ДМИТРИЙ КРАСОВИЦКИЙ, АЛЕКСЕЙ ФИЛАРЕТОВ, ВИКТОР ЧАЛЫЙ, АО «Светлана-Рост», info@svrost.ru

ПЕРВАЯ ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СВЧ-ФАБРИКА – «ФАУНДРИ» С ВОЕННОЙ ПРИЕМКОЙ:

МЕТОДОЛОГИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Электронная компонентная база (ЭКБ) является основой развития и поддержания конкурентоспособности всех современных высокотехнологичных систем и устройств. Предлагаемая вниманию статья открывает серию публикаций, посвященных проблемам, методологии и конкретным результатам внедрения в «отдельно взятой компании» прогрессивной технологической парадигмы. Распространение и дальнейшее развитие полученного опыта способно изменить структуру всей отечественной твердотельной СВЧ-микроэлектроники, превратив ее в эффективный инструмент обеспечения технологической независимости государства.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного индустриального общества определяется категориями, многие из которых появились всего несколько десятков лет назад. Искусственный интеллект, большие данные, «Интернет вещей» — основой бурного развития этих и многих других направлений научно-технического прогресса является постоянная, ускоряющаяся эволюция твердотельной электроники. Именно она обеспечивает работоспособность всех «органов» перспективных сложных систем — «мозга» (процессор), «органов чувств» (сенсорика), «сердца» (источники питания), «конечностей» (манипуляторов и других периферийных устройств), и, естественно, «нервной системы» (телекоммуникаций). Уровень развития high-tech-индустрии уже давно превалирует при определении места страны в мировой экономике над такими традиционными факторами, как наличие природных богатств и территорий, и в том числе непосредственно влияет на ее обороноспособность.

Отечественная микроэлектронная отрасль переживает непростые времена. В определенный период утратив позиции, завоеванные СССР в изнурительной гонке вооружений, долгие десятилетия наши предприятия пытались поддерживать конкурентоспособный уровень производимых изделий за счет оригинальных конструктивных решений (зачастую действительно блестящих), при этом экономя на вложениях в развитие технологий. В какой-то момент потепление политического климата и глобализация экономики дали обманчивую надежду «обойтись» технологическими ресурсами международных партнеров, однако этот период оказался недолгим. Недолгим, но достаточным для того, чтобы отечественная микроэлектроника упустила из виду два важнейших тренда на пути поддержания конкурентоспособности производимой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Первый заключается в усиливающейся переориентации разработчиков РЭА на изделия ЭКБ специализированного — видового и межвидового — применения (в англоязычной литературе: Application Specific Integrated Circuits — ASIC), доля которых к 2018 превысила 50% и продолжает нарастать (рис. 1) [1]. Второй — качественное изменение роли технологий, выделение их в самостоятельный объект стандартизации и последовавшее за этим разделение ответственностей между разработчиками изделий ЭКБ и технологическими предприятиями («фабриками»), их изготавливающими. Мировая полупроводниковая микроэлектронная промышленность перешла вслед за металлургией на модель организации производственного процесса, называемый «фаундри» (от foundry — «литейное производство»).

И теперь, когда на всех уровнях осознана и неоднократно подтверждена необходимость реализации принципа *«опережающего импортозамещения»* ЭКБ, становится очевидным, что кратного увеличения финансирования разработок изделий уже недостаточно. Необходимо вкладываемые средства направить на восстановление и реализацию в современных отечественных условиях прогрессивной технологической парадигмы, призванной мультиплицировать эффект от вложений, основываясь на мировом опыте. Особенности

