

Основные тенденции применения микроэлектронных корпусов в мире и в России



Дмитрий БОДНАРЬ, к. т. н.

Автор отмечает, что эта статья носит не аналитический, а полемический характер, и особенно в части выводов отражает только его личную точку зрения. У других специалистов может быть иное мнение, а многим чиновникам изложенное вообще может не понравиться. Написание статьи обусловлено намерением издательского дома «Электроника» и журнала «Электронные компоненты» провести онлайн-конференцию на тему производства корпусов в России и предложением автору изложить свое мнение. Автор не ставил своей целью написание объемной аналитической статьи — при желании специалисты всегда смогут ознакомиться с большим количеством зарубежных публикаций на эту тему. В публикации больше внимания уделяется тенденциям использования корпусов для военной и космической микроэлектроники как наиболее актуальным российским отраслям.

Передовые страны заменяют герметичные корпуса пластмассовыми даже для космоса

Мировая микроэлектроника быстро развивается не только в направлении разработки новых субнанометровых технологий производства чипов, но и в передовых технологиях сборки, а также 3D-сборки и микроэлектронных корпусов разной сложности, предназначенных для повышения частотных, электрических, динамических параметров и снижения потерь полупроводниковых изделий.

В настоящее время в мировой микроэлектронике применяются корпуса нескольких основных типов для интегральных микросхем и силовых полупроводников.

- **Герметичные металлокерамические и металlostеклянные корпуса** CQFP, CPGA, CBGA, CCGA, CLGA и др. с жесткими требованиями к герметичности и влагостойкости подкорпусного объема; основными сферами их применения являются космическая техника, военные изделия и эксплуатация в экстремальных условиях;
- **Монолитные выводные и безвыводные пластмассовые корпуса**, которые несколько десятилетий назад применялись только для гражданских полупроводников. Их текущее назначение изменилось, что будет рассмотрено далее; имеется очень много разновидностей таких корпусов для всех категорий полупроводниковых изделий, начиная с небольших в единицы миллиметров 2–3-выводных для маломощных диодов серии SOT и заканчивая большими 40×40 мм типа QFN на 304 вывода.
- **Комбинированные пустотелые пластмассовые корпуса с количеством выводов до 10 000 и более** с подложкой и сложными многослойными коммутационными металлизированными межсоединениями и даже с металлической теплоотводящей крышкой для более мощных микросхем; одним из примеров таких корпусов является тип FCBGA с шариковыми выводами и flip-chip монтажом чипов.
- **Пустотелые мощные пластмассовые корпуса** для производства мощных полупроводниковых транзисторных, диодных, тиристорных, смешанных модулей и интеллектуальных ключей.

- **Пустотелые пластиковые квазигерметичные корпуса с открытой полостью (Open Cavity или Air Cavity)** типа QFN, DFN, QFP, SO и т. д. Отдельными типами подобных корпусов, которые первыми стали массово применяться в последнее десятилетие, являются корпуса для СВЧ-транзисторов и силовых модулей. В настоящее время на рынке появляются корпуса, альтернативные классическим монолитным корпусам типа TO-220, D2PAK и др. Их главные преимущества — в повышенной термостойкости (до 240 °С), наличии покрытия Au на выводах, монтажной площадке, теле корпуса, промежуточной герметичности и стоимости между монолитными пластмассовыми и металлокерамическими корпусами.

Существуют сотни разновидностей каждого из перечисленных выше типов, отличающихся размерами, толщиной, количеством, типом выводов и т. д. Однако даже крупнейшие сборочные мировые предприятия не обладают существующими корпусами всех типов, а специализируются в услугах сборки по типам корпусов, сложности и сферам применения продукции. Ни одна компания не в состоянии охватить всю номенклатуру корпусов.

Герметичные металлокерамические и металlostеклянные корпуса безальтернативны для эксплуатации в условиях дальнего космоса или в крайне жестких условиях эксплуатации (при очень высокой влажности и высокой температуре, например в оборудовании морских буровых станций).

Монолитные пластмассовые корпуса составляют основную долю рынка гражданских ИС и дискретных силовых приборов малой, средней и большой мощности. Однако с 1990-х гг. такие корпуса за рубежом стали стремительно завоевывать рынок полупроводников для военной техники, вытесняя классические металлокерамические и металlostеклянные корпуса. Одной из главных причин послужила невероятная для России ситуация, когда полупроводниковые производители США стали отказываться от заказов Пентагона на военные изделия в герметичных корпусах из-за их устаревших и снятых с производства технологий. В результате рокировки военной и гражданской микроэлектроники эти компании перешли на новые технологии и изделия для компьютеров, автоэлектроники и беспроводных коммуникаций [1].

