ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ IPD В РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА L-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

А.Л. Ворожцов, А.А. Иванов, И.М. Петренко

Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация

Доклад посвящен актуальной задаче перехода к стандартизированным технологическим процессам в отечественной радиоэлектронной промышленности и внедрению таких средств разработки радиоустройств, как PDK (Process Design Kit). Затронуты аспекты IDM (Integrated device manufacturer) и fabless/foundry моделей организации производства электронных компонент. Приведен пример успешной реализации полосового фильтра L-диапазона частот по технологии интегрированных пассивных устройств IPD (Integrated Passive Devices) на российском предприятии.

Ключевые слова: fabless/foundry, PDK (Process Design Kit), IPD (Integrated Passive Devices).

EXPERIENCE OF APPLICATION OF DOMESTIC IPD IN THE IMPLEMENTATION OF A BANDPASS FILTER L-RANGE FREQUENCY

A.L. Vorozhtsov, A.A. Ivanov, I.M. Petrenko

Central Design Bureau of Automation, Omsk, Russian Federation

The report is devoted to the urgent task of the transition to standardized technological processes in the domestic radio-electronic industry and the introduction of such radio device development tools as PDK (Process Design Kit). The aspects of IDM (Integrated device manufacturer) and fabless / foundry models for organizing the production of electronic components are affected. An example of successful implementation of an L-band pass-band filter using the technology of integrated passive devices IPD (Integrated Passive Devices) at a Russian enterprise is given.

Keywords: fabless/foundry, PDK (Process Design Kit), IPD (Integrated Passive Devices).

Введение

Развитие технологий производства дискретных радиоэлементов, освоение интегральных (планарных) технологических процессов и широкое внедрение интегральных и гибридно-интегральных схем (ИС и ГИС) в производство радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) сделали возможным появление рынка гражданской электроники широкого применения. Но на этот момент мировая радиоэлектронная промышленность ещё была направлена на узкий рынок специального назначения (армия, космос), и возможности увеличить производственные мощности и охватить весь огромный явленный потенциал гражданского применения РЭА, от бытовых приборов и мобильной связи до автомобилестроения, ни у кого тогда не было. Корень противоречий крылся в особенностях организации процесса разработки и производства РЭА для специального и гражданского применения [1].

Ранее, с 1950-х годов, в мировой электронной промышленности господствовала организационная модель IDM (Integrated Device Manufacture – «комплексный производитель»). В то время предприятия следовали принципу «самодостаточности» с низкой долей кооперации внутри отрасли. Электронные устройства и сервисы только начали проникать в гражданскую жизнь большинства людей. Поэтому номенклатура выпускаемых компонент была относительно невелика при достаточно больших тиражах. Процесс разработки был основан на адаптации базовых технологий (прототипов) к индивидуальным технологическим марш-

рутам для производства конкретного изделия заданной конструкции. Значительные затраты на обязательные корректировки технологических процессов в рамках этой адаптации для изготовления какой-либо новой и уникальной конструкции оправдывались её массовыми тиражами и долгосрочным производством в дальнейшем. Ориентация на массовый выпуск продукции ставила перед предприятиями электронной промышленности задачу увеличения производственных мощностей и монополизации захваченных сегментов рынка. При этом на фабриках 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 результате уже в 1970-х годах рынок электронных ВЧ и СВЧ компонент контролировали несколько корпораций-гигантов, таких как Texas Instruments, Siemens и т. д.

Время качественных перемен в организации разработки и производства компонент и РЭА принято отсчитывать с 1980-х годов, с преобладания гражданского сегмента и кардинального изменения ситуации на рынке. Во-первых, значительно выросла номенклатура выпускаемых изделий и область их применения, а во-вторых, снизились тиражи для каждой новой модели изделия. Это потребовало глубокого переосмысления и изменения организации поиска, а также производства новых конструкций и технологических процессов. 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. Но в то же время повышение функционала новых устройств усложняло конструкцию, а значит, и технологию их изготовления, при этом массовый гражданский рынок требовал значительного снижения себестоимости и времени выхода в продажу. 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 сроки уменьшались. Выходом из этой противоречивой ситуации стал отказ компаний от попыток сделать всё своими силами, и появление иных организационных подходов в разработке новых технологий.

Далее в статье будет показана необходимость стандартизации технологических процессов для развития таких современных инструментов разработки, как PDK (Process Design Kit). Будет приведен пример успешной реализации миниатюрного полосового фильтра (ПФ) L-диапазона по технологии IPD (Integrated Passive Device) на отечественном предприятии в режиме fabless/foundry.

Постановка задачи

В настоящее время в радиоэлектронной промышленности присутствует три формы организации компаний и предприятий.

