

УДК 621.382.029.64

**РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ СВЧ ДИАПАЗОНА**

А. Л. Ворожцов

*АО «Центральное конструкторское бюро автоматики», г. Омск, Россия  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена актуальным проблемам перехода к стандартизированным технологическим процессам в отечественной радиоэлектронной промышленности. Затронуты аспекты IDM (Integrated device manufacturer) и fables/foundry моделей организации мирового производства ЭКБ. Отмечены некоторые ключевые препятствия к дальнейшему развитию отечественной технологии СВЧ электроники.

**Ключевые слова:** стандартизированный технологический процесс, модель fables/foundry, отечественная ЭКБ СВЧ.

**DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-117-120****I. ВВЕДЕНИЕ**

С 50-х годов прошлого века и по настоящее время мировая электронная промышленность претерпела несколько качественных изменений в организации разработки и технологии производства радиокомпонентов. Можно выделить два этапа в развитии полупроводниковой промышленности – 30-летний этап становления, завершённый в середине 80-х годов прошлого века, и современный этап, протекающий по настоящее время. [1]

На первом этапе предприятия следовали принципу «самодостаточности» с низкой долей кооперации внутри отрасли. Электронные устройства и сервисы только начали проникать в жизнь большинства людей. Поэтому номенклатура выпускаемых компонентов была относительно невелика при достаточно больших тиражах. В первую очередь решались проблемы модернизации средств связи в армейских и силовых подразделениях, и постепенно шло внедрение электронных устройств в бытовые приборы и развития массового гражданского рынка. Перед предприятиями того периода ставились задачи создания устройств со строго заданными характеристиками, ориентированными на массовое производство. Условно такой подход к созданию новых компонентов можно охарактеризовать как главенство конструкции над технологичностью. Процесс разработки был основан на адаптации базовых технологий (прототипов) к индивидуальным технологическим маршрутам для производства конкретного изделия. Значительные затраты на обязательные корректировки технологических процессов в рамках этой адаптации для изготовления какой-либо уникальной конструкции оправдывались её массовыми тиражами. Ориентация на массовый выпуск продукции ставила перед предприятиями электронной промышленности задачу увеличения производственных мощностей и монополизации захваченных сегментов рынка. При этом на предприятиях нередко создавались участки по производству и осваивались технологии традиционно смежных отраслей в стремлении замкнуть технологический цикл изготовления всего изделия в рамках одного предприятия или корпорации. В англоязычной литературе такая модель организации бизнеса в полупроводниковой промышленности носит названия IDM (Integrated Device Manufacture, «комплексный производитель»). В результате уже в 70-х годах рынок электронных СВЧ компонентов контролировали несколько корпораций - гигантов, таких как Texas Instruments, Siemens и т.д. Создание научно-технологических кластеров (технополисов), таких как Силиконовая (кремниевая) долина в США или наукограды в Советском Союзе, вполне соответствовали духу эпохи. Это было разумно и оправдано.

Второй этап принято отсчитывать с 90-х годов, когда ситуация на рынке кардинально поменялась. Во-первых, значительно выросла номенклатура выпускаемых изделий и область их применения, а во-вторых, значительно снизились тиражи для каждой новой модели изделия. Это потребовало глубокого переосмысления и изменения организации поиска, а также производства новых конструкций и решений. Если во главу угла ранее ставилась разработка конструкции нового изделия, то теперь основные ресурсы стали направляться на достижение технологичности новых разработок, т.е. минимизации затрат при удовлетворительной воспроизводимости. Повышение функционала новых устройств и компонентов усложняло конструкцию, а значит и технологию их изготовления, в то время как массовый гражданский рынок требовал значительного снижения себестоимости продукции предприятий электронной промышленности и времени её выхода на рынок. Снижение затрат на разработку и внедрение в серию, а также ускорение выхода на рынок требовало уменьшения технологического цикла, особенно на этапе разработки изделия, при том что сложность изделий неизменно возрастала, а тираж и время уменьшались. Выходом из этой противоречивой ситуации стал отказ от попыток сделать всё своими силами, и появление новых организационных подходов в разработке новых технологий, а именно появление «fables/foundry» предприятий.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время можно отметить существование в производстве СВЧ ЭКБ (электронной компонентной базы) трёх организационных моделей.