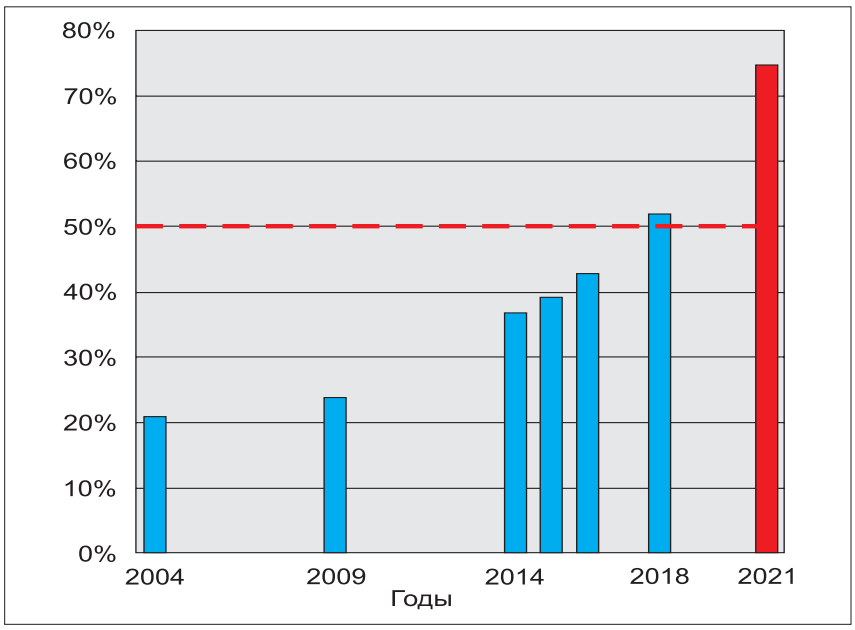

Рис. 1. Рост доли специализированных интегральных схем (ASIC) в общем объеме производства

реализации этой парадигмы, а также первые достижения на этом, оказавшемся довольно тернистом пути и освещены в настоящей статье.

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Уже более 30 лет ведущие мировые научно-производственные центры полупроводниковой микроэлектроники широко применяют принцип «фаундри», основанный на стандартных (то есть являющихся самостоятельным объектом стандартизации) технологиях и разделении ответственности между конструкторским и технологическим «крыльями» разработки, связанными в то же время четко сформулированными правилами и инструментами взаимодействия, так называемыми комплексными инструментами проектирования (Process Design Kit — PDK) [2]. PDK учитывает, с одной стороны, топологические ограничения и естественную изменчивость технологического процесса, а с другой — содержит всеобъемлющую информацию о параметрах стандартных элементов — физических объектов, создаваемых в данном технологическом процессе. Эта комплексная информация используется для проектирования в САПР целых классов конструктивно и технологически подобных устройств, которые затем изготавливаются по единому, неизменному технологическому процессу (рис. 2).

Рис. 2. Foundry — способ организации производственного процесса

Важно, что принцип «фаундри» кардинальным образом перераспределяет ответственность за результаты разработки и производства изделий, что непосредственно отражается в организационной схеме проведения испытаний. Предметом договора между разработчиком ЭКБ (им может выступать как соответствующее подразделение разработчика РЭА, так и внешний дизайн-центр) и фабрикой является продажа *технологических услуг*, включающих предоставление PDK, согласование проекта, изготовление технологической оснастки и пластин с неразделенными кристаллами. Причем фабрика гарантирует лишь полное соответствие *технологического процесса* критериям, уставленным при его *квалификации* (процедуры которой описаны специальными стандартами, например, JEDEC JEP132 [3]). В зависимости от набора критериев технологические процессы могут быть квалифицированы для производства ЭКБ различного назначения: от общего (категория *General Purpose*) и промышленного применения (*Industrial*) до военного (*Military*) и космического (*Space*). Разумеется, разработчик может заказать у фабрики *дополнительные услуги*, например, разделение пластины на кристаллы или контроль выходных параметров заказанных кристаллов (в том числе сплошной контроль с разбраковкой по согласованным с фабрикой процедурам и параметрам). Однако ответственность за соответствие полученных выходных параметров проектным лежит *на разработчике*. На первый взгляд, такая схема распределения ответственности за результат может выглядеть со стороны непривычно, сильно смещенной в сторону разработчика ЭКБ. Однако мировая практика показывает, что выход годных не менее 80–90% может быть достигнут уже с первой или, для особо сложных проектов, со второй итерации разработки. Прелесть ситуации заключается в том, что достигнутый выход годных фабрика *обязана* повторять сколь угодно долго и для любых (соответствующих ее производственным мощностям) объемов производства. Это показывает, насколько серьезные требования предъявляются к самой стандартной технологии (и входящему в ее состав PDK) и насколько серьезные ресурсы должна затратить фабрика для ее успешной квалификации.

