

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬ СВЧ ЭКБ В СВОЕМ ОТЕЧЕСТВЕ: ЖЕЛАЕМО ЛИ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ?

В последние годы отечественная радиоэлектроника буквально взбудоражена: кардинально изменилась и внешняя обстановка (перераспределение ролей среди мировых лидеров индустрии и ужесточение санкционной политики в отношении России, громкие международные инциденты информационной безопасности и спровоцированный пандемией «мировой кризис полупроводников»), и отечественная стратегия развития отрасли. Впервые за весь постсоветский период по-настоящему пристальное внимание обращено на проблемы разработки и возрождения отечественного производства электронной компонентной базы. Меры, которые предпринимаются правительством в ответ на возникающие вызовы, поистине беспрецедентны. Попробуем разобраться, начали ли ощущать реальную поддержку адресаты — российские предприятия, работающие в самом начале «пищевой цепочки» радиоэлектроники?

До недавнего времени в мировой полупроводниковой электронике развивалась система требований к параметрам изделий и составляющих их компонентов, основанная на разделении по областям применения (гражданская, в том числе промышленная и потребительская электроника, и электроника доверенных применений — космическая и военная). Соответственным образом формировалась и международная ценовая политика, и национальные стратегии развития полупроводниковой промышленности. В условиях глобализации экономики и международного разделения труда стало нормальным считать основным признаком «происхождения» изделия принадлежность интеллектуальной собственности, причем изготовление должно было осуществляться там, где это дешевле, технологичнее, надежнее. Такая схема в полной мере верна по отношению к рынку массовой электроники, основным драйвером которого является ценовая конкуренция. В то же время в «критических» областях, где на первое место выходит конкуренция параметров, лидеры мировой электроники старались приблизить степень локализации производства к 100%. Однако чисто военные (оружейные) и космические применения давно перестали быть единственными представителями этого класса. Сегодня «умные» электронные системы, успешно освоив наши дома, выходят на улицы городов и все чаще готовы перешагнуть государственные границы. Системы обеспечения телекоммуникаций, транспортной, энергетической инфраструктуры, даже будучи сугубо гражданскими, направленными на обеспечение повседневных потребностей людей, построены на элементной базе, требования к которой никак нельзя счесть «ширпотребом», несмотря на ее массовое применение. И безопасность государства чем дальше, тем больше будет зависеть не только и не столько от того, как быстро маневрируют и метко стреляют экипажи на соревнованиях по танковому биатлону, но и от того, насколько надежно функционируют системы охраны периметров электростанций, управления газо- и нефтепроводами, автопилоты такси и городских служб доставки товаров, наконец. Таким образом, границы областей применения электроники

переформатируются и «размываются», при этом наиболее существенными параметрами, определяющими требования к элементной компонентной базе, становятся ее **надежность и безопасность**, а основным признаком экономической независимости государств в условиях обострившейся конкуренции и разрушающихся международных связей — **уровень развития технологий** проектирования и производства ЭКБ. Ни больше, ни меньше.

Рассмотрим эти основные факторы через призму влияния на формирование государственной политики в области производства ЭКБ, а также их некоторые неочевидные последствия, влияющие на жизнь отечественных производителей.

### НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ СВЧ ЭКБ: ЧТО ПЕРВИЧНО?

В наше время повсеместного внедрения цифровых сервисов и криптовалют, обеспеченного качественным прорывом технологий микроэлектроники, при упоминании информационной безопасности чаще всего имеют в виду предотвращение уязвимостей процессов хранения данных, их обработки и принятия решений, то есть безопасность, непосредственно связанную с функционированием процессорных блоков и модулей памяти интеллектуальных систем. Конечно, в этом смысле проблема кибербезопасности известна практически с момента возникновения идеологии построения таких систем, традиционно считается одной из самых важных, всесторонне изучается и достаточно эффективно решается [1]. Процессорная спецтехника уже проектируется так, чтобы по возможности предотвратить «закладки» при изготовлении электронных модулей на зарубежных фабриках.