Во-первых, это IDM (Integrated Device Manufacture) модель, которая практически сдала свои позиции по всему миру, за исключением нескольких корпораций-гигантов, таких как Intel, и подавляющего большинства отечественных предприятий размерами поменьше. В отечественной терминологии организации микроэлектронного производства к модели IDM ближе всего по значению понятия «научно-технологический комплекс» или «технопарк».

Во-вторых, это «fables» («бесфабричная») – модель, при которой компания-производитель радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) специализируется только на разработке, проектировании и продаже изделий, но не имеет собственных производственных мощностей. Одним из основоположников такого подхода стала компания Xilinx, образованная в 1984 и контролирующая сегодня половину мирового рынка программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В отечественной терминологии модель «fables» чаще всего звучит как «дизайн-центр» или, если точнее сказать, «дизайн-центр кристалльного уровня».

В-третьих, это «foundry» («кремниевая мастерская») – модель, при которой компания не занимается проектированием или продажей конечных изделий, а концентрируется главным образом на изготовлении пластин с элементами и последующим их тестированием. Ставшей первой такой в мире «независимой фабрикой» принято считать тайваньскую компанию TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation), основанную в 1987 г. В отечественной терминологии такая модель чаще всего звучит как калька с английского – «фаунд्री».

Смена приоритетов и отказ от итерационного подхода модели IDM, заключающегося в многоэтапной взаимной отработке новых конструктивно-технологических решений на каждом этапе разработки, и переход к внедрению некоторого отработанного ранее набора унификаций модели foundry сделали возможным идеологию «first pass success – успех с первой попытки», означающий по факту полное исключение из процедуры разработки итерационных циклов подгонки и многочисленной отработки конструкций, технологических маршрутов и параметров, условий и режимов отдельных операций для каждой новой модели.

Ключевым моментом в переходе от IDM к fables/foundry стало изменение и расширение понятия «базовый технологический процесс» (baseline process) – от прототипа или типового процесса к процессу стандартизованному. Теперь помимо самого технологического процесса как набора технологических операций и правил контроля их результата, в базовом (стандартизованном) процессе обязательно наличие библиотеки стандартных элементов, правил проектирования и инструмента проектирования (PDK) [2]. Причем PDK (process design kit) с библиотекой стандартных элементов, как правило, сопряжен с какой-либо системой автоматизированного проектирования ВЧ и СВЧ устройств с функцией 3D электромагнитного анализа, таких как NI AWR DE, Keysight ADS и т.п. Успех проектирования главным образом зависит не только от качества «3D-решателя» какой-либо САПР или доступной вычислительной мощности при этом, но и от начальных условий для моделирования, а именно уровня описания элементарных тонкопленочных элементов достигнутых технологий.

## III. ТЕОРИЯ

Для лучшего понимания причины неизбежного изменения роли технологии в моделях IDM и fables/foundry следует максимально упростить организацию процесса создания нового изделия и сосредоточить внимание только на уровнях конструирования и технологии изготовления, особенно на условном «интерфейсе» взаимодействия между ними на этапе проектирования. Таким «интерфейсом» можно назвать в модели IDM – базовый чертеж, а в fables/foundry – PDK. Ключевое отличие базового чертежа от PDK – «глубина» описания элементарного тонкопленочного элемента.

Базовый чертеж, формируемый на базе типовых процессов, содержит описание двумя группами параметров. Во-первых, это «геометрические» параметры, т. е. физические размеры элементов: длина, ширина, высота (толщина) и расстояния между ними. Во-вторых, это «электротехнические» параметры – электрическое сопротивление, индуктивность, ёмкость элемента. При этом нужно сказать, что если геометрическими параметрами заданы все интегральные элементы, сформированные на пластине, то электротехническими описывают не в полной мере и не каждый элемент. Главное допущение, характерное для базовых чертежей и типовых процессов, – это модель идеального проводника с нулевыми значениями емкости и индуктивности. Например, для тонкопленочного резистора будет задан только номинал его сопротивления без указания его индуктивности или емкости в силу малости последних и незначительного влияния на вольтамперные характеристики (ВАХ) этого резистора. Аналогично для микрополосковых линий не будет указано ни одного из электротехнических параметров. Нельзя не заметить, что для большинства радиоустройств 70-х годов XX века такое приближение было полностью оправдано, а отклонение полученных характеристик, вызванных неидеальностью сформированных элементов, компенсировалась введением подстроечных элементов и непосредственно этапом настройки. Но рост частоты радиоэлементов и стремление к увеличению функциональности устройств уменьшало габариты элементов и повышало плотность рисунка на пластине. Одним