В полупроводниковую промышленность принцип «фаундри» пришел в 80-е годы. В 1986 году Texas Instruments Incorporated (США) выпустила проспект, впервые анонсировавший предложение услуг «фаундри» в области СВЧ монолитных интегральных схем (MMIC — Microwave Monolithic Integrated Circuits) [4]. В 1987 году была создана первая фабрика «чистого (pure play) фаундри» Taiwain Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) — сегодня это крупнейшая фабрика в мире, опередившая по объему продаж и уровню технологического развития таких гигантов, как Intel и Samsung. В области MMIC крупнейшими предприятиями «фаундри» являются WIN Semiconductors Corporation (Тайвань) («чистое фаундри») с технологическими процессами категории качества не выше *Industrial*, и фабрика в структуре корпорации смешанного типа Qorvo Inc. (США). В заметном меньшинстве остались компании старого типа — IDM (Integrated Device Manufacturer). Крупнейшей из них, с сопоставимыми по сравнению с Qorvo Inc. объемом продаж и уровнем технологий, является Skyworks Solutions Inc. (США). Но и она использует стороннюю фабрику-«фаундри» как технологический ресурс: в 2008 году заключено стратегическое соглашение о сотрудничестве Skyworks Solutions с WIN Semiconductors. Начиная с 2011 года *все без исключения* производство твердотельной ЭКБ за рубежом реализуется в соответствии с принципом «фаундри». Несколько особняком стоят вопросы корпусирования кристаллов (в случае, если оно необходимо), однако с недавнего времени методология начала распространяться и в этой немаловажной сфере производства [5].

Значимость модели «фаундри» государственными органами США была оценена достаточно быстро, и лучшим подтверждением тому служит цепь последовательных событий. Уже в 1990 году DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) внесло в стратегические цели [6] и начало финансирование внедрения «фаундри» в рамках программы развития производства MMIC. Затем, в 2004 году, Министерство обороны США открыло действующую и поныне программу «доверенных фаундри» (The Trusted Foundry Program). Причины открытия программы и ее важность были доложены сенатскому комитету США в 2007 году [7]. Двухтысячные («нулевые») годы стали периодом бурного развития направления: число предприятий и объем «продаж технологических услуг» всем желающим разработчикам росли как на дрожжах. Однако следующим

