежащим образом определенный и контролируемый процесс представляет собой повторяющуюся последовательность действий с измеримыми входами и выходами. Зная матрицу характеристик процесса, можно определить и измерить его стабильность, повторяемость, чувствительность и устойчивость к воздействиям. Подобная полная характеристика делает возможным использование предсказуемости процесса для проведения его самовалидации – или

мониторинга (т. е. проверки корректности выполнения непосредственно в его ходе) вместо аудита (измерения результирующих параметров). Разумеется, и сама разработка стандартной технологии также является «процессом», и к ней применим весь набор стандартных критериев и процедур их определения. Отсюда становится понятным масштаб решаемых научно-технических задач и – увы! – затрат, которые необходимо понести в ходе разработки самой технологии. Достаточно сказать, что количество процедур, применяемых для определения каждой из характеристик технологического процесса, входящего в состав стандартной технологии, составляет полтора десятка, при этом сами характеристики основываются на базе данных, собираемой и обрабатываемой с использованием более двух десятков инструментов статистического анализа и управления (рис. 2).

Важно, что уже на стадии характеристики техпроцесса проводится анализ типов и последствий отказов (FMEA) стандартных элементов («building blocks») – ни о каких изделиях ЭКБ к этому моменту речь еще не идет! Но установленные таким образом [9] параметры безотказности элементов библиотек должны сохраняться на всех уровнях системной архитектуры, что дает основания распространить их на изделия, проектируемые при помощи библиотек. А в руководстве к процедуре «квалификации» стандартных технологий, дающей им «право» стать обеспечивающими предоставление услуг «фаундри» [10],



Рис. 2. Пример диаграммы Шухарта (статистического управления процессом). В наблюдениях № 6 и 20 процесс является неуправляемым. Необходимо выявить и устранить особые причины и документировать корректирующее действие