Однако под электронной безопасностью в более широком смысле понимается защищенность информации **и поддерживающей ее инфраструктуры** от любых случайных или злонамеренных воздействий, результатом которых может стать нанесение ущерба самой информации, ее владельцам или поддерживающей инфраструктуре. Что же можно сказать по этому поводу о безопасности аналоговой микроэлектроники, в частности — сенсорной и приемо-передающей ЭКБ, лежащей в ос-

нове построения блоков телекоммуникации, слежения и управления интеллектуальными системами? Казалось бы, как можно воздействовать и получить управление цепями, в которых происходят «всего лишь» преобразования электромагнитной энергии, основанные на фундаментальных физико-химических принципах? Оказывается, и тут нет ничего сверхъестественного. Так называемая «управляемая деградация», закладываемая в конструктивные элементы электронных модулей на этапе их изготовления, способна «включаться» под воздействием различных причин, среди которых могут отсутствовать традиционные факторы ускорения (температура, электрический ток определенного уровня и т. д.), используемые в методиках испытаний надежности в составе РЭА. Вкратце суть проблемы уязвимости аналоговой электроники имеет две основные составляющие [2]:

- особенности свойств функциональных материалов, известные только изготовителям (например, распространенный в технологии АЗВ5 диэлектрик,  $\text{SiN}_x$ , в зависимости от состава  $x$  и условий получения может менять свои свойства в довольно широких пределах);
- особенности взаимодействия электронных устройств, изготовленных из таких материалов, с электромагнитным и иными видами полей (например, гравитационным — в случае MEMS-устройств).

Такие особенности известны только изготовителям компонентной базы и, чаще всего, не могут быть выявлены без углубленного физико-химического исследования. Поскольку параметры надежности поставляемой из-за рубежа ЭКБ известны только в объеме, определяемом изготовителем, а ее испытания в составе комплектуемой аппаратуры проводятся по методикам (причем зачастую достаточно «пожилым»), разработанным на основе системных требований к РЭА, работоспособность ЭКБ подтверждается в ограниченном наборе режимов. Спрогнозировать, как поведет себя, например, затвор маломощного усилителя при воздействии какой-нибудь нехарактерной (для наших ГОСТов!) последовательности импульсов, или сверхчувствительный инфракрасный детектор при облучении более коротковолновым или нестандартно поляризованным излучением, — практически нереально. Подобные прогнозы могут быть основаны только на поведенческих моделях тех или иных электронных компонентов, построенных, в свою очередь, на свойствах составляющих их физических объектов. Как же, учитывая сказанное, можно и нужно обеспечивать реальную безопасность аналоговых компонентов, в том числе СВЧ ЭКБ?

Можно — затрачивая существенные ресурсы на исследования и менеджмент рисков и выстраивая программы повышения надежности (см. относительно «молодые» ГОСТы группы Р 15901) для «комплектухи», поступающей в отделы комплектации компаний — производителей РЭА. При этом не столь важно, поступающей из-за рубежа или (тенденция последнего времени) от немногочисленных отечественных производителей. По степени пригодности для прогнозирования надежности конечной РЭА и импортные, и большинство отечественных компонентов представляют собой если не совсем «черный ящик», то уж по меньшей мере «темную лошадку».

Но поколения ЭКБ сменяют друг друга чем дальше, тем быстрее, число зарубежных поставщиков сокращается. Очевидно, выход не просто в возрождении отечественного производства ЭКБ, но и — что исключительно важно — производства нового типа. Только переход на стандартные технологии, построенные на библиотеках, испытанных с учетом всестороннего анализа конструкций и характеристик составляющих их элементов, дает возможность получать адекватные поведенческие модели РЭА и прогнозировать ее надежность (читай: безопасность применения). Но построить подобные стандартные технологии не так-то просто.