ярким звеном в цепи событий явилось закрытие, по результатам рассмотрения в 2016 году очередного доклада DARPA сенатскому комитету, доступа ко всем фабрикам-«фаундри» на территории США — всем (!) «неамериканским» компаниям. Мотивировка решения была чрезвычайно простой и впечатляющей: «сохранение глобального технологического превосходства США». В Европе и странах Юго-Восточной Азии, где сосредоточено значительное количество предприятий «фаундри», ограничения не столь строги, однако, по схожим причинам, к заказу сторонним разработчикам доступны в основном PDK к технологиям, квалифицированным на категорию качества не выше *Industrial*. Данные о надежности импортной ЭКБ категорий *Military* и *Space* в открытых источниках, как правило, отсутствуют, а косвенные результаты анализа «указаний по применению» конкретных образцов ЭКБ довольно противоречивы. В то же время продукция данных категорий автоматически попадает под экспортные ограничения. Наглядным примером может служить технологический процесс D01GH компании OMMIC, присутствующий в ее «фаундри»-каталоге начиная с 2015 года. Но после появления в конце 2019 года информации о том, что OMMIC планирует завершить квалификацию процесса на категорию *Space* [8], длительность процедуры получения лицензии на поставку существенно возросла, и ввод ограничений на доступ процесса для внешних заказчиков стал лишь делом времени.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТАНДАРТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Описанный выше принцип организации проектирования и производства ЭКБ доказал свою эффективность не только иностранным разработчикам. В годы, когда российская электронная промышленность решала проблемы собственного выживания, доступность зарубежных дизайн-центров и (главным образом) фабрик сыграла с отечественными разработчиками РЭА злую шутку. Наиболее распространенной схемой комплектования вновь создаваемых и модернизируемых образцов стал заказ за рубежом импортной ЭКБ (разумеется, категории качества не выше *Industrial*) и проведение ее «недостающих» испытаний в составе аппаратуры. При этом ключевым преимуществом такой схемы считалась именно длительность разработки и изготовления заказанных за рубежом кристаллов, а дополнительные (и весьма значительные!) затраты времени и финансов на проведение испытаний в составе аппаратуры головными исполнителями обычно принимались как «необходимое зло». Частично ситуации «помогло» формирование в 2015 году «Перечня электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации ВВСТ», в который заносились образцы импортной ЭКБ, ранее уже прошедшие испытания. Применение при разработке РЭА образцов ЭКБ из «Перечня…» не исключало проведения их дорогостоящих испытаний, но хотя бы снижало риск получения отрицательного результата. Процедура внесения образцов ЭКБ в «Перечень…», учитывая длительность испытаний (например, на воздействие внешних факторов) и количество согласований результатов завершенных НИОКР, также простотой не отличались. Главным же фактором, который не позволяет считать данную схему приемлемой в долгосрочной перспективе, является ее уязвимость с точки зрения обеспечения технико-экономической безопасности государства. Необходимость импортозамещения в данной области назрела давно и, по большому счету, никем — ни производителями РЭА, ни разработчиками ЭКБ, ни военными и гражданскими чиновниками — сомнению не подвергалась. Но осуществить импортозамещение оказалось нелегко.

В отечественной нормативной базе, разработанной в период подъема советской экономики и частично переработанной в последние десятилетия, содержится множество определений и понятий, казалось бы, необходимых и достаточных для реализации описанных выше прогрессивных принципов проектирования и производства новых изделий ЭКБ (типовой технологический процесс, конструктивное подобие, межоперационный и выходной контроль, электронная модель, определительные испытания и т. д.). Однако ни само построение Системы разработки и постановки на производство (СРПП) изделий ЭКБ, ни ее исключительная ориентация на изделия, как комплектующие межотраслевого применения (КИМП), оказались не приспособлены к решению новых задач. Техническое задание на разработку изделия ЭКБ с самого начала ориентировано на получение у опытного образца комплекса параметров, обеспечивающих оптимальное функционирование РЭА, для которой изделие предназначено. Эту задачу наилучшим способом решило бы специализированное изделие, вплоть до изделия видового (единственного) применения. Однако, в случае разработки КИМП, созданное изделие должно обеспечивать функционирование сразу многих видов аппаратуры и систем. Очевидно, что любая универсальность ведет к потере предельных специфических свойств. В то же время задание на разработку технологии оставалось второстепенным, вспомогательным, направленным на изготовление конкретного образца. В случае если по результатам предварительных (а зачастую и приемочных) испытаний параметры изделия не достигались, СРПП предлагала корректировку как конструкции, так и технологии. Взаимосвязанные циклы «корректировка документации — изготовление образцов — испытания» повторялись в ходе ОКР до тех пор, пока не удавалось достичь компромисса между параметрами изделия и его технологией, при этом вопросы технологичности, воспроизводимости, выхода годных зачастую отходили на второй план и решались в ходе подготовки и освоения производства. Весь процесс занимал годы, при необходимости варьирования конструкцией изделия для оптимизации его параметров он должен был быть частично или полностью повторен, а для внедрения его результатов — в обязательном порядке должны были быть проведены типовые испытания.

