

Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники

Часть 3. Российская силовая электроника: десятилетия упущенных возможностей, или ожидание эволюционного скачка

Дмитрий БОДНАРЬ,
к.т.н., генеральный директор,
АО «Синтез Микроэлектроника»

Существует заблуждение, что отставание технологий российской силовой полупроводниковой микроэлектроники от мировой значительно меньше в сравнении с отставанием в технологиях СБИС. Однако практическое инновационное бездействие в этой сфере в России за последние 35 лет при мощной эволюции силовых полупроводников в мире только увеличивает этот разрыв, который составляет 15–20 лет. За последние 10–15 лет наши предприятия потеряли даже существовавший ранее небольшой экспортный потенциал простых изделий силовой электроники. Из-за наличия большого количества структурных, технологических, кадровых проблем и слабой технической оснащённости, а также без трансформации отечественного рынка у российских предприятий мало шансов осуществить эволюционный скачок. Без привлечения зарубежных инноваций, технологий и строительства современных производств это отставание будет только расти.

Краткая история экспорта полупроводников из России

Одним из главных признаков конкурентности продукции является ее экспортоориентированность и востребованность на мировом рынке. Экспорт полупроводников никогда не был сильной стороной как советской, так и российской микроэлектроники. За 1990–2010 гг. положение с экспортом полупроводниковых изделий постепенно менялось в худшую сторону для отечественных предприятий. Основными продуктами экспорта являлись пластины и чипы простых микросхем и диодов силовой электроники. Корпусирование этих изделий хронически отставало от Китая не только по номенклатуре корпусов, особенно для поверхностного монтажа, но и по их стоимости. Развитие китайской микроэлектроники в 1990-е гг. начиналось как раз со строительства зарубежными и китайскими компаниями сборочных заводов, а производство чипов в Китае еще не приобрело текущих масштабов.

Основные этапы экспорта:

- конец 1980 – начало 1990 гг. – экспорт в Юго-Восточную Азию (ЮВА) чипов микросхем таймеров для бытовой техники («Ангстрем») еще при отсутствии и становлении микроэлектроники в Китае;
- 1996–2005 гг. – экспорт чипов силовой электроники в ЮВА («Микрон», «Ангстрем», «ВЗПП-Микрон»);

- 2006–2008 гг. – снижение экспорта, Китай стал уходить вперед;
- 2009–2015 гг. – резкий рост количества производителей и конкурентов в Китае. Российские предприятия стали неконкурентными;
- с 2015 г. компаниям из России нечего предложить на экспорт в ЮВА ни по одному направлению полупроводниковой продукции из-за технической и ценовой неконкурентоспособности, а также отсутствия такой продукции.

В период становления китайской микроэлектроники в 1990–2000-е гг. некоторые наши предприятия («Микрон», «Ангстрем», «ВЗПП») даже имели изделия с экспортной платформой и поставляли их в ЮВА. Это были простые микросхемы регуляторов, стабилизаторов напряжения, компараторов, операционных усилителей и т. д., диодов Шоттки в составе пластин диаметром 100 и 150 мм. ВЗПП также поставлял небольшое количество корпусированных СВЧ-транзисторов в США, а брянский «Кремний Эл» экспортировал пластины с диэлектрической изоляцией. Одними из наиболее конкурентных для экспорта были пластины диодов Шоттки на напряжения 100 В и особенно на 150–200 В, в отношении которых азиатские производители еще не могли составить конкуренцию, поскольку такая продукция ими еще не выпускалась. Основную конкуренцию по диодам Шоттки, но в корпусированном виде (поскольку в чипах не продавались), нам составляли изделия компаний IR и STMicroelectronics и только с максимальным напряжением до 150 В. Автор данной ста-

ты – создатель этой продукции и один из руководителей «ВЗПП-Микрон» в 2005–2006 гг. – иногда совместно со специалистами и руководителями «Микрона» и «Ситроникса» многократно посещал Тайвань, Южную Корею, Китай, Гонконг для продвижения продукции предприятия и видел происходящее изнутри. Следует заметить, что в этот период конкуренцию российским экспортерам по микросхемам силовой электроники также составляло белорусское предприятие «Интеграл», которое по упомянутым микросхемам ни в чем не уступало нашим изготовителям.

К середине 2000-х гг. некоторые отечественные предприятия даже смогли наладить совместный бизнес с западными компаниями. Одним из таких примеров было взаимодействие по экспорту и совместным разработкам между «ВЗПП-Микрон» и европейским подразделением компании IXYS, участником которого был автор статьи. По соглашению с IXYS серьезно прорабатывался даже проект с поставкой этих изделий под маркой IXYS со сборкой в Китае чипов, произведенных «ВЗПП-Микрон». Из-за возможности выступить сборочным партнером известной международной компании IXYS этот проект был интересен китайским сборочным заводам, а сам логистический процесс переработки товара вне зоны таможенной территории с последующей отправкой продукции из Китая в Германию, минуя территорию России, отрабатывался впервые в таможенной практике нашей страны для полупроводниковых ИЭТ. Поскольку его реализация обростала большим количеством банковских, таможенных проблем и затребованных этими структурами необходимых подтверждений, поскольку весь проект должен был проходить под эгидой, контролем и ответственностью российской компании, включая все валютные платежи и выбор китайского сборочного партнера, нам значительно помог предыдущий опыт организации сборки ИЭТ в ЮВА из отечественных чипов. «Микрон» также купил завод в Китае, стал развивать на нем сборочное производство и создал для продвижения продукции две компании – в Гонконге и Тайване. Концерн «Ситроникс», в который тогда входил «Микрон», даже не очень удачно попытался провести IPO своих акций и позиционировал себя как первая в России хайтек-компания с капитализацией 1 млрд долл.

Однако к концу 2000-х гг. китайская микроэлектроника очень серьезно нарастила свой потенциал, и наши предприятия стали отставать сначала по экономическим, а затем и по техническим показателям своей продукции. Микросхемы более сложных типов даже по имеющимся в России биполярным и КМОП-технологиям с проектными нормами 0,8 мкм и менее на регулярной основе на экспорт не поставлялись. Из-за слабых технических спецификаций и неконкурентной цены также не экспортировались чипы российских MOSFET. Размеры чипов на рынке стремительно снижались. Для поддержания конкурентности необходимо было каждые два-три года модернизировать продукцию и технологии, обновлять ассортимент и оборудование. У наших экспортеров возникли проблемы с конкурентностью с нарастающими своими возможностями китайскими компаниями. С 2010 г. это стало особенно заметно, в первую очередь, по снизившемуся уровню и статусу покупателей из ЮВА: часто ими оказывались небольшие компании-посредники, даже не имеющие своих производственных мощностей по сборке, для которых главным требованием была меньшая цена.