## КОГДА МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕВЫШЕ ТЕХНОЛОГИИ

Упоминать преимущества использования методологии фаундри в нашей стране понемногу становится привычным [3]. Удивительно, но даже в стане «большого брата» — на флагманских предприятиях нашей кремниевой микроэлектроники, изначально построенных и ориентированных на этот способ производства, лишь относительно недавно заговорили о предоставлении своих техпроцессов в относительно свободном режиме [4] отечественным дизайн-центрам, количество которых стало расти благодаря принимаемым в последние годы мерам. Что уж говорить об СВЧ-электронике, которая «... и проще по технологиям, и меньше по объемам потребления: вот решим проблемы с массовым выпуском «кремния» — попутно и АЗВ5 закроем». Между тем, непопулярность темы фаундри вовсе не означала отсутствие интереса к сущности предложения: редкие российские предприятия — разработчики РЭА, неудовлетворенные ограниченностью номенклатуры или параметрами импортной ЭКБ из «Перечней... разрешенных к применению...», не вкусили вполне себе разрешенного (до недавнего времени) «плода» в виде возможности проектирования и заказа необходимых им специализированных МИС на зарубежных фабриках.

Причина подобного замалчивания необходимости развития и внедрения фаундри отечественным полупроводниковым сообществом не только в том, что «советская» нормативная база, построенная на «нерушимом союзе» ЕСКД и ЕСТД, рассматривает изделие как единственный объект стандартизации. На наш взгляд, основным обстоятельством, определяющим сложившуюся ситуацию, является недооценка значения стержня методологии фаундри — стандартных технологий, проистекающая из недостаточных представлений о принципах их построения и разработки. Мало кого из потребителей интересует, почему же «импортное лучше». И напрасно! Даже при беглом знакомстве (например, при обзоре некоторых стандартов Объединенного совета разработчиков электронных устройств — JEDEC) со структурой стандартных технологий и процедурами их «превращения» в рабочий инструмент, которым так удобно пользоваться, становится виден масштаб решаемых научно-технических задач и (увы!) затрат, которые необходимо понести в ходе разработки. Достаточно сказать, что количество стандартизованных процедур, применяемых для определения каждой из характеристик технологического процесса [5], входящего в состав стандартной технологии, составляет полтора десятка, при этом сами характеристики основываются на базе данных, собираемой и обрабатываемой с помощью более чем двух десятков инструментов статистического анализа. Исключительно важно, что уже на стадии характеристики техпроцесса проводится анализ типов и последствий отказов (FMEA) *стандартных элементов* — ни о каких изделиях ЭКБ к этому моменту речи еще не идет! А в руководстве к процедуре квалификации стандартных технологий, дающей им «право» стать обеспечивающими предоставление услуг фаундри [6], сформулированы не только требования к группам параметров будущих изделий (или тестовых элементов, конструктивно-технологически подобных содержащимся в изделии), но и к контрольным параметрам 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, предоставляющие разработчикам РЭА инструмент прогнозирования параметров надежности реальных устройств, проектируемых при помощи данной технологии. Процесс разработки и квалификации стандартных технологий в ведущих мировых компаниях занимает до пяти лет, при этом только количество пластин, на которых проводится квалификация, составляет обычно сотню-полторы. Себестоимость планарного цикла по технологии рНЕМТ на четырехдюймовой пла-

стине GaAs достигает в современных реалиях 3–4 млн рублей. Потратить около полумиллиарда рублей и не получить на выходе ни одного конкретного серийного изделия ЭКБ, достойного включения в «Перечень...»? Невиданное расточительство!

Обычный цикл создания и постановки на производство нового дискретного СВЧ-прибора или МИС по стандартам СРПП включает несколько этапов разработки документации и изготовления по ней опытных образцов, с проведением последовательных групп испытаний и корректировок документации. Это занимает от трех лет, стоит до сотни–полтора миллионов рублей и на выходе дает изделие, чьи параметры могут «заместить» импортный аналог, воспроизводимость технологии не определена (из-за малой статистической базы), а стоимость в производстве, как правило, выше.