Во-первых, это IDM модель, которая практически сдала свои позиции по всему миру, за исключением нескольких корпораций-гигантов, таких как Intel или Samsung, и подавляющего большинства российских предприятий. В отечественной терминологии к модели IDM ближе всего по значению понятия «научно-технологический комплекс» или «технопарк».

Во-вторых, это «fabless» («бесфабричная») – модель, при которой компания-производитель ИС или устройств специализируется только на разработке, проектировании и продаже своих изделий, но не имеет собственных производственных мощностей. В отечественной терминологии модель «fabless» чаще всего звучит как «дизайн-центр» или «дизайн-центр кристального 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. В отечественной терминологии такая модель чаще всего звучит как калька с английского – «фаундрии» или близкое по смыслу «фабрика».

Важным шагом в отказе от итерационного подхода в разработке новых элементов РЭА в модели IDM и развития концепции «first pass success – успех с первой попытки», реализованной в fabless/foundry, стали стандартизация технологических процессов и изменение самого понятия «базовый технологический процесс» (baseline process) [2]. Теперь, после стандартизации, базовый технологический процесс включал в себя не только саму технологию производства ИС как совокупность технологических операций и методов межоперационного контроля, а был значительно расширен за счет PDK с правилами проектирования и библиотекой стандартных элементов. Как правило, PDK был интегрирован в систему автоматизированного проектирования (САПР) ВЧ и СВЧ устройств с функцией 3D электромагнитного (ЭМ) анализа. Точность расчётов при проектировании зависит не только от вычислительных возможностей «3D ЭМ решателей» САПР, которые, нужно отметить, с 1990-х растут гигантскими темпами, но и также от начальных условий для ЭМ моделирования, а именно от достоверности и полноты описания воспроизводимых технологией элементов. Между проектированием и изготовлением всегда есть инструмент для конструирования, описывающий технологические возможности производства, и ключевым моментом смены организационных моделей стало развитие такого инструмента в IDM от базового чертежа до PDK в модели fables/foundry.

Теория

Базовый чертеж содержит описание элемента двумя группами параметров. Во-первых, это геометрические размеры элемента на пластине (длина, ширина, высота (толщина)), включая позиционирование на пластине. Во-вторых, это «электротехнические» параметры – электрическое сопротивление, индуктивность, ёмкость элемента. При этом нужно сказать, что если геометрическими параметрами описаны все интегральные элементы, сформированные на пластине, то электротехническими заданы не в полной мере и не для каждого элемента. Главное допущение, характерное для базовых чертежей и типовых тех.процессов, – это модель идеального проводника с нулевыми значениями емкости и индуктивности. Например, для тонкоплёночного резистора будет задан только номинал его сопротивления без указания значений его индуктивности или емкости в силу малости последних и незначительного влияния на вольтамперные характеристики этого резистора. Аналогично проводники или микрополосковые линии будут также считаться идеальными без приведения своих 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 этапа настройки после изготовления. Но рост рабочей частоты и стремление к увеличению функциональности устройств уменьшало габариты элементов и повышало плотность рисунка на ИС, что затрудняло настройку многократно. Одним словом, сложность ИС с элементами росла, а ресурсы (временные и материальные) на её разработку и внедрение в серию сокращались. Решение стало очевидным: отказ от «идеальных приближений» и переход к «реальным», более точным моделям тонкоплёночных элементов. Такой переход требовал не только полного описания «электротехническими» параметрами, но и добавления новых групп – «радиотехнической», «статистической», «контрольно-измерительной» и др.

В результате в PDK элементарный топологический элемент стал описываться большим числом параметров. Аналогично с базовым чертежом все элементы в PDK имеют размеры и позиционирование, а также всем элементам задано «электротехническое описание» для случая постоянного или низкочастотного тока. «Радиотехническое» описание характеризует элемент из PDK для ВЧ и СВЧ сигналов, это, как правило, 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 ре-

зультаты измерения множества физических величин: от геометрии элементов до температурных зависимостей. Очевидно, что чем больше верифицированных на практике параметров описывают тонкоплёночный элемент, тем выше шанс его физической реализации с заданными характеристиками. Такая большая совокупность параметров, конечно, не могла уже быть выражена в рамках базового чертежа и нуждалась в виртуализации. Сегодня PDK – это сложный комплекс, прошедший несколько этапов верификации и включающий в себя как программную часть – библиотеку стандартных элементов, созданную на базе стандартизированного технологического процесса и интегрированную в САПР, так и руководство по проектированию [3]. Учитывая в процессе стандартизации технологического процесса все факторы из всех групп параметров, в библиотеку стандартных элементов PDK входят не все возможные в данной технологии элементы, а только те, которые обеспечивают определенный набор нужных характеристик с высокой и определенной вероятностью. Таким образом, конструктор, проектируя изделие в САПР с PDK, использует только набор стандартных элементов, которые были отработаны на этапе стандартизации технологического процесса. Именно в этом заключается смена приоритетов в модели fabless/foundry и установления главенства технологичности над конструкцией.