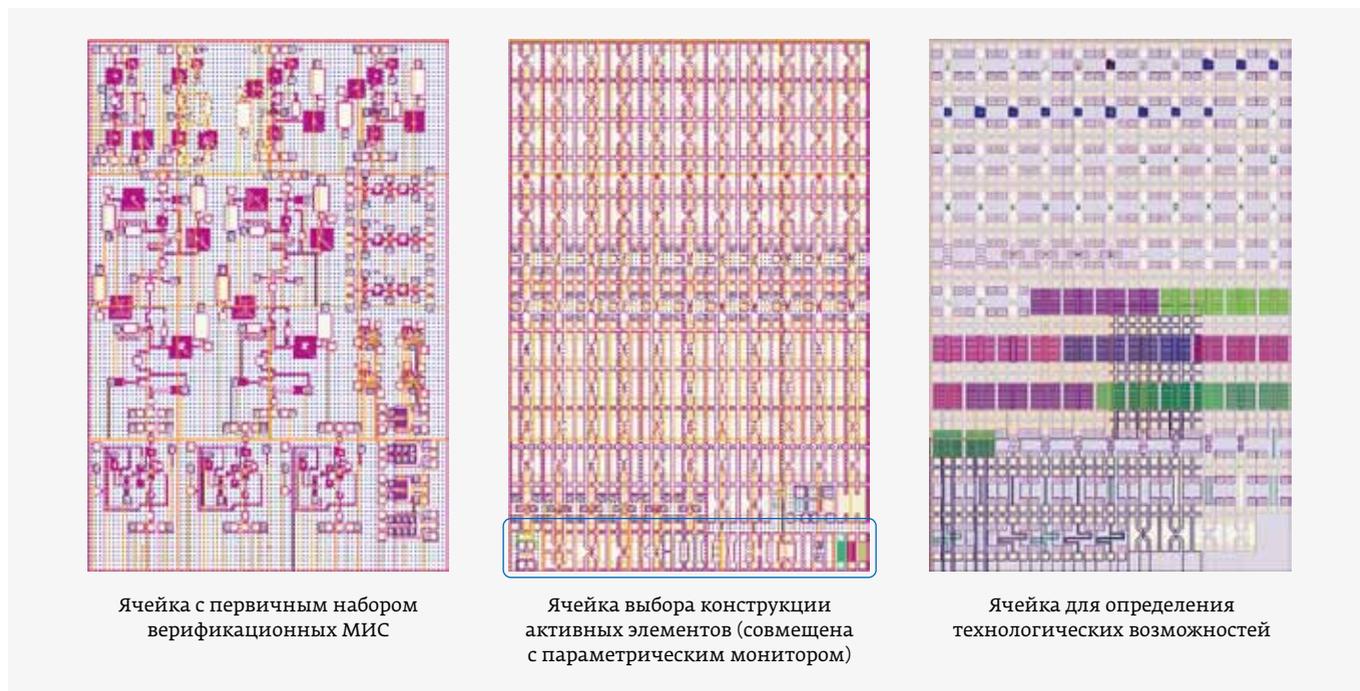


Рис. 3. Общий вид ячеек мультипликации, включаемых в состав пластин на стадии отработки технологического процесса и первичной верификации PDK

сформулированы не только требования к группам параметров будущих изделий, но и к параметрам межоперационного контроля в рамках каждого из технологических блоков. На стадии квалификации технологии проводится также анализ вклада каждого из технологических блоков в механизмы деградации (определение надежности) элементов библиотеки. Именно тут закладываются основы построения надежностных моделей, дающие разработчикам РЭА инструмент прогнозирования параметров надежности реальных устройств, проектируемых при помощи данной технологии. Именно поэтому зарубежные компании устанавливают «категории качества» (*Industrial, Military, Space*) применительно к снабженным правилами проектирования технологиям производства. Спроектированные и производимые при помощи таких технологий изделия в части параметров надежности соответствуют этим категориям **автоматически** (*technology defined reliability*).

Как видим, колоссальная работа (в том числе – и работа по построению самой системы стандартов для полупроводниковой индустрии), проделанная зарубежными фаундри-компаниями, остается вне поля зрения потребителей их услуг. Им, потребителям, остается только «наслаждаться плодами» этой работы, в том числе – конкурентной ценой на продукцию, которая складывается в результате сочетания высокого выхода годных (обусловленного высокой управляемостью и воспроизводимостью процессов) и роста объемов производства (приводящего к «классической» динамике снижения себестоимости

продукции). И выбор между разработкой компонентов (под эгидой СРПП!) внутри РФ и их покупкой на зарубежных фаундри представляется очевидным до момента, пока зарубежные фаундри доступны. Или – пока не появятся отечественные, с продукцией которых можно будет обращаться, как с импортной – просто испытывать в составе своей РЭА.

СМЕСЬ ФРАНЦУЗСКОГО С НИЖЕГОРОДСКИМ

Выше мы упоминали, что, несмотря на неуклюжую нормативную базу, из СРПП буквально по крупицам удается выуживать стандарты, хотя бы частично применимые к алгоритму разработки стандартных технологий, сформированному в соответствии с рекомендациями JEDEC. Этот алгоритм, неоднократно успешно реализованный у нас в компании, включает в себя:

- анализ требований групп применения СВЧ-модулей и определение класса технологического процесса;
- формулирование комплекса требований (структуры, состава, электрических параметров) к стандартным элементам библиотеки;
- формулирование требований к технологическому процессу изготовления набора стандартных элементов, в том числе (рис. 3):
 - к составу и параметрам тестовых структур параметрического монитора;
 - к составу и параметрам элементов «ячейки для определения технологических возможностей»,