С 2015 г. отечественным предприятиям практически нечего было предложить для экспорта во всех категориях изделий микроэлектроники. Китай при поддержке государства за последние десятилетия сделал большой скачок в технологиях и продукции полупроводниковой микроэлектроники, включая силовую электронику, а количество новых фаблесс- и IDM-компаний в Китае ежегодно росло.

Показательным является то, что в настоящее время с веб-сайтов наших экспортеров исчезли не только экспортные изделия, вместо которых появилась электронные компоненты с ВП, но и англоязычные страницы. Поставлять на экспорт стало нечего.

Однако даже российским предприятиям, у которых до последнего времени была конкурентная экспортная продукция, изменившаяся

мировая политическая обстановка не только усложнила бизнес, но поставила их на грань выживания и банкротства. Показателен пример ставропольского АО «Монокристалл». Эта компания в 2015 г. была признана крупнейшим мировым поставщиком слитков и пластин искусственного сапфира для светодиодной отрасли, а также стекол для смартфонов Apple. Предприятие также является поставщиком пластин сапфира российским полупроводниковым заводам для производства ИЭТ по технологии кремний-на-сапфире (КНС). Еще в 2022 г. компания «Монокристалл» контролировала более трети мирового рынка искусственного сапфира, и практически вся продукция поставлялась на экспорт. В мае 2026 г. компания заявила, что планирует подавать заявление о банкротстве из-за больших долговых обязательств перед кредиторами в размере более 15 млрд руб. [1]. Руководство объяснило ухудшение ситуации на предприятии перебоями с поставками сырья, закрытием европейского рынка, снижением спроса на электронику в Азии и повреждением завода в Белгородской области в результате обстрелов в мае 2023 г. Последнее привело к снижению производственных мощностей на 25%. За 2025 г., согласно пояснениям к бухгалтерской отчетности, опубликованной самой компанией, выручка от продажи продукции и услуг упала более чем на 500 млн руб. – с 1,8 до 1,2 млрд руб. Штат сократился на 250 человек до 512 сотрудников [2]. К сожалению, все указывает на то, что ранее очень эффективное и конкурентное предприятие может прекратить свою деятельность или пройдет через реструктуризацию.

Компания автора данной статьи до 2022 г. тоже экспортировала полупроводниковую продукцию в дальнее зарубежье, но затем по независящим от нее причинам это стало невозможным.

Российские силовые полупроводники

Еще с периода СССР российская силовая электроника сохранила хорошие традиции в технологиях биполярных транзисторов, которые до настоящего времени применяются для производства военной микроэлектроники и для некоторых небольших отечественных заводов остаются основными изделиями, позволяющими им еще оставаться на плаву.

В таблице приведена информация по основным отечественным полупроводниковым предприятиям, содержащая информацию по продукции силовой электроники, типам технологий, их проектным нормам и применяемым корпусам. Автор не претендует на ее абсолютную достоверность, поскольку она подготовлена на основе открытых сведений, содержащихся на веб-сайтах и в презентациях предприятий. Основная часть наших предприятий применяет старую биполярную технологию с проектными нормами свыше 1 мкм, а выпускаемая продукция в подавляющем ассортименте относится к линейке, сохранившейся еще с периода СССР и к зарубежным аналогам 15–20-летней и более давности и предназначенная для отечественного ВПК. Более современной КМОП-технологией с проектными нормами от 180 нм владеют АО «Микрон, а АО «Ангстрем» – от 0,6 мкм. **«Микрон» является безусловным российским технологическим лидером, значительно опережающим другие отечественные предприятия. Однако его уровень также значительно отстает от самых современных мировых предприятий силовой микроэлектроники как по отдельным техпроцессам (фотолитография, металлизация, ионная имплантация, утонение пластин и др.), так и по наличию законченных технологических маршрутов изготовления современных изделий (IGBT, MOSFET, SiC, GaN и др.).** Степень отставания от мирового уровня по отдельным техпроцессам у «Ангстрема» еще больше, но по сравнению с «Микроном» он имеет опыт производства транзисторов IGBT, MOSFET старых генераций с ВП. Однако технико-экономический уровень этих изделий неконкурентен и по всем показателям уступает мировым аналогам даже не предпоследней генерации. В технологиях и производстве силовых кремниевых транзисторов MOSFET и IGBT мы отстаем от мирового уровня на 15–20 лет. Ни одна российская компания никогда не поставляла их на экспорт на регулярной основе.

Таблица. Российские полупроводниковые производители ИЭТ силовой электроники

Предприятие	Тип продукции	Технология	Проектные нормы	Корпуса силовых ИЭТ
АО «Микрон»	ИС силовой электроники	КМОП, BCD, биполярная	0,18 мкм	сборочная фабрика в Китае SOT, TO, DIP, SOP
АО «Ангстрем»	ИС силовой электроники MOSFET, IGBT	КМОП	0,8–3 мкм 0,6 мкм	металлокерамические, пластмассовые TO, SOT, SOP модули
АО «Кремний Эл» (г. Брянск)	ИС силовой электроники, диоды, транзисторы, силовые модули	биполярная	0,8–3 мкм	металлокерамические 4–24 вывода металlostеклянные пластмассовые TO, DIP, SOT, SOP модули
АО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж)	кристаллы ДШ, диодов, MOSFET, ИС силовой электроники	биполярная MOSFET	1–3 мкм	–
АО «ВЗПП-Сборка» (г. Воронеж)	сборка диодов, транзисторов, ИС силовой электроники	сборка	–	металлокерамические 4–16 выводов металlostеклянные пластмассовые TO, SOT, SOP модули
АО «НИИЭТ» (г. Воронеж)	силовые и СВЧ Si, GaN HEMT-транзисторы	биполярная	1–3 мкм	металлокерамические пластмассовые 8–208 выводов
АО «Орбита» (г. Саранск)	биполярные диоды, транзисторы, ИС силовой электроники	биполярная	1–3 мкм	металлокерамические металlostеклянные DO пластмассовые TO, SOT, DIP, SOP
АО «НЗПП-Восток» (г. Новосибирск)	ИС силовой электроники, ограничители напряжения, стабилитроны (TVS/диоды Зенера)	биполярная, КМОП	1–3 мкм	металлокерамические 4–48 выводов металlostеклянные DO пластмассовые SOP, SOT, SOD
«ФЭМТ» (г. Фрязино)	биполярные транзисторы, IGBT, MOSFET, диоды	сборка	–	металлокерамические КТ металlostеклянные КТ
«Протон Электротекс» (г. Орел)	силовые модули Si, SiC, диодные, транзисторные, тиристорные, IGBT	сборка	–	модули
«Протон Импульс» (г. Орел)	силовые модули	сборка	–	модули
АО «ЗНТЦ»	ИС силовой электроники, силовые GaN-Si HEMT транзисторы	КМОП, биполярная	0,35–3 мкм	металлокерамические металlostеклянные пластмассовые TO, DIP, SOP, DFN, QFN
АО «Энергомодуль» (г. Москва)	силовые модули Si, SiC, диодные, транзисторные, IGBT	сборка	–	модули