Важен тот факт, что любое неучтенное изменение в технологическом процессе, в том числе и положительное, неизбежно приведет к потере актуальности PDK, а значит, к потере достоверности описания стандартного элемента из библиотеки PDK и к неизбежным расхождениям результатов моделирования и изготовления.

Все эти строгости, многообразие описания сделали возможным успешное проектирование с первой попытки, исключая этапы настройки и макетирования, а у фабрик (foundry) появилась возможность продавать свои – не сами изделия (сертифицированные), а технологические услуги по их изготовлению, при условии, что технологический процесс стандартизирован и имеет актуальный PDK. По факту на современном мировом рынке электронных компонент переходят от сертификации каждой конструкции (модели) изделия к сертификации технологии изготовления.

Наглядным примером эффективности модели fabless/foundry и успешного проектирования с первой попытки может служить технология интегрированных пассивных устройств IPD (Integrated Passive Device). Возникшая в полупроводниковом производстве ИС и ориентированная на реализацию фильтров, устройств согласования и симметрирования (BALUN's), направленных ответвителей и делителей мощности, технология IPD демонстрирует сегодня наибольшие успехи в миниатюризации большинства пассивных устройств, в том числе фильтров [4].

Результаты эксперимента

Ранее, в [5], нами была показана целесообразность применения технологии IPD в реализации полосового фильтра L-диапазона на квазисосредоточенных элементах для его максимальной миниатюризации. Современный рынок foundry-услуг по изготовлению IPD устройств представляют несколько крупных фабрик: Win Semiconductors (Тайвань), OMMIC (Франция), АО «Светлана-Рост» (Россия) и другие. Каждое предприятие имеет свою линейку PDK для разных техпроцессов и технологий. Как правило, зарубежные фабрики обладают более передовыми технологическими процессами, но нестабильный курс рубля, необходимость импортозамещения и существенно меньшие финансовые затраты размещения заказа в РФ остановили наш выбор на АО «Светлана-Рост» с PDK на базе стандартного технологического процесса изготовления GaAs микросхем по технологии pHEMT 0,5 мкм.

Для автоматизации синтеза схемы фильтра применялся модуль iFilter, входящий в состав САПР NI AWR Design Environment v13 (AWR DE). Для получения заданных характеристик в модуле iFilter были синтезированы несколько вариантов схем. Наиболее оптимальной, удовлетворяющей всем требованиям получилась схема ПФ Чебышева седьмого порядка.

Синтезированные схемы редко удовлетворяют сразу всем предъявляемым требованиям, но, используя встроенную функцию оптимизации Optimizer Goals программного комплекса AWR DE, можно задать параметры граничных условий функций для оптимизации. Так, для схемы ПФ критериями оптимизации стали коэффициент передачи (S_{21}), границы полосы пропускания и КСВН (VSWR). Оптимизация в AWR DE проходит в автоматическом режиме путём перебора значений параметров элементов схемы в заданных пределах, что значительно упрощает процесс проектирования устройств.

После оптимизации производилась замена «виртуальных» элементов схемы на «реальные», из PDK. Пассивные компоненты в библиотеке стандартных элементов PDK_rHEMT05_v.0.0.2.2 АО «Светлана-Рост» представлены моделями диодов, конденсаторов (МДМ и встречно-штыревых), резисторов, индуктивностей (круглых, квадратных, масштабируемых), контактных площадок, микрополосковых линий и других. Все модели элементов в PDK верифицированы в частотном диапазоне от 0 до 20 ГГц.

Для улучшения внеполосного подавления и согласования фильтра в схему Чебышева 7-го порядка было добавлено по одному МДМ конденсатору малой емкости на входы фильтра. Финальная схема ПФ составила 11 конденсаторов и 9 катушек индуктивностей. Конструирование топологии схемы производилось в соответствии с правилами топологического проектирования PDK, с учетом взаимного электромагнитного влияния элементов и требования по минимизации габаритных размеров. На рис. 1 приведена 3D топология разрабатываемого ПФ с введенными библиотечными элементами PDK.