- служащей для определения минимальных достижимых геометрических размеров (зазоров, ширин, перекрытий между слоями и т. п.);
- к составу и параметрам «ячейки выбора конструкции активных элементов», содержащей транзисторы с топологическими вариациями для определения оптимальных частотно-шумовых свойств и параметров на постоянном токе;
 - отработка блоков технологического процесса (в том числе процесса изготовления эпитаксиальной гетероструктуры), определение контрольных точек технологического маршрута и последовательности и методик межоперационного контроля;
 - изготовление макетов стандартных элементов и исследование их характеристик (предварительная экстракция параметров моделей);
 - доработка блоков технологического процесса и его характеристика, в том числе:
 - определение характеристик и измеряемых параметров технологического процесса;
 - определение и статистическое описание естественной изменчивости характеристик технологического процесса в пределах пластины (воспроизводимость) и от пластины к пластине (стабильность);
 - разработка макета библиотеки стандартных элементов и прототипа (демоверсии) комплексного инструмента проектирования (PDK) (рис. 4);
 - проектирование при помощи прототипа PDK первичного набора верификационных схем (ВС) для проведения первого этапа верификации и подтверждения функционального назначения и частотной области применимости PDK;
 - изготовление макета библиотеки стандартных элементов и первичного набора ВС;
 - проведение первого этапа верификации (сравнительных испытаний) библиотеки стандартных элементов с целью демонстрации качественного соответствия расчетных и фактически измеренных параметров ВС;
 - разработка типовых тестовых схем (ТС) и программ-методик их испытаний на воздействие внешних (в том числе специальных – при необходимости) факторов;
 - изготовление и предварительные испытания библиотеки стандартных элементов (в том числе ТС на той же пластине), определение параметров безотказности стандартных элементов и устойчивости ТС в ВВФ (СФ – при необходимости);
 - аттестация технологического процесса с целью проверки его соответствия требованиям технического задания (в том числе – демонстрация функциональных параметров группы применения на верификационных схемах);
 - экстракция параметров моделей библиотеки стандартных элементов, доработка PDK, разработка правил топологического проектирования (Layout Design Rule – заводских правил) и автоматической проверки соответствия им (Design Rule Check);
 - разработка СВЧ МИС из группы функционального применения (в том числе по заказам потребителей, например, в виде «пицца-проекта») для проведения второго этапа верификации (рис. 5);
 - изготовление (рис. 6) и проведение испытаний СВЧ МИС из группы функционального применения (второй этап верификации) с целью установления количественного соответствия расчетных и фактически измеренных параметров МИС (рис. 7);
 - выпуск стандартной технологии в тестовую эксплуатацию, заключение лицензионных соглашений с пользователями PDK.