У многих российских производителей кристаллов старая биполярная технология еще с периода СССР осталась не только главной, но и единственной имеющейся технологией. Микросхемы силовой электроники, выпускаемые «ВЗПП-Микрон», «Орбитой», «Кремний Эл», относятся к старой биполярной технологии. Единственная российская компания, начавшая выпуск SiC диодов Шоттки вначале на импортных чипах, а затем на собственных – АО «Кремний Эл» (г. Брянск) [3]. Для сравнения, компания Infineon выпустила первые SiC диоды Шоттки еще в 2001 г. [4]. Ни одна отечественная компания не производит массово пластины с чипами силовых SiC- и GaN-транзисторов. АО «Арсенал» применяет для корпусирования чипы SiC MOSFET, изготовленные за рубежом [5]. Все российские компании, выпускающие силовые транзисторные SiC-модули, применяют импортные покупные чипы.

В текущих условиях основными и подавляющими в номенклатуре выпускаемой российскими полупроводниковыми заводами продукции являются изделия с военной приемкой, доля которых достигает до 90–100%. Гражданская продукция неконкурентна и ее многие типы, в том числе для автоэлектроники, наши предприятия перестали выпускать. По этой причине наполнение нашего рынка импортными комплектующими и их доля, несмотря на все программы и призывы властей к импортозамещению, с каждым годом только росли. Но если до 2022 г. у наших потребителей был приоритет за западными комплектующими, то затем он вынужденно сменился на китайские.

По номенклатуре применяемых корпусов силовой электроники ситуация не лучше. В основном это старые корпуса типа TO-220, TO-218, TO-247, DIP, SOP, а также более новые для поверхностного монтажа DPak, D2Pak, а также некоторые маломощные и маловыво-

дные SOT, DFN, QFN и др. Их производственные мощности небольшие, поскольку соответствующий потребительский рынок мал, а конкуренция по ИЭТ со стороны Китая значительная. Себестоимость сборки в этих корпусах значительно превосходит китайскую, что делает их неконкурентными для гражданской продукции. В основном же применяются металлокерамические и металlostеклянные корпуса для военной продукции. Даже предпоследние генерации «безвыводных» силовых корпусов DFN8 (5×6, 6×8, 8×8 мм) отсутствуют. Ни одна российская компания не выпускает силовые полупроводники в корпусах LGA, BGA. Российские компании в основном применяют технологии ультразвуковой и термокомпрессионной разварки выводов из Al, Au, хотя некоторые предприятия располагают импортными установками, позволяющими выполнять разварку выводов с помощью ленты из Cu, Al. Технологии монтажа чипов включают эвтектику Au-Si и напайку на мягкие припои на основе Ag и Sn. Современное оборудование, технологии монтажа чипов спеканием под давлением с использованием паст на основе Ag и Cu отсутствуют.

Особняком стоит самый современный в России сборочный завод GS Nanotech в Калининградской области (кстати, купленный за рубежом), который специализируется на сборке ИС в более сложных многовыводных корпусах, включая корпуса с шариковыми выводами и 3D-корпуса. Однако он практически не занимается силовыми полупроводниками.

В сборочном сегменте силовых модулей представлены «Протон Электротекс» и «Протон Импульс» (г. Орел), а также АО «Энергомодуль» (г. Москва). По техническому и технологическому уровню лидером является компания «Протон Электротекс», до 2022 г. даже поставлявшая свою продукцию на экспорт и использовавшая для нее импортные пластины с чипами транзисторов, тиристоров, диодов,

а также современное импортное сборочное оборудование. Попытки компании применить отечественные чипы оказались неудачными. Некоторые виды оборудования, особенно испытательного, «Протон Электротекс» разрабатывает и изготавливает самостоятельно.

Основные проблемы российского рынка силовой электроники и отечественных предприятий

У многих и даже у специалистов, не глубоко погруженных в тему силовой электроники, создается ошибочное впечатление, что в силовых полупроводниках отставание российских предприятий от мирового уровня намного меньше, чем в производстве БИС. На самом деле, это не так. Основными проблемами российского рынка и предприятий силовой электроники являются

- сохранившаяся еще с СССР монополизированность предприятий и рынка;
- высокая ориентация только на ИЭТ военного применения (70–100%);
- малый внутренний рынок и низкая потребность в ЭК;
- низкая конкурентоспособность отечественных ИЭТ даже на внутреннем рынке;
- отсутствие экспортоориентированных ИЭТ;
- слабый гражданский приборостроительный рынок;
- технологическая отсталость и устаревшие биполярные технологии еще с периода СССР у большинства предприятий;
- слабые техническая оснащенность и автоматизация производства, небольшие инвестиции в техническое и капитальное обновление;
- низкая энергоэффективность отечественных предприятий, ухудшающая экономику продукции;
- слабое применение для силовых ИЭТ современных методов САПР-проектирования продукции;
- зарубежные гражданские ИЭТ по автомобильным стандартам превышают по надежности российские для ВПК;
- низкая эффективность бюджетного финансирования, в основном направленная на текущее поддержание, создание устаревших аналогов зарубежных аналогов ИЭТ для ВПК;
- хронические срывы программ и стратегий развития отрасли.

Одним из типовых примеров, характеризующих уровень нашей продукции, приведен на рис. 1, где показана эволюция снижения одного из наиболее важных для IGBT-транзисторов компании Infineon параметров напряжения насыщения $V_{CE(sat)}$ и текущий уровень продукции АО «Ангстрем». Показатель «Ангстрема» чуть лучше уровня Infineon 1990 г. [6] (информация по этому параметру получена с веб-сайта АО «Ангстрем»). И это понятно – у Infineon в производстве технологии уже 8-й генерации, а у «Ангстрема» – только 2-й.