### КОГДА «МОЖНО» ХУЖЕ, ЧЕМ «НЕЛЬЗЯ»

Почему же буксует импортозамещение в области производства СВЧ ЭКБ? Можно сказать, что причины тут чисто экономические: *купить* (или заказать изготовление на зарубежной фабрике) компоненты и затем провести испытания РЭА *значительно дешевле*, чем выполнить полный цикл разработки отечественной стандартной технологии (в том числе с полным набором испытаний библиотеки стандартных элементов) и затем приобрести (или заказать изготовление) у отечественного производителя. Сказанное особенно актуально в отношении небольших партий ЭКБ, поскольку только массовое производство, поставленное на зарубежных фабриках, обеспечивает: а) статистически обоснованные методы управления воспроизводимостью технологий и, как следствие, качеством продукции; и б) «классическую» динамику снижения себестоимости продукции с ростом объемов производства. Поэтому осуждать отечественных разработчиков РЭА за предпочтение импортной ЭКБ бессмысленно: пока каналы ее поставок из-за рубежа существуют, будут брать «где дешевле и качественнее». И неудивительно — комплектовать аппаратуру нужно здесь и сейчас, а когда заходит разговоры о возрождении (или даже о модернизации!) отечественных технологий, «находящиеся в теме» специалисты только качают головой, сознавая масштаб проблем, которые необходимо решить — сырье, материалы, оборудование... И это — в традиционной технологической парадигме, даже не говоря о «новой» методологии.

Есть и другой аспект «неравенства» отечественного производителя перед зарубежным, связанный с экономикой только отчасти и наиболее ярко проявляющийся в разработках СВЧ ЭКБ для РЭА в рамках гособоронзаказа. Представители ВП МО РФ, руководствуясь существующей нормативной базой, спокойно воспринимают комплектацию РЭА импортными комплектующими, особенно входящими в «Перечень...», и последующие испытания укомплектованной ими аппаратуры. О недостатках «технической» составляющей такого подхода мы уже упоминали выше, но есть и еще одна неприятная сторона. При попытке спроектировать и изготовить компоненты на отечественном предприятии фаундри, «правила игры» требуют делать это под контролем ВП, что создает колоссальные трудности, связанные с «нестандартностью» процесса испытаний. Даже по «аккредитованному» военными технологическому процессу, о коммерческом запуске которого мы сообщали в прошлом году [3], пластины выпускаются нечасто, а остальные процессы предприятия все еще ждут удобного случая для аналогичной «легализации» и формально участвовать в обеспечении ими ГОЗ не могут. Складывается парадоксальная ситуация: потребители из ВПК обращаются на отечественное предприятие, имеющее в арсенале подходящие технологии, за *обоснованием разрешения на использование импортной ЭКБ* в своих разработках. Силы и время контролирурующих органов, таким образом, уходят на ежегодное обновление «Перечня», а не на поиск компромиссов с отечественными производителями, что, конечно, не добавляет им доверия со стороны потребителей.

В силу описанных выше причин многие разработчики СВЧ ЭКБ вынуждены «скрывать» импортные комплектующие более низкого уровня разукрупнения (попросту говоря, кристаллы), чтобы обеспечить правильное «происхождение» своих изделий. В ситуации, пока импорт кристаллов окончательно не перекрыт (а для азиатских фаундри этот момент может и не наступить), подобная практика напоминает «розовые очки», препятствующие выделению серьезного финансирования на разработки стандартных технологий и внедрение прогрессивных способов производства, обеспечивающих создание надежной, по-настоящему безопасной отечественной СВЧ ЭКБ. В масштабах экономики всей отрасли, на более широком временном интервале, получается довольно унылая картина: чем дольше добавленная стоимость, формирующаяся производителями ЭКБ, остается в «чужих» экономиках, тем дальше отодвигаются (или совсем пропадают?) надежды на достижение нами технологического суверенитета.

### НИКТО НЕ ВИНОВАТ. ЧТО ДЕЛАТЬ?

Вообще говоря, в начале статьи мы отметили, что отечественная радиоэлектроника сейчас не может пожаловаться на отсутствие внимания. И Правительство РФ, и предприятия отрасли изъявляют готовность к действиям. И, описывая проблемы переходного периода, мы в первую очередь желали бы, чтобы эти действия были осмыслены и согласованы для достижения максимального эффекта.