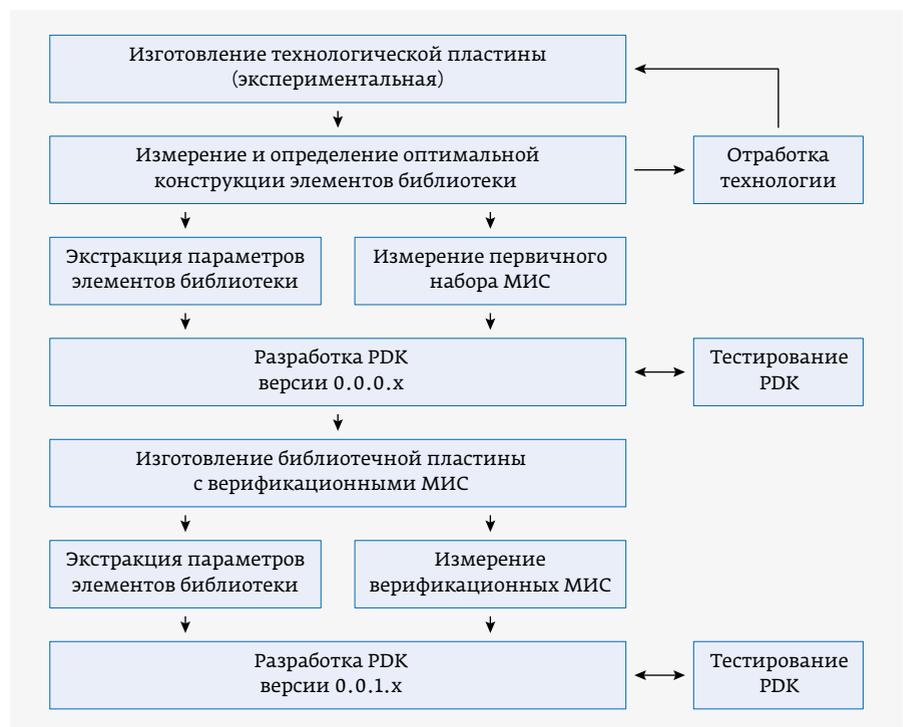


Рис. 4. Блок-схема процесса создания и верификации PDK

На практике, некоторые ветви указанного алгоритма зациклены итерационным образом (рис. 4), при этом переход к следующей стадии обработки происходит путем отслеживания выполнения статистических критериев посредством специально разработанной измерительно-информационной системы [11].

Важно отметить, что на текущий момент большинство процедур описанного выше алгоритма стандартизованы лишь на уровне предприятия и, в общем случае, «прохладно» воспринимаются контролирующими органами даже «гражданских» потребителей, не говоря уже о случаях, когда необходим контроль ВП. Просто же заказать и приобрести пластину с кристаллами у отечественного производителя, не проводя полноценную (с точки зрения СРПП) разработку, потребители не могут. Поэтому в структуре разрабатываемой к стандартной технологии документации необходимо было выделить «якорный» документ, хорошо знакомый всем участникам рынка и позволяющий хоть немного упростить процесс согласования на использование отечественных (!) комплектующих.

Таким документом стали Технические условия (ТУ) на набор стандартных элементов (библиотеку), изготавливаемых по типовому