Рис. 1. 3D вид разработанного фильтра

Анализ схемы ПФ после введения элементов PDK показал, что ее параметры изменились и теперь не удовлетворяют техническим требованиям. На искажение характеристик повлияло внесение в схему дополнительных топологических элементов: микрополосковые линии передачи между катушками и конденсаторами, переходные отверстия, контактные площадки, которые внесли в схему свои собственные паразитные индуктивности и емкости. Для улучшения характеристик и компенсации паразитных эффектов схема ПФ была повторно оптимизирована.

Наиболее точные и достоверные данные получаются при электродинамическом подходе к анализу схемы ПФ с учетом и поправками на фактические параметры реальных элементов схемы, определённым стандартизированным технологическим процессом при их изготовлении. Для создания ЭМ структур элементов схемы служит ЭМ симулятор и инструмент EXTRACT, входящий в состав библиотеки PDK и позволяющий выбрать элементы схемы для экстракции, шаг сетки и электромагнитный симулятор. ЭМ анализ схем занимает

большую часть временных затрат на проектирование фильтра. Для ЭМ расчета ПФ был применён 2,5D симулятор AXIEM из состава AWR DE. Данные ЭМ расчета фильтра показали хороший результат и после небольшой коррекции номиналов элементов схемы, проект полосового фильтра полностью соответствовал требованиям. После генерации файла по-слойной топологии ПФ в формате DXF проект был передан на отечественную фабрику АО «Светлана-Рост» для изготовления. Габаритные размеры разработанного полосового фильтра L-диапазона по технологии IPD составили 3700x1560x100 мкм. Маршрут создания ПФ по технологии IPD представлен в виде блок-схемы на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема разработки проекта

На рис. 3 изображен изготовленный IPD кристалл полосового фильтра L-диапазона на фоне монеты для наглядной оценки габаритов.

Рис. 3. Изготовленный IPD ПФ

Результаты измерения фильтра и данные ЭМ моделирования приведены на рис. 4 и 5. Полученные характеристики в диапазоне частот до 20 ГГц подтвердили достоверность результатов ЭМ расчета схемы ПФ на базе элементов PDK по технологии IPD.

Рис. 4. АЧХ фильтра (пунктир – модель, сплошная – образец)

Рис. 5. КСВН в полосе фильтра (пунктир – модель, сплошная – образец)

Статистические данные измерений нескольких сотен годных IPD кристаллов фильтров показали очень близкие характеристики между образцами с редкими и небольшими отклонениями. Так, большинство ПФ имели величину вносимых потерь на центральной частоте – 3,38 дБ, минимальное достигнутое значение составило – 3,13 дБ, а максимальное – 3,6 дБ при заложенном в модели уровне 3,5 дБ.

Заключение

Развитие отечественных технологий производства электронных компонент ВЧ и СВЧ диапазона сдерживает приверженность большинства предприятий, а в первую очередь самого государства к организационной модели IDM, малоэффективной в современном мире. IDM позиция нашего государства выражается, во-первых, в отсутствии нормативной базы, регламентирующей взаимодействия отечественных дизайн-центров и фабрик-производств в режиме fabless/foundry, а именно продажу фабриками своих технологических услуг по изготовлению разработанных в дизайн-центрах компонент, без сертификации или с сертификацией по упрощенной форме, их конструкции. При таком подходе качество продукции

фабрики для дизайн-центра гарантировалось бы не сертификатом каждого компонента, которой она изготовила, а стандартом на технологический процесс, по которому они были произведены. Затраты на сертификацию любого компонента весьма существенны и будут рентабельны для фабрики только при больших объёмах заказа на него, что, очевидно, крайне редко.

Во-вторых, в рамках программы по импортозамещению, стремясь создать аналоги некоторым зарубежным микросхемам, наше правительство 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 объёмом 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, но зарубежные компании в конце 1980-х годов нашли выход и источник дальнейшего развития в стандартизации технологических процессов, от базового чертежа до PDK и к переходу к модели *fables/foundry* и проектированию с первой попытки.

Настоящая работа – пока еще редкий, тем не менее успешный пример полностью отечественной реализации концепции *fables/foundry*, являющейся в настоящее время общемировой практикой разработки и создания новых решений и устройств. Разработанный по технологии IPD полосовой фильтр L-диапазона показал очень хорошее совпадение результатов моделирования и измерений.

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): матер. VII Всерос. науч.-техн. конф. (Омск, 17–18 апреля 2018 г.)*. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 216–227.
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. 4–16.
4. *Kai Liu, Robert C. Frye, Roger Emigh*, Miniaturized Ultra-Wideband band-pass-filter from silicon integrated passive device technology // *Microwave Symposium Digest*, 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5165882>.
5. *Иванов А.А., Петренко А.И.*, Миниатюризация широкополосных трактов промежуточной частоты // *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ – 2010): матер. III Всерос. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 91–97.*