Еще одним недостатком отрасли являлось то, что, в отличие от СБИС, в отношении силовых микросхем и дискретных комплектующих практически не применялась фаундри-модель зарубежных фабрик для производства чипов. Считалось, что для основного заказчика в лице министерства обороны уровня наших технологий достаточно, а потребности рынка были небольшими. В результате полезный опыт

САПР-проектирования с использованием зарубежных дизайн-китов не накапливался, а разрыв в технологиях возрастал. Кроме того, при относительно дешевеющих импортных комплектующих наша продукция росла в цене и становилась еще менее конкурентной.

За последние 25 лет оборудование для производства чипов и сборки силовых полупроводников нашими предприятиями обновлялось слабо. Из-за отсутствия хорошей отечественной альтернативы в основном закупались одиночные импортные ручные и полуавтоматические установки ультразвуковой и термокомпрессионной разварки выводов и монтажа чипов методами напайки и эвтектики, а также оборудование для герметизации корпусов для ВП. Закупка автоматических линий для силовых полупроводников не рассматривалась даже в проектах.

Из-за неконкурентности и отсутствия аттестованных по международным нормам методов контроля параметров наши предприятия не очень ответственно относятся к важным характеристикам и параметрам своей продукции согласно общепринятой в мире классификации. Многие динамические параметры силовых ИЭТ, MOSFET не контролируются и не указываются в спецификациях. На рис. 2 приведены справочные данные категории ультрабыстрых диодов по классификации АО ФЗМТ (г. Фрязино) [7]. Категории быстрых, ультрабыстрых, гипербыстрых изделий предусматривают некоторые диапазоны значений быстродействия, причем они должны указываться на титульном листе, что подтверждает их класс. У АО ФЗМТ в названии ультрабыстрая категория имеется, но в числе параметров вообще отсутствует. Она упоминается в верхней части описания, но не в таблице основных параметров, хотя по квалификации для этих изделий является даже важнее статических параметров. Излишне говорить, что режим измерения этого параметра может оказаться важнее его значения. Этот пример характеризует подход наших предприятий к своей продукции и ее конкурентности.

Показателем, характеризующим конкурентный технологический уровень пластин и кристаллов наших предприятий, является факт, что ни одно из них за последние 25 лет не поставляло на экспорт на регулярной основе чипы и корпусированные MOSFET- и IGBT-транзисторы. Проблемами являлись не только их слабые технические спецификации, но и низкий выход годных и неприемлемые себестоимость и цена. Эти изделия применяются только для ВПК, где упомянутые показатели не являются главными. Как правило, на экспорт должны поставляться пластины с выходом годных чипов не менее 80%. Главным аргументом зарубежных покупателей в пользу такого требования является то, что меньший выход годных повышает себестоимость сборки из-за необходимости обработки большего количества пластин и является признаком невоспроизводимости техпроцесса, проблемного качества чипов, что может проявиться на сборке, испытаниях и отказах у конечного потребителя. Кроме того, низкий выход годных чипов на пластине резко ограничивает возможности применения двух обладающих минимальным разбросом соседних чипов диодов и транзисторов с пластины для диодных и транзисторных сборок с параллельным и катодным соединением в одном корпусе.

Неудивительным является то, что ведущие российские производители силовой полупроводниковой электроники «Микрон», «ВЗПП-Микрон», «ВЗПП-С», «Орбита» и др. не считают целесообразным участвовать в научно-технических конференциях, где они могли бы не только поделиться своими техническими достижениями, опытом и анонсировать новые изделия, но и почерпнуть опыт других. На таких мероприятиях не распределяют и не лоббируют выделение финансирования из бюджета, что является основной причиной безразличия к ним отношения. К тому же, на конференциях будет виден большой технологический разрыв между мировым уровнем и их продукцией.

Нашим предприятиям также свойственны системные проблемы по контролю параметров и испытаниям продукции. **Учитывая большую и возрастающую важность мощностных и тепловых параметров продукции силовой микроэлектроники нашим про-**

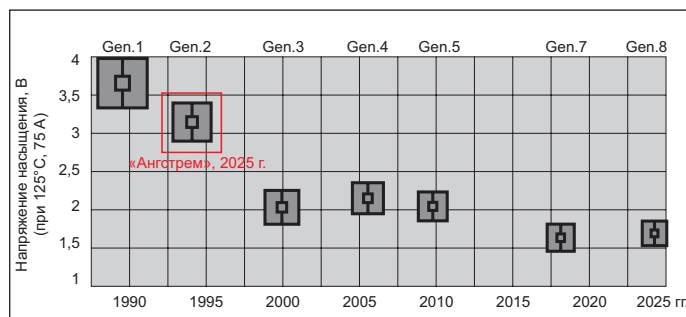


Рис. 1. Эволюция снижения напряжения насыщения $V_{CE(sat)}$ IGBT 75 A/1200 В ($T=125^{\circ}\text{C}$) Gen.1–8 компании Infineon и сравнение с достигнутыми показателями АО «Ангстрем» на 2025 г.

изводителям необходимо пересмотреть классификацию и применение методов контроля и испытаний этой продукции. На рис. 3 показаны некоторые примеры крайне характерных проблем сборки силовых ИЭТ, которые могут быть не сразу обнаружены при тестировании или испытаниях. Тестирование пакетом коротких импульсов длительностью 300 мкс не позволяет выявлять эти проблемы. Два верхних снимка РЭМ демонстрируют результаты ультразвуковой разварки Al-выводов с крайне неоптимальным давлением при разварке, из-за чего происходит не только деформация Al-вывода и его утонение почти наполовину, но и образование трещин на изгибе проволоки и даже в самом чипе. Время наработки до отказа таких приборов у потребителя непрогнозируемо, но оно будет коротким. Два нижних снимка показывают неполное заполнение припоем под чипами после его напайки на выводную рамку, которое вызовет быстрый тепловой перегрев чипа и отказ прибора. Эти и другие не такие явные проблемы не будут сразу обнаружены при тестовой и функциональной отбраковке, требуют новых методов и средств анализа и отбраковки, которые должны стать частью производственной линии (рентгеновские, акустические микроскопы, контроль теплового сопротивления, импульсного пикового тока и др.). В зарубежных производственных линиях такое оборудование давно присутствует как ее обязательная часть с полным или выборочным контролем. Кроме того, требует пересмотра концепция и состав параметров, включаемых в состав приемосдаточных, периодических и квалификационных испытаний (рис. 4). Контроль тепловых, динамических параметров и испытания на индуктивную нагрузку должны быть для мощных диодов

и транзисторов применены для всей продукции, а контроль такого важного параметра как импульсный пиковый ток I_{FSM} должен расширяться, а не являться только частью квалификационных испытаний. Контроль некоторых параметров должен быть перенесен из квалификационных в приемосдаточные. Это особенно важно для новых SiC- и GaN-изделий, обладающих большей мощностью в сравнении с кремниевыми. Иначе все эти проблемы начнут проявляться у потребителей продукции и отразятся на надежности. Учитывая сильный рост мощности силовых полупроводников нашим предприятиям также необходимо внедрять не только новые современные технологии производства чипов, но и новые технологии сборки, корпуса, материалы разварки внутренних выводов и монтажа чипов [8–9].