В 1994 г. вышел известный меморандум тогдашнего министра обороны США Уильяма Перри, предписывающий максимально использовать коммерческие гражданские изделия в военной аппаратуре. Заметим, что в тот период среди военных в США было немало противников этого решения, обеспокоенных возможным снижением надежности военной аппаратуры. Но результаты оказались даже лучше предполагаемых оптимистами, так как не только сократилась стоимость, но и повысилась надежность многих военных изделий. Появились даже предложения по ужесточению военных стандартов. Этот меморандум положил начало замене герметичных корпусов пластмассовыми и расширению применения коммерческих полупроводников в военной аппаратуре. За прошедшие 30 лет качество, надежность зарубежных пластмассовых корпусов и материалов значительно повысились, чему тоже способствовало ужесточение требований к надежности пластиковых электронных компонентов в автомобильных стандартах. В частности, требование к максимальной температуре перехода 200 °С для некоторых автокомпонентов в пластмассовом корпусе превышает этот параметр в 175 °С для военных изделий в герметичных корпусах.

Основные преимущества корпусов Open Cavity по влагостойкости и герметичности достигаются за счет применения пластмассы на основе ЖК-полимера, по своим характеристикам близкого к стеклу. Они могут поставляться заказчиком не только в разделенном виде идентично металлокерамическим корпусам, но и на ленте как монолитные пластмассовые корпуса. Автор настоящей статьи ранее достаточно подробно рассматривал особенности и преимущества пластиковых корпусов с открытой полостью [2].

На мировом рынке имеется несколько производителей таких корпусов, в основном сосредоточенных в США. Ведущие мировые производители мощных СВЧ-транзисторов Freescale (в настоящее время NXP), STM более 50–70% таких изделий выпускают в корпусах Open Cavity. Результаты испытаний в компании Freescale показали, что уровень влагостойкости СВЧ-транзисторов в пластмассовых корпусах составляет MSL3 (168 ч в течении одной недели при 260 °С); тепловое сопротивление «переход – корпус» меньше на 30%, а надежность выше в два раза в сравнении с классическими металлокерамическими корпусами [3]. Надежность повышается за счет снижения температуры перехода чипов в номинальных и более жестких режимах эксплуатации, в том числе за счет использования основания теплоотвода из чистой меди вместо сплава CuW, CuMo у классических металлокерамических корпусов.

В настоящее время на рынке представлены корпуса Open Cavity QFN, QFP для интегральных микросхем с 8–100 выводами и размером тела корпуса в диапазоне 3×3–12×12 мм. Они крайне удобны для маломощных и СВЧ ИС и обеспечивают рабочие частоты до 43 ГГц [4], недоступные для классических выводных корпусов, что делает их незаменимыми для устройств миллиметрового диапазона 5G и интернета вещей.

Корпуса для космической микроэлектроники

Несколько десятилетий назад герметичным металлокерамическим и металлокерамическим корпусам для космической микроэлектроники не было альтернативы для микросхем и дискретных компонентов из-за жестких условий эксплуатации. Развитие космических программ, связанных дальними полетами по исследованию других планет и с коммерческими запусками спутников на низких орбитах для

обеспечения связи потребовали введения градаций по требованиям к космическим компонентам в зависимости от условий эксплуатации. В таблице представлена градация космических орбит, срок службы спутников и радиационные эффекты, сопровождающие такие полеты.

Большое количество спутников на низкой орбите (LEO), используемых для высококачественных съемок поверхности Земли, передачи данных, космических трансляций, интернета и т. д. требуют высокой и постоянно растущей пропускной способности в сотни Гбайт/с, которую традиционная космическая электроника в герметичных корпусах уже не в состоянии обеспечить.

В настоящее время типовым стандартом для космической электроники для разных уровней применения стали пластмассовые корпуса.

Существует несколько квалификационных уровней для космической электроники:

- классы Q и V (QMLQ/V);
- коммерческий уровень (Commercial Off-The-Shelf, COTS);
- уровень автомобильной электроники (Automotive Electronics Council, AEC);
- усовершенствованный космический пластик (Space Enhanced Plastic, Space EP).

Изделия QMLQ и QMLV выпускаются в керамических герметичных корпусах в соответствии со спецификациями MIL в рамках единого, как правило базового производства, и используют внутреннюю разварку чипов проволокой алюминия. Хотя продукция QMLQ предназначена для военных применений, только продукция QMLV подвергается радиационным испытаниям. Продукция QMLV является высоконадежной, срок службы каждой партии полупроводников проверяется. Она идеально подходит для приложений, требующих более длительного срока эксплуатации. По сравнению с QMLV, дополнительный подкласс изделий QMLV-RHA подвергается дополнительному тестированию партии суммарной ионизирующей дозой (TID) для квалификации гарантированной радиационной стойкости. Для этого класса продукции применяются также корпуса с дополнительными экранами лицевой и обратной стороны, защищающими чипы от радиационных эффектов.

Изделия COTS/AEC-Q100 поставляются в пластмассовых корпусах и, как правило, не проходят ни радиационные испытания, ни радиационную безопасность. В их описаниях может отсутствовать информация о допустимом излучении, конструкции компонентов и технологическом процессе изготовления. Для их изготовления могут использоваться несколько производственных и сборочных площадок и разварка медной проволокой. Изделия COTS/AEC-Q100 не тестируются в таких экстремальных условиях космического полета как термоциклирование или высокие вибрации и перегрузки во время запуска.