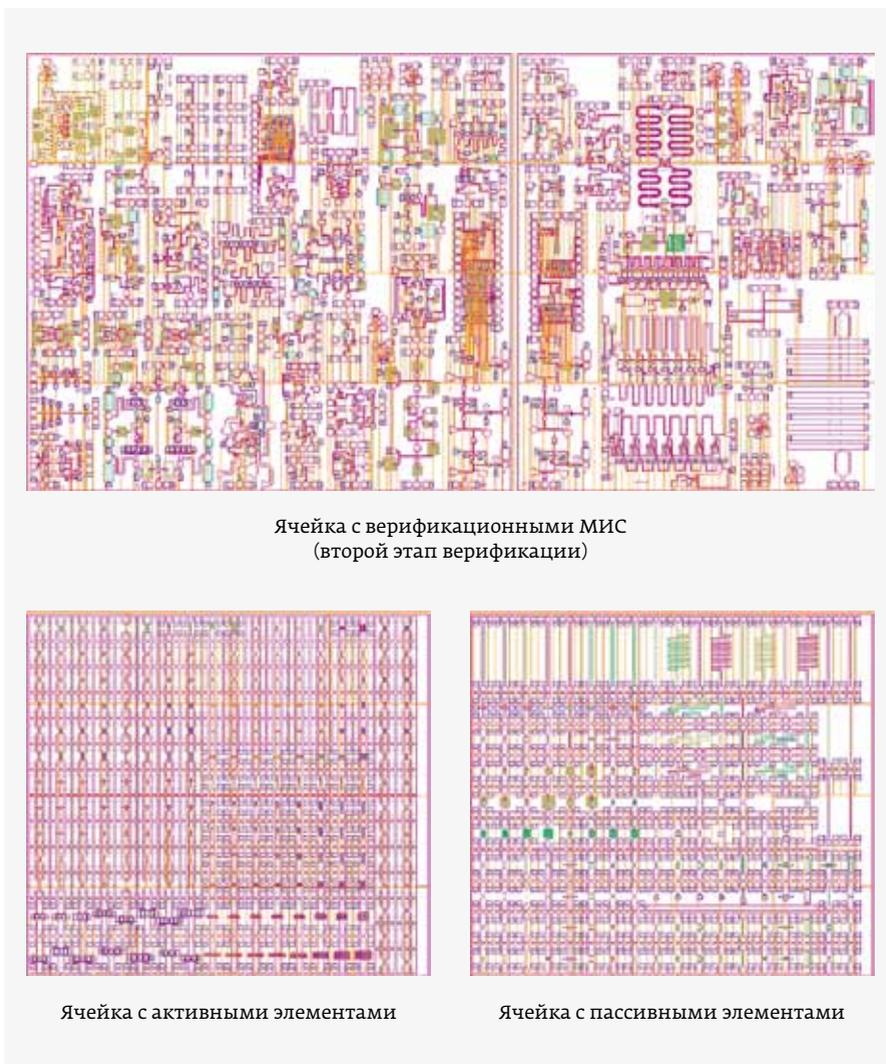


Рис. 5. Общий вид ячеек мультипликации, включаемых в состав пластин на стадии испытаний библиотеки стандартных элементов и вторичной верификации PDK

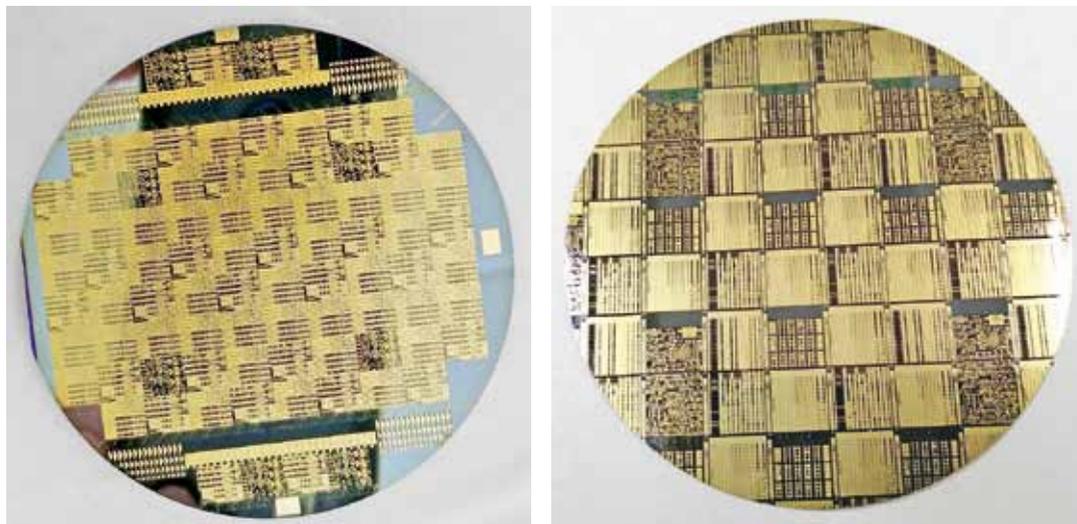


Рис. 6. Общий вид пластин после прохождения планарного цикла на стадиях обработки технологического процесса и первичной верификации PDK (слева) и испытаний библиотеки стандартных элементов и вторичной верификации PDK (справа)