словом, сложность пластин с элементами росла, а ресурсы (временные и материальные) на её разработку и внедрение в серию сокращались по причинам, указанным в начале статьи. Решение было очевидным: отказ от «идеальных приближений» и переход к «реальным» моделям тонкопленочных элементов. Такой переход требовал полного описания «электротехническими» параметрами и добавлением ещё групп – «радиотехнической», «статистической», «контрольно-измерительной» и др.

В PDK элементный топологический элемент стал описываться гораздо большим числом параметров. Во-первых, аналогично с базовым чертежом все элементы имеют размеры и расстояния. Во-вторых, все элементы имеют «электротехническое описание» для случая постоянного или низкочастотного тока. «Радиотехническое» описание характеризует элемент для ВЧ и СВЧ сигналов, как правило, это набор его S-параметров. «Статистическое» описание учитывает реальный разброс значений элемента при его физической реализации для прогноза при выборе наиболее оптимальных конструкторско-технологических решений. «Контрольно-измерительной» группой можно условно назвать результаты измерения множества физических величин: от геометрии до температурных зависимостей [3]. Очевидно, что чем больше верифицированных на практике параметров описывают тонкопленочный элемент, тем выше шанс его физической реализации с заданными характеристиками. Такая большая совокупность параметров, конечно, не могла уже быть выражена в рамках чертежа и нуждалась в автоматизации. PDK сегодня представляет собой сложный комплекс, включающий в себя программную часть – библиотеку стандартных элементов, созданную на базе аттестованного (стандартизированного) технологического процесса, сопряженную с САПР и руководство к проектированию. Любое неучтенное изменение в технологическом процессе неизбежно повлечет ошибку в описании стандартного элемента из библиотеки PDK и несоответствие результатов моделирования и изготовления. Учитывая все факторы, в библиотеку стандартных элементов PDK входят не все возможные в данной технологии элементы, а только те, которые обеспечивают нужные характеристики при должной воспроизводимости. Таким образом, конструктор, проектируя в САПР с подключенным PDK, опирается только на технологичные, отработанные на этапе стандартизации технологического процесса стандартизированные элементы. Именно в этом заключается смена приоритетов в модели *fables/foundry* и главенство технологичности над конструкцией.

Положительным эффектом такого подхода проектирования с первой попытки, исключая этапы макетирования, стала возможность у фабрик продавать свои технологические услуги, при условии, что процесс стандартизирован и имеет актуальный PDK. По факту, на современном мировом рынке электронных компонент перешли от сертификации конструкции к сертификации технологии. В нашей стране, такой переход пока не произошел.

#### IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие отечественных технологий производства электронных компонент СВЧ диапазона сдерживает приверженность государства к организационной модели IDM, малоэффективной в современном мире. IDM позиция нашего государства выражается в первую очередь в отсутствии нормативной базы, регламентирующей взаимодействия отечественных дизайн-центров и фабрик-производств в режиме *fables/foundry*, а именно продажу фабриками своих технологических услуг по изготовлению, разработанных в дизайн-центрах, компонент, без сертификации или сертификации по упрощенной форме, их конструкции. При таком подходе качество продукции фабрики для дизайн-центра гарантировалось бы не стандартизацией (сертификацией) каждого компонента, которой она изготовила, а стандартизацией технологического процесса, по которому они были произведены. Затраты на сертификацию любого компонента весьма существенны и будут рентабельны для фабрики только при больших объемах заказа на него, что, очевидно, крайне редко.