«НАДЕЖНО» ИЛИ «БЫСТРО»? КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ КОМПРОМИСС

Попытки сместить акценты с достижения параметров конкретных образцов изделий ЭКБ, сделать предметом стандартизации собственно технологический процесс предпринимались неоднократно, но, к сожалению, не систематически. Технология, как документированная последовательность действий, приводящих к возникновению объекта, имеющего все конструктивные признаки создаваемого изделия (контакты, топологические рельефы, покрытия, межсоединения и даже элементарные приборы — диоды, транзисторы, конденсаторы и т. д.), но не являющегося КИМП с точки зрения ГОСТ РВ 15.205, не воспринималась как объект испытаний в отрыве от «приборных» параметров. Особенно дискуссионными стали вопросы, касающиеся предсказания и подтверждения параметров стойкости к воздействию внешних факторов, надежности, сохраняемости изделий, которые *еще только будут изготовлены* посредством разрабатываемой технологии. Попытки ввести в техническое задание *отдельные атрибуты* стандартных технологий (систему выбора контрольных точек, параметрический монитор и т. д.) приводили к полной неразберихе. Как можно испытать надежность объекта (например, диода или резистора), не имеющего даже *режимов эксплуатации* в общепринятом в ЕСКД смысле? Как распространить данные о его устойчивости к воздействию внешних факторов на физический объект более высокой степени интеграции, в конструкцию которого данный тестовый объект будет включен? Единственным путем «понятного» подтверждения уровня разработанной технологии оставалось изготовление ее посредством опять-таки изделий,

или КИМП, проведение их испытаний — и все возвращалось на круги своя с точки зрения общей длительности и сложности разработки. Какой смысл сначала создавать «абстрактную» технологию, затем проектировать, изготавливать с ее помощью и испытывать изделия, если можно традиционным способом составить техническое задание на разработку изделия ЭКБ и технологии его изготовления?

Как ни парадоксально, смысл именно в такой последовательной процедуре все же есть. Дело в том, что одними из важнейших результатов, получаемых при разработке «абстрактной» технологии, являются данные о границах ее естественной изменчивости, а также о технологических ограничениях (обусловленных как уже упомянутой изменчивостью, так и фундаментальными физико-химическими факторами). По мере получения и статистического описания этих данных технология перестает быть «абстрактной», а обретает конкретные, выраженные в параметрах тестовых структур, контрольные значения. По изменению этих значений во времени и пространстве (например, по площади пластины) становится возможным судить о стабильности разработанной технологии. Указанные атрибуты являются необходимыми (но не достаточными!) для построения комплекса правил и средств проектирования, основанного на разработанной технологии. Поэтому разработка изделий и проведение их испытаний приобретают смысл первичной проверки (верификации) вновь созданных технологии и средств проектирования. Верификацию при необходимости можно повторить, дорабатывая технологию и методы описания ее параметров, и в итоге выйти на необходимые параметры целевых изделий…

А где же сокращение сроков разработки? И где ответ на поставленные выше вопросы о надежности и живучести *проектируемых* устройств? На что ориентироваться дизайнеру, где взять тот физический, понятный ему объект, конструктивный аналог объектов будущих разработок, параметры которого гарантируются стабильной технологией изготовления и который мог бы быть подвергнут всем необходимым испытаниям?

ОТЕЧЕСТВЕННОЕ «ФАУНДРИ» С ВОЕННОЙ ПРИЕМКОЙ: НАЧАЛО ПОЛОЖЕНО

Конечно, ответ на поставленные вопросы частично содержится в них самих. Таким физическим объектом является библиотека стандартных элементов, спроектированных и изготовленных по стабильному технологическому процессу, параметры которых известны и описаны моделями. Именно библиотека, будучи полным конструктивно-технологическим аналогом и даже более того — «родителем» последующих изделий, служит основой для построения их поведенческих моделей. Но может ли библиотека стандартных элементов, этот «полномочный представитель» технологии, считаться КИМП? А если так, могут ли на нее быть выпущены настоящие технические условия, включающие все необходимые правила и процедуры приемки, чьи результаты распространятся и на технологический процесс?