Проект «Кубик»

Микроэлектронный холдинг «Элемент» в течение нескольких последних лет прорабатывает организацию современного серийного производства силовых дискретных диодов и транзисторов по кремниевым и карбидокремниевым технологиям в рамках проекта «Кубик». «Элемент» в 2025 г. вложил в проект «Кубик» 6,1 млрд руб. и к 2030 г. рассчитывает вывести его на проектную мощность 100 тыс. кремниевых пластин, 40 тыс. пластин на карбиде кремния и, как заявляется, обеспечить до 60% спроса в России. Однако совместимость всех этих показателей вызывает вопросы. Холдинг планировал вложить в новое производство около 20 млрд руб. Большая часть уже потраченных инвестиций ушла на выплату авансов за оборудование – 5,6 млрд руб.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЯЗИНСКИЙ ЗАВОД
МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ»

ГЛАВНАЯ / НОВОСТИ / О ЗАВОДЕ / ПРОДУКЦИЯ / ДОКУМЕНТЫ / ВАКАНСИИ / КОНТАКТЫ

Мощные высоковольтные ультрабыстрые диоды 2Д684 АЕЯР.432120.557ТУ категории качества ВП

Область применения

Кремниевые эпитаксиально – планарные мощные высоковольтные ультрабыстрые диоды 2Д684 АЕЯР.432120.557ТУ, диодные сборки на их основе с общим катодом, с общим анодом, по схеме удвоения и однофазные мосты (далее по тексту – «диоды и диодные сборки»), в беспотенциальных герметичных металлокерамических корпусах с планарными гибкими выводами предназначены для работы в устройствах преобразовательной техники и электроприводах аппаратуры специального назначения.

Классификация, основные параметры и размеры

Диоды изготавливают одного типа четырех типонаименовалов в корпусах [КТ-111А-1.02](#) и четырех типонаименовалов в корпусах [КТ-111А-2.02](#).

Диодные сборки изготавливаются трех типов двенадцати типонаименовалов в корпусах КТ-111А-1.02 и двенадцати типонаименовалов в корпусах КТ-111А-2.02.

Диодные сборки с общим катодом относятся к первому типу, диодные сборки с общим анодом относятся ко второму типу, диодные сборки по схеме удвоения относятся к третьему типу.

Однофазные мосты изготавливают одного типа двух типонаименовалов в корпусе ПББК.435711.006ГЧ.

Основные и классификационные характеристики диодов и диодных сборок приведены в таблице ниже.

Схемы разводки диодов и диодов в составе диодных сборок в корпусе, нумерация выводов корпуса приведены на рисунках ниже.

Диоды и диодные сборки изготавливаются в исполнении, предназначенные для ручной сборки (монтажа) аппаратуры.

Условное обозначение диодов и диодных сборок при заказе и в конструкторской документации другой продукции:

- Диод 2Д684В АЕЯР.432120.557ТУ.
- Диодная сборка 2Д684ВС1 АЕЯР.432120.557ТУ.
- Однофазный мост 2Д684Д41 АЕЯР.432120.557ТУ.

Основные и классификационные параметры диодов и диодных сборок

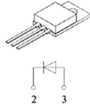
Условное обозначение	Основные параметры в нормальных климатических условиях ¹ , буквенное обозначение, единица измерения					Условное обозначение корпуса	Обозначение габаритного чертежа, схема разводки в корпусе, нумерация выводов	Обозначение схемы соединения ²
	$U_{обр\ max}$, В	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, А	$I_{обр}$, МА	$t_{вос\ обр}$, нс			
Диоды								
2Д684В	400	1,5	8	0,1	50	КТ-111А-1.02		Д
2Д684Г	400	1,5	15	0,1	50			
2Д684Д	600	1,6	8	0,1	50			
2Д684Е	600	1,6	15	0,1	50			

Рис. 2. Категория ультрабыстрых диодов на веб-сайте АО ФЗМТ с отсутствием параметра быстродействия