Помимо этого, в рамках программы по импортозамещению также реализуется IDM подход. Стремясь создать аналоги некоторым зарубежным микросхемам, государство финансирует проведение разработок отдельно взятых изделий, а не создание отечественных стандартизированных технологий по производству микросхем такого же класса. В России есть дизайн-центры способные удаленно от производства проектировать и размещать свои проекты на фабриках с новыми технологиями, разработанными и стандартизированными при помощи государства, с последующей оплатой заказов по стоимости изготовления. Но нет проектов ни в оборонной, ни в гражданской промышленности с таким объемом финансирования, чтобы покрыть стоимость создания перспективной технологии, вложенной в цену нескольких десятков или сотен новых микросхем. Такое положение дел в российской электронной промышленности не является чем-то уникальным, а носит общемировой характер уже примерно 30 лет. Зарубежные компании в конце 80-х годов нашли выход и источник дальнейшего развития в концепции *fables/foundry*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Пушница И. С., Стрельников С. И., Фазылханов О. Р., Филаретов А. Г. Практика разработки и верификации инструментов проектирования (PDK) СВЧ МИС // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ–2018): материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. 17–18 апр. 2018 г. Омск, 2018.

3. Аникин А. В., Дёмин С. В., Столяров А. А. Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН // Труды НИИСИ РАН. 2014. № 1. С. 4–17.

УДК 621.372.54

## АКТИВНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В. В. Ерохин, К. В. Мурасов, С. А. Завьялов

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

**Аннотация.** В данной статье описывается активный перестраиваемый полосовой фильтр в интегральном исполнении для использования в качестве сложно-функционального (СФ) блока в технологиях типа система-на-кристалле (СнК) или как полноценное самостоятельное устройство. Фильтр разработан в стандартном технологическом процессе БиКМОП кремний-германий (SiGe) 250 нм. Разработаны схематехническое и топологическое описание, произведены экспериментальные образцы, разработана и произведена оснастка для дальнейших испытаний экспериментальных образцов. Площадь разработанного топологического описания 0.22 мм<sup>2</sup> (без контактных площадок, которое используется в качестве СФ блока), площадь произведенного экспериментального образца 0.99 мм<sup>2</sup> (с контактными площадками для испытаний и проверки реальных характеристик фильтра). Произведены многочисленные компьютерные моделирования экстракции топологического описания активного полосового фильтра. В результате моделирования было выявлено, что характеристики разработанного фильтра полностью соответствует техническому заданию: коэффициент усиления по напряжению в полосе пропускания не менее 11.93 дБ, коэффициент нелинейных искажений в полосе пропускания не более 5.82 %, верхняя частота среза перестраивается от 0.5 до 3.0 ГГц. Полосовой фильтр сохраняет рабочие характеристики в температурном диапазоне от -40 °С до +85 °С.

**Ключевые слова:** *кремний-германий, БиКМОП 250 нм, полосовой фильтр, система-на-кристалле, топологическое описание, оснастка.*

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-120-126

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полосовые фильтры являются неотъемлемой частью любых электронных систем. Полосовые фильтры диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) применяют в различной телекоммуникационной аппаратуре, в том числе в аппаратуре спутниковой и мобильной связи, в технологиях беспроводного доступа в интернет, радиолокации, радионавигации и др.

Бурное развитие микроэлектроники позволило значительно снизить массогабаритные размеры и стоимость беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что в свою очередь способствует повсеместному их использованию. В настоящее время БПЛА используются как в военной сфере для ведения боевых действий, разведки, так и в гражданских сферах для доставки грузов, наблюдения за территориями и объектами, в геодезии для картографии, в сельском хозяйстве для наблюдения и обработки полей. Сферы применений БПЛА и их количество растут в геометрической прогрессии. Согласно оценкам аналитиков Euroconsult, к 2025 году в мире будут использоваться порядка 600 тыс. БПЛА. В условиях большой плотности БПЛА, чтобы летательные аппараты не сталкивались друг другом, с птицами и со строениями они должны быть оснащены передовыми технологиями радиолокации. К таким технологиям предъявляются особенные требования, в частности малое потребление мощности, так как энергоресурс летательных аппаратов сильно ограничен. Решениями проблемы энергопотребления является применение энергоэффективных интегральных приемопередатчиков или применение интегральных пассивных радаров. Пассивные радары не излучают сигнала, а только принимают сигнал испускаемый объектом или отраженный от объекта. При отсутствии передатчика дрон сложнее обнаружить, что непременно может быть полезно для использования в военной сфере. Основной регион применения БПЛА с пассивным радаром это городская местность, в которой СВЧ диапазон заполнен сигналами различных бытовых устройств: радио, сигнализация, мобильная связь, Wi-Fi и другие. В любом из перечисленных случаев система радиолокации БПЛА требует наличия полосового фильтра СВЧ диапазона.