Сейчас можно с уверенностью положительно ответить на все эти вопросы. Недостающее звено, обеспечивающее связь стандартной технологии с СРПП, найдено. В конце 2019 года произошло событие, которое может стать поворотным в отечественной практике разработок изделий ЭКБ. Впервые в РФ в обращение выпущен первый стандартный технологический процесс, в его документацию входят Технические условия (ТУ) на библиотеку стандартных элементов. ТУ распространяются на все стандартные элементы, имеющиеся в составе библиотеки, выпускаемые по данному технологическому процессу и предназначенные для изготовления спроектированных потребителем твердотельных СВЧ-устройств (изделий) категории качества «ВП». Совместными усилиями со специалистами ВП МО РФ, закрепленного за предприятием, сформулирован и предмет договора на оказание услуг «фаундри»: «Изготовление по технологическому процессу (идентификатор процесса) набора стандартных элементов (идентификатор ТУ), соединенных между собой на поверхности и/или в объеме полупроводниковой пластины по конструкторской документации заказчика». Таким образом, первая отечественная фабрика, оказывающая услуги «фаундри» с военной приемкой, получила путевку в жизнь.

Возможности, предоставляемые неизбалованным отечественным разработчикам внедрением принципа «фаундри» в производственную практику, впечатляют. Так, в ходе двухэтапной верификации PDK к стандартной технологии, за 15 месяцев было разработано, изготовлено и испытано более 120 СВЧ-изделий, при этом полный цикл изготовления нового изделия составлял 4–5 месяцев от момента согласования топологии между заказчиком и исполнителем. Важно отметить, что ряд изделий прошел и наиболее длительные и сложные испытания — на стойкость к воздействию специальных факторов (СФ), результаты которых в качестве справочных данных также включены в ТУ. В перспективе создание радиационно-ориентированных моделей стандартных элементов позволило бы распространить результаты их испытаний на все разрабатываемые изделия и модельные ряды, а также многофункциональные модули более высокого уровня интеграции на их основе. Тем самым разработанная методология делает возможным переход к предсказанию и прогнозированию параметров надежности и стойкости к СФ уже на этапе проектирования устройств СВЧ ЭКБ. Но это — дело будущего, хоть и недалекого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача качественного повышения эффективности импортонезависимых разработок и производства СВЧ ЭКБ в российской твердотельной электронике может быть решена только путем кардинального обновления методологии по сравнению с используемой в СРПП. Реализация прогрессивной технологической парадигмы, основанной на стандартизации технологий и повсеместном внедрении принципов «фаундри», в российских реалиях оказалась сопряженной со значительными трудностями, однако компромиссный прецедент недавно был создан. В последующих публикациях авторский коллектив первой отечественной СВЧ-фабрики-«фаундри» предполагает изложить полученный на практике опыт разработки и применения стандартных технологических процессов, а также привести наиболее интересные и впечатляющие примеры реализации в сжатые сроки разработок и производства конкретных СВЧ-модулей и многофункциональных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Semiconductor Foundry Market — Growth, Trends, and Forecast (2020–2025). Mordor Intelligence. www.mordorintelligence.com/industry-reports/semiconductor-foundry-market*
2. *Зверев А. В., Попов В. В., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Модели организационного развития предприятий полупроводниковой промышленности//ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2011. № 4.*
3. *Process characterization guideline. www.jedec.org/standards-documents/docs/jep-132*
4. *Texas Instruments — GaAs MMIV Foundry Services. Texas Instruments Incorporated//Promotion Material, 1986, Semiconductor Industry Association collection, Catalog Number 102721750.*
5. *Koelink M. Toward the Foundry Model in Packaging for the Semiconductor Industry. www.researchgate.net/publication/309464121*
6. *Cohen E. D. The impact of the U. S. MIMIC program on MMIC technology and applications. Proc. European Gallium Arsenide and Related III–V Compounds Applications Symp. (GaAs'94), 1994.*
7. *Brian S. Cohen. Information Technology and Systems Division On Integrated Circuits Supply Chain Issues in a Global Commercial Market — Defense Security and Access Concerns. Institute for Defense Analyses Assistant Director, Information Technology and Systems Division. Statement before the House Armed Services Subcommittee Terrorism, Unconventional Threats and Capabilities, March 14, 2007.*
8. *III–V processes. www.ommic.com/iii-v-processes/*