Первое, на чем следовало бы сосредоточить общие усилия, — уравнивать отечественных и зарубежных производителей СВЧ ЭКБ в правах на кошелек потребителя. Для начала было бы достаточно хотя бы унификации требований к порядку разработки, изготовления и испытаний модулей нулевого уровня — независимо от их происхождения. И база для подобного порядка действий уже существует — например, МНИИРИП несколько лет проводит экспертизу запросов на разрешение применения ЭКБ ИП, привлекая отечественных производителей.

Далее, хотелось бы большей решительности регулятора во внедрении нового алгоритма определения критериев «происхождения» комплектующих электроники. [7]. Количество изменений в соответствующие Постановления правительства РФ и установленные ими процедуры подтверждения производства промышленной продукции на территории РФ уже исчисляется десятками. Наиболее важным из них представляется включение в качестве обязательного требования к интегральным схемам первого уровня необходимости изготовления пластин по полному циклу (за исключением фотошаблонов) с кристаллами и их измерение на территории РФ [8]. Конечно, перспективы использования электронных компонентов в РЭА не должны определяться исключительно «происхождением» — конкуренция параметров чрезвычайно важна. Но при этом отечественный производитель хотя бы понимает, с кем «соперничает», и получает дополнительный стимул для развития.

И, пожалуй, главное, что хотелось бы отметить. Методы «узаконенного протекционизма» (квотирование закупок электронных компонентов по кодам ОКПД2, введение правил «второго лишнего» и дальнейшая систематизация системы реестров продукции СВЧ ЭКБ), активно разрабатываемые и внедряемые в практику регулирования закупками и разработками электронных компонентов, не должны стать единственными и даже основными мерами в программе возрождения отечественной радиоэлектроники. Отечественный производитель нуждается не только и не столько в защите от внешней конкуренции, но в первую очередь — в масштабной организационно-финансовой поддержке, направленной на реформирование системы стандартов и развитие отечественных стандартных технологий. Только такое сочетание может обеспечить научно-технологическую основу для создания в России собственного производства надежной, а значит, и безопасной СВЧ электронной компонентной базы. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоус А., Солодуха В., Шведов С. Программные и аппаратные трояны. Способы внедрения и методы противодействия. Первая техническая энциклопедия. В 2-х кн. М.: Техносфера, 2018.
2. Young C. S. Chapter 3 — Physics and Information Security. Information Security Science. Syngress, 2016.
3. Первая отечественная СВЧ-фабрика — фаундри с военной приемкой: методология, проблемы и перспективы. [www.microwave-e.ru/market/svch-fabrika-faundri/](http://www.microwave-e.ru/market/svch-fabrika-faundri/)
4. Новая модель контрактного производства от ГК Микрон будет представлена на форуме «Микроэлектроника-2021». [www.zelao.mos.ru/presscenter/news/detail/10298780.html](http://www.zelao.mos.ru/presscenter/news/detail/10298780.html)
5. Process characterization guideline. [www.jedec.org/standards-documents/docs/jep-132](http://www.jedec.org/standards-documents/docs/jep-132)
6. Foundry process qualification guideline. [www.jedec.org/standards-documents/docs/jp-00101](http://www.jedec.org/standards-documents/docs/jp-00101)
7. Российской микроэлектронике придется пройти через болезненную трансформацию. [www.telesputnik.ru/materials/persony/interview/sergey-dolgopolskiy-gs-group-rossiyskoy-mikroelektronike-prividetsya-proyti-cherez-boleznetnyyu-transf/](http://www.telesputnik.ru/materials/persony/interview/sergey-dolgopolskiy-gs-group-rossiyskoy-mikroelektronike-prividetsya-proyti-cherez-boleznetnyyu-transf/)
8. 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 г. № 719 с изменениями и дополнениями от 3 сентября 2021 г.