Компания Texas Instruments (TI) специально для низкоорбитальных околоземных миссий и миссий с относительно малым сроком службы разработала линейку радиационно-стойких изделий Space EP в пластмассовых корпусах с уровнем TID в диапазоне 30–50 Крад [5]. Для продукции Space EP используется флип-чип монтаж или разварка золотой проволокой, и не применяются корпуса с высоким содержанием олова во избежание образования оловянных усиков. Изделия Space EP имеют единый контролируемый базовый технологический процесс на одной фабрике по изготовлению чипов на одной сборочной линии с одним набором материалов, а также оснащаются всей документацией для обеспечения прослеживаемости партии. Устройства также аттестованы в диапазоне температуры –55...125 °С и проходят

Таблица. Срок службы спутников и радиационные эффекты для разных космических орбит

Орбита	Длительность космической миссии	Пример программы	Эффект одиночного события	Эффект накопления полной поглощенной дозы
низкая околоземная орбита (LEO), малое наклонение	2–5 лет	международная космическая станция, наука о Земле, астрономия	незначительный	незначительный
низкая околоземная орбита (LEO), наклонение полярной орбиты	2–5 лет	наблюдения за Землей, метеорология	умеренный	умеренный
средняя околоземная орбита (MEO)	10–15 лет	спутниковая навигация	серьезный	серьезный
высокая эллиптическая орбита (HEO)	10–15 лет	система связи на высоких широтах	серьезный	серьезный
геосинхронная орбита (GEO)	10–15 лет	система связи	серьезный	серьезный

ускоренные стресс-тесты и 100% термоциклы. Они поставляются с подробными отчетами, в том числе с отчетом о радиации для TID и о радиации для одиночных импульсов SEE. Изделия Space EP компании TI предназначены также для эксплуатации на более дальних космических орбитах и в длительных полетах.

Компания Renesas Electronics впервые в мире выпустила радиационно-стойкие микросхемы контроллера ШИМ, драйвера ШИМ на основе нитрида галлия в пластмассовых корпусах SOIC и QFP [6]. Они предназначены для работы в ближнем космосе на низких орбитах в цепях питания оборудования малых спутников и ракет-носителей. Их достоинствами являются диапазон рабочей температуры $-55 \dots 125$ °C, малое энергопотребление и высокая рабочая частота до 1 МГц, а занимаемая ими площадь на плате в три раза меньше в сравнении с конкурентами в керамических корпусах.

Компания VORAGO Technologies из США разрабатывает и выпускает радиационно-стойкие микросхемы со стойкостью до 300 крад в пластмассовых корпусах QFP [7]. Диапазон рабочей температуры некоторых изделий этой компании составляет $-55 \dots 200$ °C. Ее продукция в пластиковых корпусах работает не только на близких околоземных орбитах, но и на более дальних.

Практически все ведущие европейские и американские OEM-компании уже давно выпускают множество военных полупроводниковых и СВЧ-изделий категории Military в пластмассовых корпусах. 30 лет назад меморандум Уильяма Перри положил начало этой тенденции, и она распространилась с наземной эксплуатации на приложения для авиации, космоса и моря. В условиях текущего роста милитаризации государственных бюджетов мировых стран переход на более дешевые полупроводниковые изделия в пластмассовых корпусах только расширится.

Прогресс и российский консерватизм

Когда речь заходит о развитии микроэлектроники в нашей стране за последние 20 лет, в качестве основной визитной карточки представляют производство чипов на «Микроно» по технологиям 180 нм и менее, организованное с помощью европейской компании STMicroelectronics и усовершенствованное «Микроном» до норм 90/65 нм, а также сборочный завод GS Nanotech в Калининградской области с закупленной в Европе технологией и импортной линией закрытого там полупроводникового производства. Оба достижения базируются на не самых передовых зарубежных технологиях и оборудовании, перенесенных в нашу страну. Технологии «Микрона» не удалось до конца успешно адаптировать к изделиям российского гражданского рынка, о чем в настоящее время свидетельствуют проблемы с организацией выпуска чипов для пластиковых карт и биопаспортов. Наоборот, компания GS Nanotech производит только микросхемы для гражданского рынка изделий GS Group и экспорта. Обе компании стали испытывать большие трудности с поставками оборудования и материалов после ужесточения санкций в 2022 г. Однако на стадии начала производства оба проекта были провальными в сравнении с прежним тогда уровнем.

Третий, казавшийся прорывным, проект, связанный с организацией производства магнитной памяти по схеме Back End компанией «Крокус Наноэлектроника», как и все проекты «Роснано» оказался настолько рыночно, технически и методически сырым и несостоятельным, что фактически не заработал с 2016 г. Российская практика освоения финансирования без профессиональной экспертизы даже на импортном оборудовании, но без технологий и конкурентных рынков, в этом проекте полностью провалилась.

В микроэлектронике (да и в любой другой отрасли) для успешной реализации новых проектов необходим стратегический трезубец, включающий *инвестиции, технологии и рынки сбыта*. Фундаментом для него всегда была политическая и экономическая стабильность, и в настоящее время эти факторы стали как никогда актуальными. Отсутствие хотя бы одного из них ставит под сомнение достижение положительного результата. В лучшем случае проект может быть реализован, но он не станет прибыльным.