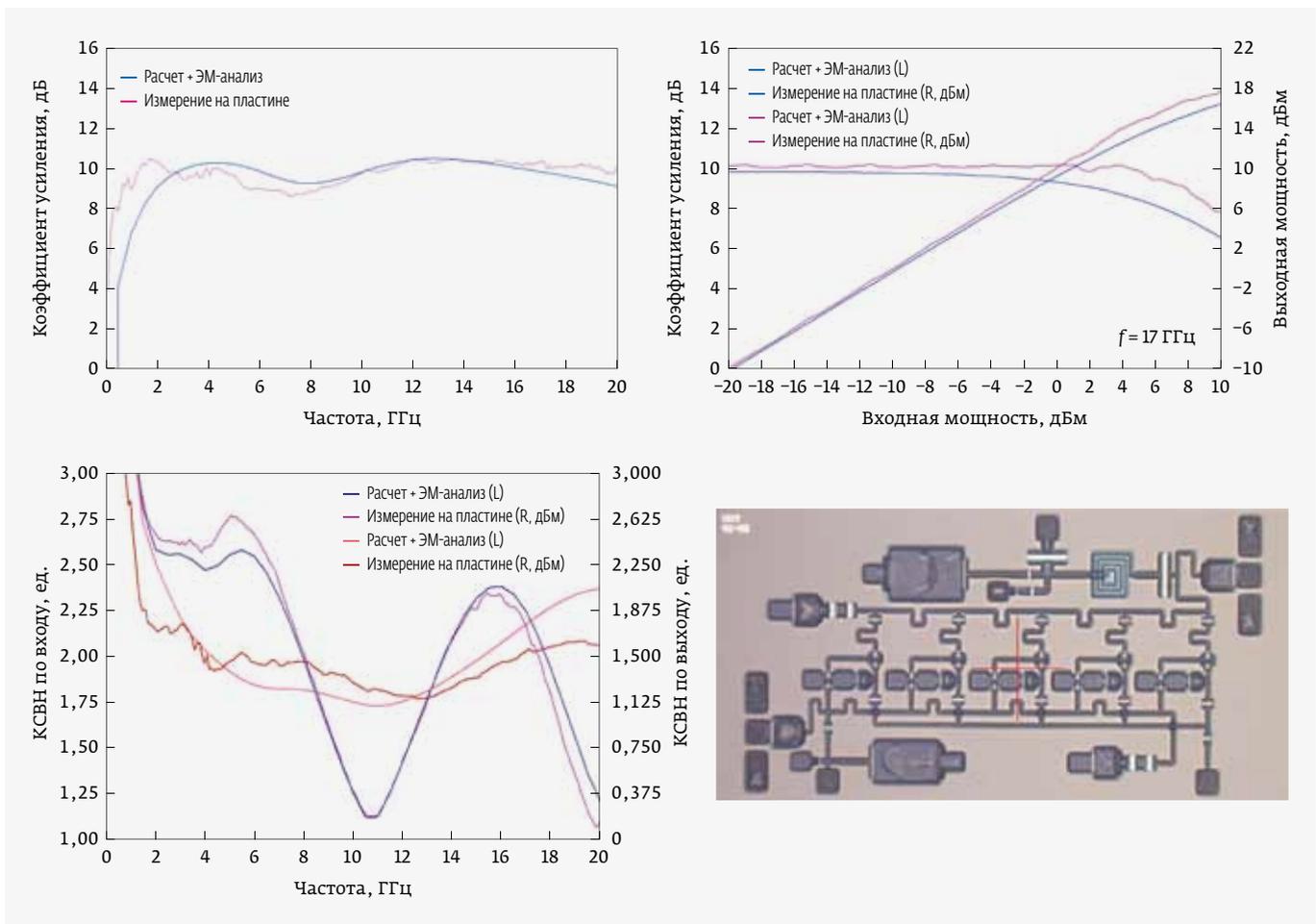


Рис. 7. Сходимость параметров и топология (справа внизу) широкополосного каскодного усилителя, использованного на втором этапе верификации PDK в составе стандартной технологии rHEMT05ED. Размер кристалла усилителя 3,0×1,5 мм

технологическому процессу и предназначенных для изготовления фабрикой твердотельных СВЧ-устройств (Изделий), спроектированных Потребителем. Назначение библиотеки, согласно ТУ «Топологическое проектирование Потребителем Изделий», последующая разработка КД на них и изготовление фабрикой Изделий по КД Потребителя. Предметом контракта в этом случае является изготовление по типовому технологическому процессу набора элементов согласно ТУ, соединенных между собой на поверхности и / или в объеме полупроводниковой пластины по КД Заказчика.