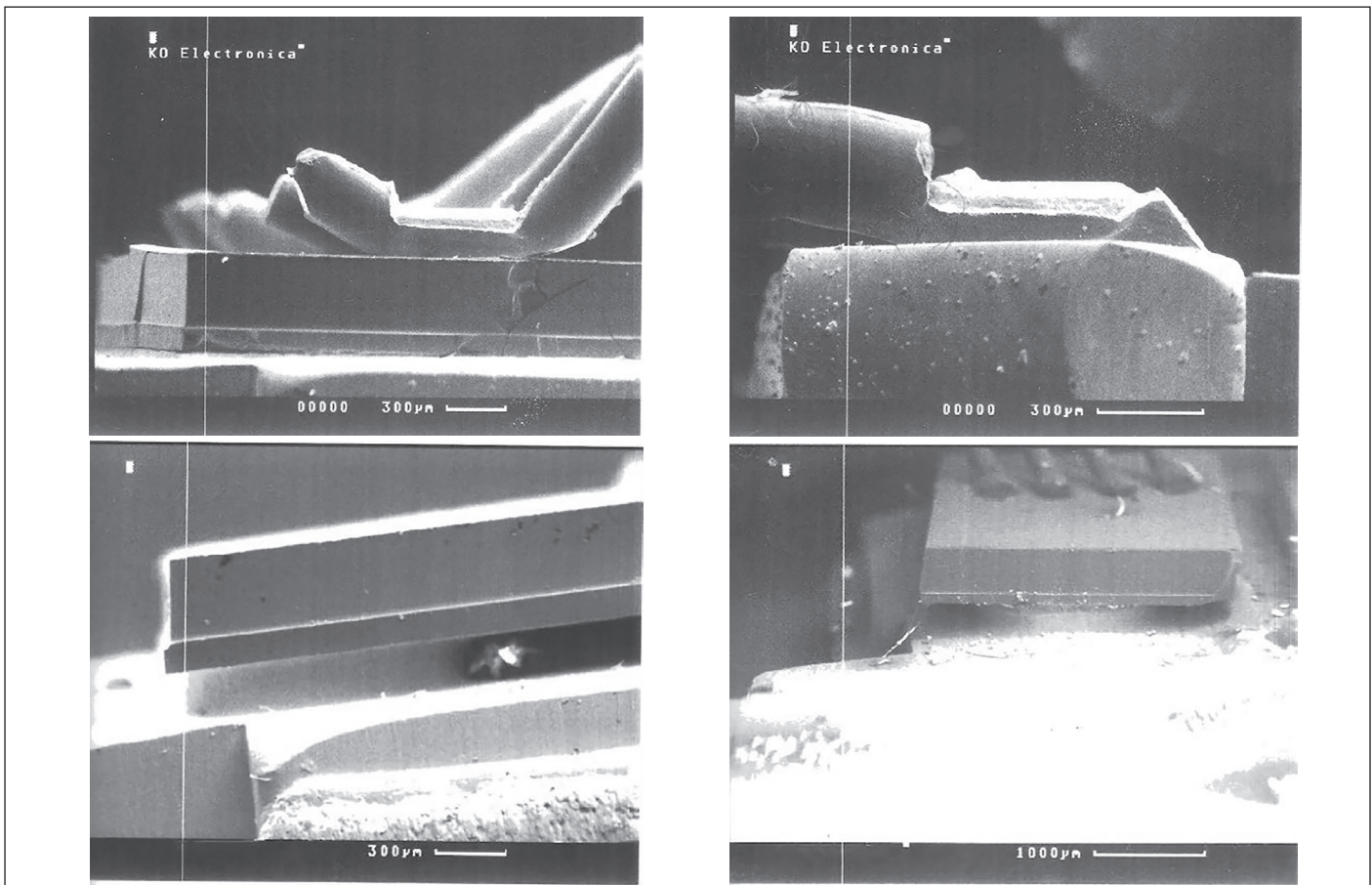


Рис. 3. Примеры неудовлетворительной разварки выводов и напайки чипов

Необходимость пересмотра концепции и состава параметров для разных видов тестирования и испытания силовых ИЭТ

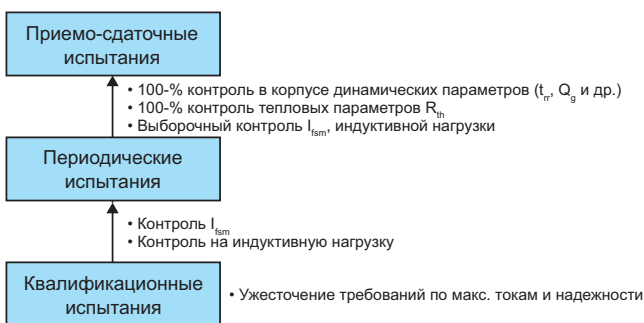


Рис. 4. Пересмотр состава контроля параметров для тестирования и испытаний ИЭТ силовой электроники

[10–11]. Однако очевидно, что для реализации такого нового проекта суммы в 20 млрд руб. недостаточно.

Сам проект вызывает много вопросов, хотя он представляет чуть ли не единственный способ в текущих условиях в России решения задачи организации с помощью Китая выпуска пластин и чипов современных силовых полупроводников. Автор данной статьи давно предлагает для развития нашей полупроводниковой отрасли привлекать зарубежные компании и технологии. По неподтвержденной информации, Сбер как новый главный акционер компаний «Элемента» пока воспринимает этот проект осторожно и осуществляет аудит, что может вызвать удлинение сроков его реализации.

Пока непонятны типы и номенклатура силовых изделий для выпуска, наличие рынка сбыта, исходных и эпитаксиальных пластин для них. АО «Кремний» холдинга «Русал» с 1 января 2026 г. прио-

становило производство рафинированного кремния [12]. Это единственное в России предприятие по его выпуску не выдержало конкуренции с китайцами. **Непонятно, чей кремний будет использовать «Кубик» – российский или китайский?** И дадут ли ему закупать более дешевый китайский при простаивающем российском предприятии? Кроме того, необходимо развивать производство исходных и эпитаксиальных пластин. В настоящее время в России отсутствуют достаточные производственные мощности по современной эпитаксии, что потребует закупки такого оборудования. **Не постигнет ли «Кубик» судьба «Кремния» при дорогостоящем российском кремнии, производстве, энерготарифах, налогах, высокой себестоимости и т. д.? На кого и на какой рынок будет ориентирована эта продукция и куда девать ее излишки при хорошей реализации проекта?** Особенно на 40 тыс. пластин карбида кремния, внутренний рынок на который пока отсутствует. **Неужели станем конкурировать с Китаем? Насколько продумана в этом проекте вся цепочка развития силовых изделий, включая рыночную? Как реализация этого проекта повлияет на текущих российских производителей аналогичной устаревшей продукции? Как планируется развитие современного сборочного производства под эти мощности чипов? Неужели оно будет устаревшим текущим или ориентироваться только на герметичные корпуса для ВП?**

Таких вопросов, особенно экономических и рыночных, очень много, и на них придется искать ответы. Однако автор поддерживает это решение, способное при хорошей реализации дать толчок новому развитию силовой электроники в стране. Это развитие не приведет к эволюционному скачку, но поможет наполнению российского рынка более современной отечественной продукцией. Без быстрого комплексного решения всех вопросов сроки реализации могут удлиниться, а проект морально устареть. Кроме того, изменение международной обстановки может внести свои коррективы, как это было

с проектом компании «НМ-Тех» с тайваньской UMC по производственной линии бывшего «Ангстрема-Т».

Однако самым сложным может оказаться резкое падение выручки и рост убытков ГК «Элемент» в 2025 г. и первой половине 2026 г. По итогам 2025 г. выручка ГК «Элемент» снизилась на 12% до 38,6 млрд руб., а компания получила чистый убыток в размере 2,27 млрд руб. в сравнении с чистой прибылью 8,27 млрд руб. в 2024 г. [13]. Первую половину 2026 г. управляющая компания «Элемента» также завершила с падением: выручка УК сократилась на 46% до 788,8 млн руб., чистая прибыль – на 53% до 693,3 млн руб. Основная причина – падение спроса на ЭКБ со стороны промышленных предприятий. И это только подтверждает правоту автора данной статьи в его заочном споре с компанией Strategy Partners, дочерней структурой Сбера, без видимых причин предсказывавших рост рынка микроэлектроники в России в 2025 г. и в последующие годы [14].

«Элемент» взял кредит 8,6 млрд руб. у Сбербанка, что связывают с нехваткой средств на строительство завода силовой электроники по проекту «Кубик» [15]. Опасным является падение спроса. Если оно продолжится, проект затормозится с непонятными шансами на реализацию.

Судя по всему, руководство «Элемента» планирует делать ставку на развитие не только ЭКБ силовой электроники, но и на серийное производство модулей и блоков силовой электроники, вычислительной техники и автокомпонентов с использованием этой ЭКБ. Эти два предприятия должны будут работать в кооперации. Именно так следует понимать планируемый запуск этого нового производства в ОЭЗ «Технополис Москва» в Зеленограде [16]. Если применение этой продукции в спецоборудовании едва ли вызовет осложнения, то ее себестоимость и конкурентность для гражданского сектора, особенно для автомобильной промышленности с учетом китайской конкуренции и указанных выше факторов не станет простым.

Шансы эволюционного скачка для российской микроэлектроники

Сравнение состояния рынка, уровня развития технологий силовой полупроводниковой микроэлектроники в мире и в России показывает, что во всех технических и экономических аспектах и направлениях наше отставание очень велико и со временем только увеличивается, поскольку мировая отрасль за счет новых технологий и материалов ускоренно движется вперед, а наша без технологического и капитального обновления, наоборот, теряет возможности и катится назад. **Это значит, что без технического переоснащения для собственного эволюционного скачка у России в настоящее время нет оснований и предпосылок из-за отсутствия современных технологий, эффективных предприятий и их экономики, материального оснащения, квалифицированных кадров и т. д.**

К сожалению, наша отрасль упустила также возможности развития в направлении создания новых изделий и технологий на основе III-IV GaN и SiC. До 2022 г. и даже в 2022 г. еще были прекрасные варианты и договоренности по закупке лицензий на эти технологии, а также недостающего оборудования, в том числе для MOCVD-эпитаксии. Однако чиновники не оценили их, а основные усилия направили на безусловно необходимый техпроцесс 28 нм, который был на несколько порядков дороже. Впрочем, его закупка тоже не состоялась. Проект создания линии GaN-чипов в НИИЭТ финансировался плохо, а в последние годы практически прекратился. Транспортные отрасли производства автомобилей с электрическим приводом как основного рынка SiC-продукции в стране не развивались и до 2022 г. главенствовала отверточная сборка всех импортных автомобилей без локализации. После 2022 г. и ухода из России передовых мировых автопроизводителей этот рынок почти полностью был монополизирован китайскими автомобилями, и вся электроника для них также была китайской.

Одной из главных проблем российской микроэлектроники является малый объем отечественного рынка, поскольку основные потре-

бляющие электронику отечественные отрасли (транспортная, станкостроительная, приборостроительная и др.) ежегодно деградировали. Об этом автор писал неоднократно [17–18]. Локализация автопроизводства и бытовой техники так и осталась пустым лозунгом властей, практически не сделавших даже начальных шагов для реализации. Даже на этом слабом рынке доминирование импортных ИЭТ стало повальным. Наши власти принимали 10-летние стратегии развития электронной промышленности страны, полагая, что их миссия заканчивается выделением большого (как им казалось) финансирования, но сами же срывали выполнение своих программ в первые годы, а затем о них не вспоминали. Предприятия также массово срывали ОКР, финансируемые из бюджета. Свою главную задачу – реформирование и рост внутреннего рынка – власти игнорировали все эти годы. Точнее, они просто не знали, как ее решать, и не ставили ее даже в постановочном плане. С таким же успехом можно пытаться строить стены здания при отсутствии фундамента.

Ставшая основной в микроэлектронике в нашей стране стратегия импортозамещения по определению не могла дать толчок к росту полупроводниковой отрасли и сокращению отставания от мирового уровня. Она привела только к появлению некоторого небольшого количества экономически и технически неконкурентных аналогов импортной продукции 15–20-летней давности для ВПК. **Стратегия импортозамещения могла привести к положительным результатам только в варианте экспортноориентированного импортозамещения, как это было в Тайване, Южной Корее, Китае.** Об этом автор статьи писал еще в 2015 г. [19]. За последнее десятилетие все эти выводы подтвердились.

По этим причинам балльная система для подтверждения российского происхождения товаров, которую пытается ввести Минпромторг, обречена на вымирание. Она только подтверждает, что многие компоненты мы не в состоянии изготовить самостоятельно без кооперации с зарубежными странами и замена качественного зарубежного (если оно таким является) менее качественным отечественным (если оно такое) не добавит качества и новых свойств товару. Скорее, наоборот. Для потребителя главным должно быть соотношение цена/качество. Его добиваются не баллами, а креативным подходом. Учиться нужно создавать именно конкурентные качественные товары, а не считать баллы. Те, кто жил в СССР, помнят, что лейбл «Знак качества» на отечественных товарах никак не делал их конкурентными перед импортными. Отечественные товары с этим знаком покупали, потому что не было выбора, а при его наличии однозначно выбирали импортные. Похоже, нас опять хотят лишить права выбора, прикрываясь ложными целями.

Свое видение того, каким может быть вариант с реализацией эволюционного скачка нашей микроэлектроники, автор статьи подробно предложил в статьях [14, 20]. Такие примеры в экономике и развитии нашей страны имелись, но они были связаны как раз с закупкой за рубежом технологий и производственных линий. Одним из наиболее показательных и подтверждающих примеров является закупка в 1966 г. у итальянской компании FIAT линии сборки легковых автомобилей, запустившей серию «Жигулей» и на долгие годы определившей вектор развития автомобилестроения в стране. Для подобной реализации требуются другие условия, которые теперь отсутствуют в нашей стране, и шансов для такого скачка нет. За последние 35 лет отечественная микроэлектроника совершила всего один эволюционный скачок, который был связан с закупкой «Микроном» у европейской компании STM в 2006 г. производственной линии и технологии КМОП 180 нм. К сожалению, за последние 20 лет этот опыт стал единственным и последним в российской полупроводниковой микроэлектронике. Мировая эволюция полупроводниковой микроэлектроники и раньше обходила Россию стороной, а в последние годы и вовсе перестала нас замечать. **Самым реальным шансом для нашей микроэлектроники мог стать китайский путь с привлечением зарубежных технологий, инвестиций и рынков сбыта. Но у Китая оказалось два важных «преимущества» перед нами – у него не было нефти и ока-**

залось больше здравого смысла в решениях и действиях. Неужели для совершения эволюционного скачка нам придется ждать, когда закончится нефть?

Сравнивать Россию с Китаем не совсем корректно. Китай с помощью зарубежных компаний в конце XX в. сначала совершил революционный переход к развитию микроэлектроники (которой у него прежде практически не было), поскольку посчитал эту отрасль стратегической для всей экономики страны, а затем эволюционным путем постоянно и непрерывно совершенствовал все ее сегменты. Власти России этого не сделали, не смогли или не захотели привлечь зарубежные инновации и могли рассчитывать только на периодические эволюционные скачки, которые тоже не реализовали. Итог мы наблюдаем сейчас. Ставка только на сырьевые ресурсы и нефть оказалась ошибочной. На доходы от них не всегда удастся купить высокотехнологичные продукты и совершать эволюционные скачки.

Выводы

1. По технологиям силовой электроники и полупроводников российские предприятия отстают от мировых на 15–20 лет. Даже наш лидер «Микрон» не дотягивает до современных требований мировой продукции и технологии силовой микроэлектроники.
2. Из-за значительного повышения в мировой микроэлектронике мощностей и рабочих токов силовых ИЭТ российским производителям силовых полупроводников необходимы освоение новых технологий и материалов производства чипов, корпусов, техпроцессов сборки, а также пересмотр классификации и применение методов и контроля параметров своей продукции.
3. Без технологического и структурного обновления предприятий и без экспортоориентированного импортозамещения мы обречены на превалирование импорта и дорогие российские аналоги зарубежных ИЭТ 10–20-летней давности для ВПК.
4. Для собственного эволюционного скачка у России в настоящее время нет оснований и базовых предпосылок в силу отсутствия современных технологий, эффективных предприятий и их экономики, материального оснащения, квалифицированных кадров и т. д.
5. Оптимальным решением может стать строительство с помощью зарубежных компаний новых заводов с закупкой современных технологий и организацией передовой системы управления и качества.
6. Обязательным условием должна стать трансформация российского рынка потребления ЭК с упором на его рост, на создание экспортоориентированной конкурентоспособной продукции и гражданский потребительский рынок. Рынок ВПК должен остаться важным, но не превалирующим.
7. Стратегия импортозамещения для внутреннего рынка не должна быть единственной и главной программой, определяющей рост микроэлектроники в стране. Строить вокруг нее программу развития отрасли ошибочно и недальновидно. Импортозамещение не двигает отрасль вперед, а в лучшем случае консервирует ситуацию. Это метод догоняющего развития, который может дать только временный и незначительный результат в узких сегментах продукции.

Р. С. В этой статье автор попытался объективно и коротко осветить то, как он видит все происшедшее в российской микроэлектронике за последние более 30 лет и реальное настоящее. Однако важнее то, что ждет нас впереди. К сожалению, оптимизм – не то чувство, которое превалирует в оценке будущего российской микроэлектроники.

В части 4 этой статьи рассматриваются новые интегрированные в чипы материалы и технологии теплоотвода изделий силовой и цифровой полупроводниковой микроэлектроники.

Литература

1. Уникальный российский производитель искусственных сапфиров для электроники собрался банкротиться. CNews. 15 мая 2026 // www.cnews.ru.
2. Россия может лишиться производителя искусственных сапфиров для электроники и iPhone. Время электроники. 18.06.2026 // www.russianelectronics.ru.
3. АО Группа Кремний Эл // www.group-kremny.ru.
4. Infineon Technologies Produces World's First Power Semiconductors in Silicon Carbide. Compound Semiconductor. February 05. 2001 // www.compoundsemiconductor.net.
5. SiC MOSFET. АО «Арсенал» КрЗПП // www.krzpp.ru.
6. Power Semiconductors. Semikron Danfoss International GmbH // www.semikron-danfoss.com.
7. Мощные ультрабыстрые диоды. АО «ФЗМТ» // www.fzmt.ru.
8. Боднар Д. Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники. Часть 1. Технологии производства пластин и кристаллов. Электронные компоненты. №7. 2026.
9. Боднар Д. Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники. Часть 2. Корпуса, материалы и технологии сборки. Электронные компоненты. №8. 2026.
10. В России строят крупнейшую в истории фабрику кристаллов для силовой электроники. CNews. 20 октября 2025 // www.cnews.ru.
11. Для производства силовой электроники «Элемент» импортировал оборудование на 5,6 млрд. Время электроники. 7.05.2026 // www.russianelectronics.ru.
12. В России закрывается один из двух заводов по производству кремния – ключевого элемента электроники. CNews. 18 ноября 2025 // www.cnews.ru.
13. Главный микроэлектронный холдинг России вложил в активы более 2 млрд долл. CNews. 16 июля 2026 // www.cnews.ru.
14. Боднар Д. Нам нужно изменить свое отношение к роли и назначению микроэлектроники, или в чем мои разногласия со Strategy Partners. Электронные компоненты. №5. 2026.
15. Главный микроэлектронный холдинг России занял 8,6 млрд у структуры Сбербанка. CNews. 5 августа 2026 // www.cnews.ru.
16. В России запускается новое серийное производство силовой электроники и вычислительной техники. CNews. 17 августа 2026 // www.cnews.ru.
17. Боднар Д. Погоня российской микроэлектроники за нанометрами в отсутствие рынка сбыта. Электронные компоненты. №1. 2017.
18. Боднар Д. Российский застой во время мирового полупроводникового бума. Электронные компоненты. №10. 2021.
19. Боднар Д. Ориентация на экспорт как средство повышения конкурентоспособности отечественной электроники. Электронные компоненты. №4. 2015.
20. Боднар Д. Силовая электроника должна быть современной и сильной. Электронные компоненты. №4. 2026.

ГРАНИТ-ВТ

Электронная аппаратура для ответственных применений

- Контрактная разработка и инженерное сопровождение
- Контрактное производство высокотехнологичной электроники, в т.ч. монтаж BGA с рентген-контролем

- Париленовое влагозащитное покрытие
- Серийное производство электронных модулей и приборов

www.granit-vt.ru e-mail: mail@granit-vt.ru

АО «ГРАНИТ-ВТ» тел/факс: 8 (812) 274-04-48
191014, Санкт-Петербург, ул. Госпитальная 3



Реклама