Производство корпусов в СССР и в новой России всегда было проблемным и, в первую очередь, ассоциировалось с металлокерамическими и металлокерамическими корпусами для изделий специального применения. К сожалению, эта задача со стороны государства не считалась приоритетной и поручалась предприятиям второго и третьего эшелонов, которые часто «варились в собственном соку». Специализированным производством корпусов для мощных СВЧ-транзисторов в СССР не занималось ни одно предприятие: их разрабатывали и выпускали сами производители этих транзисторов (воронежское НПО «Электроника», минский «Интеграл», московский завод «Пульсар»). Бывали некоторые исключения, когда в СССР закупалась технология и линия оборудования для сборки простых металлокерамических корпусов диодов, которая до сих пор работает на томилинском заводе ТЭЗ. Основной производственной площадкой для корпусов считался ЗПП (г. Йошкар-Ола), который ею и остался. Несколько лет назад к нему добавилось производство АО «Тестприбор». Этого явно недостаточно для страны. Наглядной иллюстрацией текущего положения российских производителей корпусов является Донской завод радиодеталей (ДЗРД). Предприятие, входящее в корпорацию «Ростех», много лет балансирует на грани закрытия, а сама корпорация регулярно дистанцируется от завода и не стремится к обновлению его оборудования и технологий. Изготовленные заводом металлокерамические корпуса не отличаются оригинальностью и новизной, сроки поставок срываются, а качество оставляет желать лучшего. Монопольное положение этого производителя в стране и отсутствие конкуренции не оставляют покупателям даже возможности применения более дешевых аналогичных зарубежных корпусов. Сложность корпусов за последние 20 лет заметно выросла не только по количеству выводов и площади, но и по плотности коммутационных соединений, что накладывает большие ограничения на применяемые материалы, оборудование, технологии, а также на чистоту производственных помещений. Казавшаяся ранее необходимой только для производства чипов и пластин электронная чистота класса 10 и 100 уже требуется для выпуска больших и сложных корпусов ИС и современного производственного оборудования. Без нее приемлемого качества и выхода годных не достигнуть.

В нашей стране нет очевидных препятствий и проблем для сборки продукции в планарных металлокерамических и металлокерамических корпусах на 8–16 выводов, в которых представлена основная часть специальной продукции еще советской и российской разработки. Несмотря на низкую степень автоматизации сборочных процессов еще на советском, российском и белорусском оборудовании увеличение объемов выпуска можно достигнуть за счет перехода на двух- или трехсменный режим работы. При этом могут возникнуть проблемы с производством необходимого количества самих корпусов из-за ограниченной производительности завода.

За счет закупки предприятиями современного импортного сборочного оборудования стало также возможным пилотное и мелкосерийное сборочное производство в более сложных металлокерамических корпусах CQFP144-256, CPGA и т. д. Однако поскольку это оборудование закупалось выборочно и работает не в составе полных автоматических линий, повышение его производительности ограничено. Сдерживающим фактором также станут низкие объемы производства и выход годных собственно корпусов. Самыми проблемными являются корпуса с шариковыми выводами CBGA-типа. Их не любят заказчики, а производство корпусов по полному циклу в стране практически отсутствует. Сборка продукции с их использованием носит единичный характер.

В производстве изделий в монолитных пластмассовых корпусах в России, в основном, представлены корпуса типа TO-220, TO-218, D2PAK, DPAK, SOT, DO, DIP8, DIP16, SO8, SO16 и некоторые другие для диодов, транзисторов и микросхем невысокой степени интеграции. Более сложные корпуса PBGA-типа на 500–600 выводов имеются только у GS Nanotech. Для еще более сложных изделий использовался сборочный сервис в Юго-Восточной Азии из чипов, изготовленных за рубежом или в России. Однако из-за санкций сборка в Японии, Южной Корее и на Тайване стала проблематичной.

У отечественной электронной промышленности в 2000–2010 гг. были две возможности создания современного производства герметичных металлокерамических корпусов. Первая до 2014 г. предусматривала закупку за рубежом линии и технологии производства современных многовыводных и безвыводных корпусов, а также строительство полностью нового завода, не обремененного энергетическими и экологическими проблемами советских зданий и предприятий. Такой проект не был реализован. Однако даже в 2020 г. известная японская компания имела планы строительства собственного завода в России и через престижный японский инновационный институт обращалась к автору настоящей статьи с просьбой оказать содействие, консультирование в выборе места строительства и типов герметичных корпусов для производства. По неизвестной автору причине (о них можно только догадываться) они не стали развивать этот проект, хотя в текущих условиях их постигла бы участь зарубежных автосборочных заводов в России.

Главными противниками перехода с герметичных на альтернативные пластмассовые корпуса в отрасли являются заказчики из Министерства обороны. Они до сих пор живут опасениями 1970–1980 гг. и не хотят ничего менять, хотя мир электроники давно стал другим и даже в современных военных боингах более половины электронной комплектации — в пластмассовых корпусах. Своего Уильяма Перри в нашей стране не нашлось. Конечно, в нашей отрасли есть продукция с приемкой заказчика в пластмассовых корпусах, и желающие могут привести соответствующие примеры. Автор тоже может это сделать, так как в свое время участвовал в их создании. Однако это исключение имеет ограниченный характер и не отражает общей тенденции.

Заметим, что современное производство изделий в пластмассовых корпусах требует не только соответствующего сборочного оборудования, но и прецизионных выводов штампованных и травленных рамок из меди и ее сплавов, локального покрытия траверс и монтажной площадки серебром и золотом, герметизирующих пластмасс, коммутационных многослойных плат для многовыводных корпусов, производства которых в нашей промышленности практически отсутствуют. Без них даже современная импортная линия сборки нецелесообразна.

В первую очередь, российским властям, специалистам и заказчикам необходимо выйти из образа мышления XX-го века, оглянуться по сторонам, чтобы увидеть больше возможностей в мире, в том числе в отношении микроэлектронных корпусов. Тогда, вероятно, появятся шансы повысить конкурентоспособность нашей микроэлектроники на мировом рынке.

Эпилог I

Похоже, в настоящее время происходит очень важное событие, определяющее ближайшее будущее Пентагона и имеющее не меньшее значение, чем меморандум Уильяма Перри в 1993 г. Оборонное ведомство США формирует новую полупроводниковую коммерческую экосистему США, ориентированную на создание современной продукции военной микроэлектроники не по зрелым, как теперь, а по самым передовым техпроцессам, включая технологию Intel 18A (аналог процесса 2 нм компаний TSMC и Samsung), которая появится у Intel в 2024 г. Программа Пентагона Rapid Assured Microelectronics Prototypes — Commercial (RAMP-C) предназначена для быстрого создания прототипов на основе коммерческих технологий и пластмассовых корпусов. О ее важности свидетельствует состав участников, включающий компании Intel, Nvidia, Qualcomm, Microsoft, IBM и др., а также недавно присоединившихся производителей вооружений Boeing и Northrop Grumman. Очевидно, что это решение является ответом на усложнившуюся международную обстановку, угрозу новой мировой войны и направлено на максимальное использование не только имеющихся коммерческих технологий и корпусов, но еще и находящихся в разработке.

Это новый подход в создании современных средств вооружений. Использование коммерческих технологий и пластмассовых корпусов означает, что стоимость военных микросхем, реализованных

Комментарий специалиста

**Андрей ЛИВИНЦЕВ, к. ф.-м. н.,
директор по развитию бизнеса,
«ТД Симметрон ЭК»**



Статья Дмитрия Боднаря особенно актуальна и важна в настоящее время для понимания проблем, возникающих в области корпусирования ИС, и, в целом, проблем развития микроэлектроники. Она полно и информативно дает общую картину текущей ситуации в стране с корпусированием микросхем, применяемых в области космической и военной электроники, поскольку именно эта продукция была и остается основной, востребованной российскими заказчиками. Сама логика развития корпусирования ИС у нас была, да и по-прежнему строится исходя из потребностей отечественных заказчиков из космической отрасли и ВПК. Неудивительно, что именно их взгляды и требования определяли вектор развития производства корпусирования микросхем с учетом специфических технических, а также экономических особенностей этих отраслей. Статья, по утверждению самого автора, носит скорее полемический характер, и предметом для полемики могут, видимо, выступать причины и следствия текущей ситуации в отрасли. С моей точки зрения, ссылка на некоторый консерватизм военных заказчиков или регуляторов как некий тормоз развития не вполне корректна, поскольку г-н У. Перри, издавая свою директиву, находился в совершенной другой среде с иными моделями развития, в частности, и микроэлектроники. Иными словами, сначала возникла мощная, условно назовем ее «гражданской», микроэлектроника, которая развивалась по своим законам и быстро опередила некоторые требования и технологические возможности, востребованные военными, а уже затем появилась директива. В условиях нашей страны такое не могло произойти принципиально, поэтому отечественным заказчикам не на что было переходить, а вкладывать огромные инвестиции в новые технологические процессы с их точки зрения, видимо, было просто нецелесообразно, поскольку российские заказчики не в состоянии сформировать спрос, который позволил бы вернуть инвестиции. Таким образом, путь к совершенствованию технологий сборки ИС, да и других микроэлектронных технологий следует искать лишь в направлении объединения усилий со всеми, кто к этому готов. Прежде всего, это Китай, страны БРИКС и ЕвразЭС. В настоящее время микроэлектронные технологии являются «детисем» глобализации (основанной на господстве «западных» транснациональных корпораций) и решить все проблемы в рамках одной, отдельной страны едва ли возможно. Для этого необходимо объединить как доступные рынки, так и ресурсы.

Особенно показательным, что статья Дмитрия Боднаря выходит тогда, когда TSMC, нынешний лидер микроэлектронных технологий, заявила о начале работы своей первой фабрики, на которой будут применяться автоматизированные процессы упаковки и тестирования чипов с помощью 3D-корпусировки.

таким образом, будет снижаться вместе с коммерческой продукцией по мере совершенствования техпроцессов.

В апреле Intel заявила о поставке первых прототипов многокристалльных корпусов, созданных в рамках программы SHIP (State-of-the-Art Heterogeneous Integrated Packaging) для Министерства обороны США. Эта программа предоставляет МО доступ к передовым технологиям гетерогенной сборки коммерческой продукции компании Intel, включая технологии EMIB, 3D Foveros и Co-EMIB, что позволяет МО США использовать усовершенствованные библиотеки пластиковых корпусов и микросхем, которые ускорят создание прототипов, тестирование и включение усовершенствованных устройств в военную технику. Это означает большой шаг в создании еще более «умного» оружия с помощью полупроводниковой микроэлектроники, который автор статьи предсказывал в конце прошлого года. Все элементы их разработки и производства будут сосредоточены в США.

Выводы

1. Мировая микроэлектроника за последние 30 лет достигла большого прогресса в расширении возможностей производства полупроводниковой продукции в герметичных и пластмассовых корпусах разной сложности и замене ими дорогих изделий в герметичных корпусах даже для военного и космического применения.

2. Российские власти оказались неспособны реализовать ни одно из необходимых условий (инвестиции, технологии, рынки сбыта) для развития производства современных передовых микроэлектронных корпусов. Власти также не обеспечили создание экономической и политической стабильности для привлечения заинтересованных зарубежных компаний. В результате увеличилось отставание отечественной микроэлектроники по всем направлениям, включая производство корпусов.
3. Российская микроэлектроника все больше отстает от зарубежной в возможностях производства корпусов всех типов. В силу односторонности развития российского полупроводникового рынка с превалированием военных изделий приоритет остается у герметичных планарных металлокерамических корпусов малой и средней сложности до 256 выводов. Возможности производства в России более сложных металлокерамических корпусов типа CBGA, CLGA, CPGA, CCGA на 500 и более выводов ограничены из-за отсутствия технологий, существующего уровня производства и оснащения в отечественных компаниях.
4. Из-за практического отсутствия в России рынка гражданской электроники и соответствующих технологий сборки производство российской продукции в пластмассовых корпусах безнадежно отстало от мировых тенденций. Консерватизм российских военных заказчиков не позволяет отечественной электронной промышленности перейти с сохранением надежности с изделий в дорогих герметичных корпусах на более дешевые пластмассовые корпуса, хотя бы в продукции наземного и воздушного применения.
5. В России полностью отсутствует развивающееся за рубежом производство пластмассовых корпусов с открытой полостью и изделий с ее применением, позволяющих не только сократить сроки вывода новой продукции на рынок, но и снизить затраты на оборудование промышленной сборки и себестоимость в сравнении с герметичным корпусами. Выпуск полупроводниковой продукции даже с использованием зарубежных корпусов с открытой полостью не развивается из-за отсутствия соответствующей нормативной базы, слабого рынка и консерватизма заказчиков.
6. Из-за отсутствия в стране современных сборочных предприятий в пластмассовых корпусах, оснащенных передовым автоматизированным оборудованием и технологиями, а также в силу высокой себестоимости производственных процессов на наших предприятиях у российской электронной промышленности нет шансов экспортировать конкурентоспособную гражданскую продукцию на мировой рынок. По этой причине в принятой стратегии развития электронной промышленности России до 2030 г. кроме декларации роста экспорта не указаны конкретные способы его достижения. Ранее имевшиеся возможности сборки отечественных чипов за рубежом в пластмассовые корпуса разной сложности теперь значительно снизились из-за санкционных ограничений.
7. Правительство США и Пентагон делают стратегические шаги на опережение по использованию еще только разрабатываемых самых передовых коммерческих технологий и пластмассовых корпусов для создания современных военных микросхем и еще более «умного» оружия, ориентированных на сквозное суверенное производство в США.

Эпилог II

Одной из главных тенденций в использовании полупроводниковых корпусов является переход от выводных к безвыводным (не совсем корректное, но часто применяемое выражение) конструкциям, что происходит в корпусах всех уровней сложности. Самыми распространенными среди сложных являются корпуса с шариковыми выводами типа BGA, а среди более простых — QFN, DFN с нижними и боковыми плоскими выводами, не выходящими за габаритные размеры тела корпуса. Бурное развитие нитридогаллиевых компонентов с отличными динамическими характеристиками привело к использованию технологии сборки flip-chip и маловыводных BGA-

корпусов для простых микросхем низкой степени интеграции, а также транзисторов и диодов, изготавливаемых по этому техпроцессу, что позволяет снизить динамические потери приборов и повысить их частотные свойства.

Отечественная полупроводниковая отрасль в своих производственных возможностях по зрелым технологиям все больше отстает от мировых фабрик по процессам менее 65 нм. До 2022 г. этот пробел восполнялся за счет заказов на изготовление чипов за рубежом. Однако существуют рыночные ниши, где эти процессы не нужны и потребность в такой продукции ежегодно растет. У нашей страны были хорошие шансы воспользоваться этим спросом для насыщения собственного рынка и даже выхода на экспорт. К такой продукции относится силовая полупроводниковая электроника, изготавливаемая по кремниевой, нитридогаллиевой и карбидокремниевой технологиям. Резкий рост мирового рынка изделий двух упомянутых типов в последние годы почему-то оказался сюрпризом для нашего Минпромторга.

Автор последние шесть–семь лет всеми способами, в том числе в своих научных публикациях обращал внимание на необходимость и возможность развития этих приборов в нашей стране, но погоны чиновников и отраслевых руководителей за миром освоения 28-нм техпроцесса мешала им трезво оценить перспективы. Теперь все просят бюджетные средства на освоение широкозонных полупроводников и пытаются выйти на тот уровень, который уже достигнут мировой отраслью около 10 лет назад. Эти же категории изделий для гражданского и военного рынков массово используют не только пластмассовые безвыводные QFN-корпуса для микросхем и СВЧ-электроники, но и мощные PDFN6 и PDFN8 для силовых дискретных транзисторов и диодов. Последние являются незаменимыми для НЕМТ-транзисторов, выполненных по технологии GaN-на-кремнии. Только с их применением реализуются все преимущества по снижению потерь таких приборов. В нашей отрасли об этом пока не задумываются, а когда сообразят, что к чему, мировая силовая электроника сделает еще несколько шагов вперед. И так постоянно. С выхода одной из первых в отрасли публикаций автора по современным методам 3D-сборки [8] в 2011 г. прошло 12 лет, но в России ничего не изменилось, кроме попыток некоторых компаний показать принципиальную возможность такой сборки и того, что в мире давно поставлено на серийный поток. Во многом это обусловлено только рекламными целями этих компаний для получения госфинансирования.

Консерватизм военных заказчиков во всем мире при переносе гражданской технологий и приборов для военного применения понятен, и автор многократно об этом писал. Но сколько времени должно пройти для изучения и заимствования положительного зарубежного опыта по пластиковым корпусам, чтобы даже через 30 лет не использовать его у себя? Таким образом, автор не может согласиться с утверждением уважаемого Андрея Ливинцева, что для этого нашим военным заказчикам следовало вкладывать большие инвестиции в упомянутое направление. Как раз наоборот: переходя с металлокерамических на пластиковые корпуса для неэкстремальных применений, технологии сборки по которым, по крайней мере, имеются в нашей стране, можно было сэкономить значительные средства и направить их на создание новых технологий и изделий. Сэкономленных средств с лихвой хватило бы также на создание или закупку и запуск нескольких сборочных линий для сложных многовыводных пластмассовых корпусов для тех же военных изделий. Проблема в том, что в нашей стране финансирование на последующие годы выделяется от текущих показателей и никто из военных заказчиков и производителей не заинтересован в снижении цен на военную продукцию. Иначе финансирование могут снизить, а это единственный источник существования большинства предприятий. Кроме того, никто не хочет рисковать погонами, принимая, как Уильям Перри, рискованные решения. Вероятно, автору следовало назвать это другими словами, а не консерватизмом.

Возникает резонный вопрос: в какую аппаратуру устанавливать все эти и другие будущие и выпускаемые российские электронные компоненты, а также где этот рынок? В этом вопросе — главная претензия автора к нашим властям. За последние 20–30 лет в стране не сдела-

но ничего (от слова «совсем») для развития областей применения электроники и, в первую очередь, в гражданском секторе. Мы все еще пользуемся советским наследием, тающим с каждым годом. Космическая и военная электроника, особенно для более сложных ИС, базируется на импорте, а в сферах гражданской и автомобильной электроники в свое время даже не была предпринята реальная попытка локализовать производство продукции не самой высокой сложности для зарубежных отверточных заводов в России, как в свое время сделал Китай. О рисках отверточной сборки зарубежных автомобилей в России без локализации автор писал еще в 2012 г. [9]. Более того, АвтоВАЗ при молчаливом согласии и бездействии Минпромторга убрал из комплектации даже те компоненты, которые производились в стране, и перешел на зарубежные. Никаких альтернативных решений (например, предусматривающих строительство полупроводникового завода Bosch в России) для организации выпуска качественной автоэлектроники министерство не представило, а ограничивалось многократным выделением громадных средств частному АвтоВАЗу, которые были потрачены на его содержание. В сфере космической техники мы потеряли когда-то лидирующие позиции, а с ними просело и производство космической электроники. Таким образом, на этом рынке мы не только ничего не приобрели, но и потеряли. Кроме того, отечественная отрасль все больше отстает даже по собственным технологическим возможностям выпуска чипов и сборки простых полупроводников всех типов. Только одной сферой применения электронных компонентов для военного и космического приборостроения без массовых гражданских изделий не удастся удержать полупроводниковые предприятия на плаву, а тем более обеспечить их устойчивое техническое развитие. И прав Александр Ачкасов, что при слабом рынке ни одно наше даже частное предприятие не может быть рентабельным и конкурентным. Даже при стабильной политической обстановке предприятия будут ежегодно закрываться и банкротиться из-за нерентабельности и заказов малого объема.

Техническая модернизация действующих предприятий в настоящее время как минимум поставлена на паузу. Временные всплески спроса на текущие военные заказы ситуацию не изменят, а на смену обанкротившимся предприятиям никто не приходит. Похоже, такое положение вещей никого из властных чиновников не заботило, так как ставка на экспорт сырья все годы была главенствующей. Ставка руководства страны не сработала, поскольку экономические решения ищут не в казино.

Ни одна отрасль в мире (особенно высокотехнологичная) ни в одной стране не может эффективно развиваться только за счет государственных инвестиций, что наглядно доказывает пример США в области космического ракетостроения. Наши чиновники и власти этот тезис много лет оспаривали, но в последние годы вынуждены были его признать, допустив частный капитал в отечественную космическую отрасль. Другой вопрос — к какому итогу мы придем при отсутствии конкуренции и рынка? В нашей полупроводниковой отрасли из-за слабого рынка даже частные компании прекращают свое существование, а высокие чиновники снова вернулись к постулатам, что только государство за счет военного госзаказа способно обеспечить эффективное развитие электронной промышленности. Автор несколько лет назад в статье о рокировке военной и гражданской микроэлектроники [1] показал, что последние 30 лет в мире как раз гражданская микроэлектроника является источником инноваций и прогресса военной отрасли, а не наоборот. Наши власти опять утверждают, что весь мир идет не в ногу, и только Россия стройным маршем движется к новому светлему будущему, но фактически ее экономику ждет участь Северной Кореи.

Есть ли перспективы у страны при таком подходе и игнорировании основных стратегических тенденций глобального развития в отрыве от остальной части мира? Полупроводниковая микроэлектроника и корпуса для нее являются только частным случаем общей картины. Для выявления корневых проблем анализ причин неудовлетворительных результатов требует перехода от частного к общему. Впрочем, каждый сам должен оценить происходящее и сделать соот-

Комментарий специалиста

Александр АЧКАСОВ, д. т. н., профессор ВГЛУ

Казалось бы, поднятая в статье тема не нова. На моей памяти она периодически звучала в «кулуарах» отрасли на протяжении последних 15 лет. Однако в контексте развернувшихся с 2022 г. событий актуальность поднятого вопроса существенно выросла.

Дмитрий Боднарь приводит релевантные примеры успешной системной работы как американских, так и европейских чипмейкеров по совершенствованию технологических решений и специализированных стандартов для обеспечения работы микросхем в пластиковых корпусах в жестких условиях. Впечатляют успехи нишевых компаний типа VORAGO Technologies с изделиями для дальнего космоса.

Действительно, российская микроэлектроника за прошедшие десятилетия, при наличии интересного кейса компании GS Nanotech с корпусами PBGA и PQFN, практически никак не продвинулась в вопросе поиска решений для перевода существенной части полупроводниковых изделий на корпусирование в пластик. При этом в новой санкционной реальности очевидно, что ключевые микроэлектронные компоненты нужно делать самим. В первую очередь, для «военки». Но, допустим, совершенно не понятен смысл установки на борт военного квадрокоптера (для замены широко применяемых в СВО китайских DJI) тяжелой и дорогой металлокерамической микросхемы. Примеры с крошечным американским БПЛА Black Hornet весом 16 г и перспективным 64-выводным металлокерамическим корпусом типа CDFP йошкар-олинского ЗПП весом 20 г тоже наводит на размышления.

Если же говорить о гражданской микроэлектронике, то в ней главным определяющим фактором является цена, а существенного снижения себестоимости корпусирования можно будет добиться только при росте объемов производства. При имеющихся объемах загрузки та же компания GS Nanotech работает в убыток даже прикратно более высокой цене за услуги сборки в сравнении с китайскими OSAT.

Вопросы, затронутые в статье, говорят о необходимости оперативного комплексного анализа и пересмотра по его итогам взглядов заказчиков МО, Минпромторга и в целом отечественной отрасли на перспективы применения пластиковых корпусов для ответственных применений.



ветствующие выводы. И лучше поздно, чем никогда, иначе через несколько десятилетий жалеть об этом и обвинять нас будут уже наши потомки. Скорее всего, при существующем развитии событий это произойдет раньше.

Литература

1. Дмитрий Боднарь. Мировая рокировка военной и гражданской микроэлектроники. Везде, кроме России. Электронные компоненты. 2018. № 4.
2. Дмитрий Боднарь. Пластмассовые корпуса с открытой полостью для интегральной и СВЧ-электроники. Компоненты и технологии. 2016. № 11.
3. Improving RF Power Transistors Reliability with New Plastic Packages. Freescale Semiconductors. 2014.
4. RF-Capable Packaging Verified for 5G and IoT Semiconductor Devices. Microwaves & RF. October 6. 2020.
5. Space-Enhanced Plastic ICs Boost LEO Satellite Reliability. Electronic Design. May 9. 2023.
6. Renesas Launches High-Reliability Radiation-Hardened Plastic Portfolio for Satellites in Medium and Geosynchronous Earth Orbits. July 15. 2021 // www.renesas.com
7. The evolving world of radiation-hardened electronics for space. Military Aerospace Electronics. June 28. 2021.
8. Дмитрий Боднарь Д. Современные технологии изготовления чипов и сборки в полупроводниковой микроэлектронике. Компоненты и технологии. 2011. № 4.
9. Дмитрий Боднарь. «Отверточное» скудоумие, или почему России не грозит увеличение производства автоэлектроники. Электронные компоненты. 2012. № 8.