Описанная выше форма работы позволяет нам, хоть и не без шероховатостей, осуществлять взаимодействие с потребителями, «рискующими связаться с отечественным производителем». Достояна ли предложенная схема распространения в масштабах отрасли и справится ли она с ростом спроса в случае, если полное импортозамещение станет осознанной (или предписанной [12]) необходимостью?

Сравнительный анализ показывает, что в сложившейся организационно-правовой ситуации отечественные производители СВЧ ЭКБ до сих пор оказываются в неравном положении со своими зарубежными конкурентами. При поступлении запроса на проектирование и производство новых компонентов РЭА, они вынуждены вести разработку либо руководствуясь устаревшей и недостаточно гибкой нормативной базой СРПП, либо пытаться реализовать методологию фаундри, не имея возможности опереться на общепризнанные, стандартизованные государством процедуры. Несмотря на значительный технологический потенциал, отечественные компании могут не справиться с резко возросшей необходимостью импортозамещения в условиях запланированных на ближайшее время изменений критериев подтверждения производства продукции на территории РФ.

Для качественного изменения ситуации необходима коренная модернизация нормативной базы, в результате

которой участники рынка СВЧ ЭКБ получили бы взаимовыгодные, прозрачные и законодательно утвержденные правила взаимодействия:

- технологические компании и дизайн-центры, реализующие разработку и производство по методу фаундри – новые стандартизованные процедуры и комплекты нормативных документов, однозначно воспринимаемые потребителями и контролирующими органами (в том числе – ВП МО РФ), и полностью отражающие сущность разрабатываемой продукции (в том числе – модели и комплексные инструменты проектирования);
- потребители – гарантию получения в четко определенные сроки изделий с прогнозируемыми параметрами (в том числе – с наличием поведенческих моделей) и ценой, отражающей совокупность этих параметров, необходимую для конкретных условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://telesputnik.ru/materials/persony/interview/sergey-dolgopolskiy-gs-group-rossiyskoj-mikroelektronike-bridetsya-proyti-cherez-bolezennuyu-transf/>
2. <https://live24.ru/tehnologii/47974-intel-postroit-novye-fabriki-i-stanet-kontraktnym-proizvoditelem-poluprovodnikov.html>
3. https://quote.rbc.ru/news/short_article/616010c69a79472f4a6b5681
4. Semiconductor Foundry Market – Growth, Trends, and Forecast (2020–2025). Mordor Intelligence. www.mordorintelligence.com/industry-reports/semiconductor-foundry-market
5. <https://microwave-e.ru/market/svch-fabrika-faundri>
6. **Шпак В.** Старт дан. Теперь нужно набирать скорость// ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 2(203). С. 14
7. **Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П.** Физико-технологические аспекты построения foundry производства СВЧ ЭКБ: опыт АО «Светлана-Рост» // В сб. «Моковские чтения». 10-я Юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 2019.
8. Process characterization guideline. www.jedec.org/standards-documents/docs/jep-132
9. Guidelines for GaAs MMIC PHEMT/ MESFET and HBT Reliability Accelerated Life Testing, <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jep-118>
10. Foundry process qualification guideline. <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jp-00101>
11. **Калякин М. А., Красовицкий Д. М., Стрельников С. И., Филаретов А. Г.** // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 110.
12. Требования к промышленной продукции, предъявляемые в целях ее отнесения к продукции, произведенной на территории Российской Федерации. Приложение к постановлению Правительства РФ от 17 июля 2015 года N 719 с изменениями и дополнениями от 3 сентября 2021 года.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена за два тома 2420 руб.

СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Издание 3-е, исправленное

В 2-х книгах

Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В.

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схемотехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе — от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения. Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 18 глав.

Книга 1
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 782 с.,
ISBN 978-5-94836-605-0
Цена 1210 руб.

Книга 2
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 702 с.,
ISBN 978-5-94836-606-7
Цена 1210 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru