

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2017 г.

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

Микроэлектроника, как никакая другая отрасль промышленности, зависит от научно-технических разработок и их быстрого внедрения в производство. Не менее важным является рост рынка потребления электронной продукции, а также способность его удовлетворить. Мировая микроэлектроника четко реагирует на эти факторы. Например, в текущем году она растет рекордными за последние семь лет темпами. В этом году началось пилотное производство по технологии 7 нм, а новые материалы и технологии посткремниевой эпохи уже дают коммерческие результаты.

Российская микроэлектроника с долей 0,5–0,7% от мировой находится на дне мировой отрасли и ни на что не влияет. Впрочем, как и вся отечественная промышленность.

ДЕВИЗ МИРОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ – «БЫСТРЕЕ, МЕНЬШЕ, ДЕШЕВЛЕ»

Состояние мировой полупроводниковой микроэлектроники в 2017 г. опровергает все прогнозы аналитиков в 2016–2017 гг. [1]. Однако это именно та ситуация, когда ошибками аналитиков могут быть удовлетворены все, начиная с самих аналитиков и заканчивая участниками полупроводникового рынка. Первым это гарантирует работу, а у вторых растет выручка и прибыль.

Согласно прогнозу консалтинговой компании IC Insights в январе 2017 г., мировой рынок полупроводников в текущем году в сравнении с 2016 г. должен был вырасти всего на 5% до 355 млрд долл. [2]. По данным Gartner, другой аналитической компании, в январе 2017 г., аналогичный показатель в 2017 г. должен вырасти на 7,2%, или до 364,1 млрд долл. [3].

Уже в июле 2017 г. компания Gartner прогнозировала, что в 2017 г. продажи полупроводников на мировом рынке впервые превысят 400 млрд долл. и достигнут 401,4 млрд долл., что на 16,8% больше, чем в 2016 г. [4]. По расчетам аналитиков Gartner в октябре 2017 г., объем рынка к концу года вырастет на 19,7%, достигнув 411,1 млрд долл. [5]. Это должен быть самый большой рост с посткризисного 2010 г. По итогам 2017 г. продажи микросхем памяти увеличатся на 57%. Одновременно более чем на 10% вырастут продажи всех

видов датчиков и дискретных компонентов. По мнению Gartner, положительная динамика мировых продаж с ростом в 4% сохранится и в 2018 г., но уже в 2019 г. она сменится спадом на 1%.

Еще более оптимистичные прогнозы дают специалисты компании IC Insights, ожидающие в 2017 г. выручку объемом в 419,1 млрд долл. [6]. При этом доля полупроводников в электронной технике вырастет до 28,1%. По данным этой компании, уровень мировых продаж полупроводников составит 500 млрд долл. в 2021 г.

В конце октября IC Insights сообщила, что продажи интегральных микросхем в этом году вырастут на 22%; увеличатся также продажи изделий группы дат-

чиков, оптоэлектронных и дискретных приборов [7]. В целом, рост мирового полупроводникового рынка в 2017 г. составит 20%. Очень важным является то, что двухзначные темпы роста в сравнении с прошлым годом наблюдаются во всех регионах и даже в Европе, которая в последние годы теряла свои позиции на мировом полупроводниковом рынке.

По мнению автора статьи, непредвиденное в начале года преодоление уровня продаж в 400 млрд долл. станет одним из главных достижений мировой полупроводниковой микроэлектроники в 2017 г.

Всего 17 лет назад в 2000 г. продажи находились на уровне 200 млрд долл.,

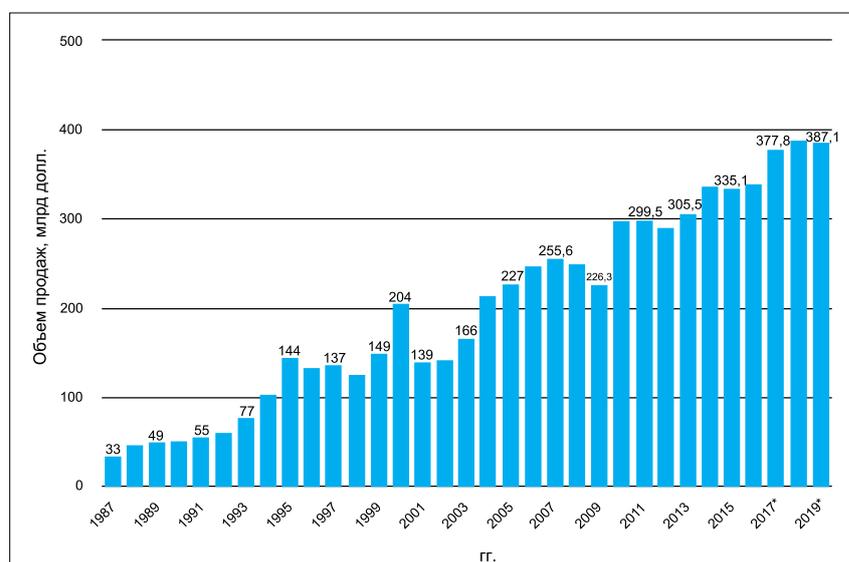


Рис. 1. Мировые продажи полупроводников за период 1987–2019 гг.

а семь лет назад достигли уровня 300 млрд долл. (см. рис. 1) [8]. К значительному росту продаж полупроводников в текущем году привел дефицит микросхем памяти. Из-за этого дефицита на рынке чипмейкеры в течение года повышали цены на DRAM [9] и флэш-память NAND, что приведет к росту их выручки на 52% в текущем году.

Основным игроком на рынке памяти уже долгие годы является компания Samsung. Бурное расширение производства и рост продаж Samsung привели к тому, что по итогам II кв. 2017 г. она потеснила Intel с первой строчки крупнейших мировых производителей полупроводников [10]. В течение 25 лет с 1992 г. компания Intel занимала лидирующее место в мировой микроэлектронике. В настоящее время Intel переживает не лучшие времена. Если все предыдущие годы Intel была в авангарде компаний, внедряющих самые передовые технологии с прехотными нормами 14–45 нм, и лидером по переходу производства с использованием пластин большего диаметра, то в последние годы она уступает в этом отношении компаниям Samsung и TSMC. Однако специалисты и аналитики предупреждают, что лидерство Samsung может оказаться непродолжительным по той же причине, благодаря которой оно и было достигнуто. Ажиотажный спрос на микросхемы памяти приведет к формированию рыночного «пузыря» в этом сегменте. По мнению аналитиков, увеличение производственных мощностей по изготовлению памяти, а также завершение сделки с Toshiba, второй компанией в мире по производству памяти NAND, вероятно, приведет к тому, что пузырь лопнет, а главной проигравшей в этой истории может стать компания Samsung.

Наряду с микропроцессорами, рынок микросхем памяти всегда являлся одним из главных секторов мировой полупроводниковой микроэлектроники. В первую очередь, именно микросхемы памяти начинают изготавливаться по самым передовым техпроцессам и особенно технологиям 3D-сборки. Не зря все последние годы Китай стремится аккумулировать на своей территории и под своим контролем самые передовые технологии и производство этой продукции [11]. Однако его стремление к покупке передовых производителей памяти Micron, Toshiba и др. встречает жесткое сопротивление аме-

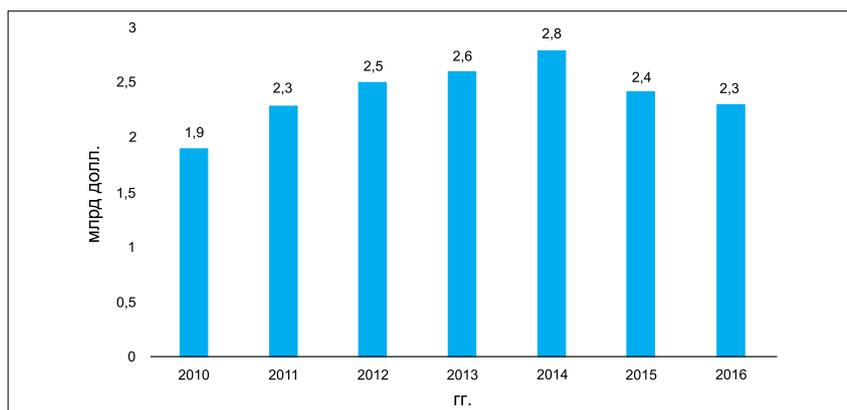


Рис. 2. Российский рынок микроэлектроники в 2010–2016 гг.

риканских властей. Бурный рост рынка данных изделий в 2017 г. обещает продолжение этого противостояния в ближайшие годы.

РОССИЙСКАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2017. ОСТАНЕТСЯ ЛИ ОНА «БУТИКОВОЙ»?

По данным ассоциации разработчиков и производителей электроники (АРПЭ), в России имеются более 3000 компаний разработчиков и производителей электронного оборудования, из которых 500 контролируются государством, а 2500 являются частными [12]. Но это исключительно формальная оценка. В сферу производства электронных компонентов, по данным АРПЭ, вовлечено свыше ста производителей. Вероятно, кроме прямых производителей в этот показатель включены и дизайн-центры, и компании по услугам в области электронных компонентов. Аналитики АРПЭ полагают, что годовой объем продаж электронной аппаратуры в стране составляет около 10 млрд долл., из которых две трети приходится на аппаратуру специального применения, т.е. на военную.

По данным компании Frost & Sullivan, рынок микроэлектроники с 2010 по 2014 гг. увеличился с 1,9 до 2,8 млрд долл., а затем к 2016 г. сократился до 2,3 млрд долл. (см. рис. 2) [13]. На протяжении 10 лет с 2002 по 2012 гг. рост рынка электронных компонентов напрямую зависел от изменения цены нефти на международных рынках [13–14]. Такая же зависимость прослеживается с 2014 по 2016 гг., но важную роль в эти годы играет также экономический кризис и изоляция России. Около половины всех выпускаемых в нашей стране электронных компонентов потребляется предпри-

ятиями оборонной промышленности, финансируется государством через гособоронзаказ и федеральные целевые программы. Именно это обстоятельство является одной из главных проблем отечественной электроники. В общепринятом понимании открытый рынок микроэлектроники как таковой в стране отсутствует. Следовательно, в большинстве своем формально и неформально числящиеся частными российские компании полностью зависят от государства и его заказов.

Сравнивая основные сферы применения российской микроэлектроники (см. рис. 3а) [15] с мировой и китайской (см. рис. 3б) [16], нельзя не заметить следующие структурные диспропорции российского рынка:

- непропорциональная доля военных изделий электронной техники (ИЭТ) на российском рынке: 45% против 1% и менее на мировом и китайском рынках; все последние 50 лет доля военных ИЭТ на мировом рынке неуклонно снижалась;
- практическое отсутствие на российском рынке ИЭТ сектора коммуникаций; на мировом и китайском рынке эта доля составляет около 30%;
- очень низкая доля рынка автомобильных ИЭТ – всего 1% в сравнении с 9,1% на мировом рынке; доля автомобильного сектора ИЭТ на мировом рынке постоянно увеличивается;
- с учетом наличия в России сборочных предприятий зарубежной бытовой техники и автомобилей неудовлетворительно низкий процент ИЭТ в секторе потребительской электроники; в Китае на долю этого сектора приходится 21,8%, что превышает мировые показате-



Рис. 3. Основные области и доли применения микроэлектронных компонентов а) в России; б) в мире и Китае

ли величиной 11%. Именно в этом секторе большой эффект дает локализация производства.

Таким образом, в России отсутствуют или очень слабы те области применения электроники, в которых за рубежом основными успешными игроками всегда являются частные компании.

По оценке Алексея Волостнова, директора по развитию бизнеса в России, компания Frost & Sullivan, в течение ближайших нескольких лет структура спроса микроэлектроники на российском рынке не претерпит существенных

изменений [13]. По его мнению, в оборонной и авиакосмической промышленности рост будет обеспечиваться за счет разработки новых вооружений и увеличения военных расходов, строительства авиалайнеров и спутников, а в автопромышленности – за счет реализации программ по локализации производства автоэлектронных компонентов и развития системы «ЭРА-ГЛОНАСС». Автор этой статьи согласен с тем, что сектор оборонной промышленности останется главным рынком сбыта микроэлектроники в обозримом

будущем, поскольку его львиная доля финансируется государством. А вот рост производства автоэлектронных компонентов за счет его локализации в России вызывает вопросы, если не сказать больше, – пессимизм.

Я довольно давно занимаюсь производством электронных автокомпонентов и рынком в России, посетил несколько специализированных производителей автоэлектроники в Азии, поддерживаю контакты с такими производителями в России и неоднократно писал на тему неудовлетворительного состояния с локализацией производства компонентов для автомобилей и бытовой техники. Я вижу ежегодное отставание наших производителей автомобильных электронных компонентов от зарубежных. Оно проявляется не только в отсталых технологиях и производствах, неконкурентных экономических показателях, но и в стиле мышления. В головах и в устах многих руководителей наших предприятий звучит мысль, что поскольку они производят военные ИЭТ, то им под силу выпускать автомобильные компоненты (по крайней мере, конкурентные по надежности).

За рубежом производители ИЭТ и автомобильной электроники для сборочных конвейеров Ford, Toyota и др. проходят многоступенчатую аттестацию системы качества производства, менеджмента и персонала. Аттестация по системе качества ISO является только первым шагом, за которым следует более жесткая аттестация от производителей автомобилей. При этом наличие сертификата качества, например от Ford, не избавит от такой же проверки компанией Toyota.

Требования по надежности автоэлектроники превосходят идентичные для военных ИЭТ с нашей приемкой 5 – достаточно упомянуть лишь одно требование автомобильных стандартов по температуре перехода полупроводниковых компонентов в 200°C против 150–175°C для отечественных военных ИЭТ. Не выдерживают наши компании конкуренции с азиатскими, а производители автомобильных блоков все чаще поворачиваются в сторону поставщиков из Азии.

Чтобы изменить это положение, следует подняться на несколько ступеней: полностью обновить технологии, оборудование, производство, кадры.

Кроме того, необходимо практически убедить автосборщиков иномарок в том, что наши автомобильные компоненты могут конкурировать с зарубежными не только по надежности, но и по цене. Можно ли достигнуть этого быстро? Нет, не получится. Мы ничего не делали 10 лет, чтобы локализация производства стала реальностью в России. Наиболее быстрым и эффективным способом получения прибыли стало бы привлечение зарубежных компаний к строительству новых заводов по производству автоэлектроники и передаче технологий, обучению кадров, аттестации, а также к организации выпуска кадров путем модернизации российских предприятий, как это делал Китай. Однако в данном направлении совершенно ничего не было сделано. А сейчас этот комплекс мер трудно осуществить из-за изоляции России, кризиса нашей экономики, падения инвестиций, снижения выпуска и продаж автомобилей.

Увеличить выпуск электронных компонентов можно за счет комплектующих для системы «ЭРА-ГЛОНАСС». Этому способствует монополизация и недостаточная конкуренция поставщиков ИЭТ по данному направлению. Однако заметим, что многие разработанные российскими компаниями ИЭТ для «ЭРА-ГЛОНАСС» из-за более низкой цены и отсутствия соответствующих технологий в России будут производиться на зарубежных, а не на российских фабриках.

Не все безоблачно также и по программам военных ИЭТ. На совещании в Воронеже в октябре текущего года вице-премьер Дмитрий Рогозин сообщил о снижении гособоронзаказа в 2018–2025 гг. в пользу гражданской продукции. Видимо, это приведет к сокращению выпуска имеющихся военных ИЭТ, но, по мнению автора этой публикации, не даст качественного скачка в создании современных конкурентных (особенно экспортно ориентированных) гражданских ИЭТ. На рынке таких изделий имеется жесткая конкуренция, а у наших производителей для работы на нем нет соответствующего задела, технологий и продукции. У нас нет и не предвидится выпуск изделий, которые составили бы реальную конкуренцию изделиям компаний Samsung, LG, Huawei и др.

В январе 2017 г. министр торговли и промышленности России Денис Мантуров дал полное противоречивое интервью

Таблица 1. Объемы мирового и российского рынков полупроводниковой микроэлектроники в 2010–2018 гг.

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Объемы мирового рынка, млрд долл.	298,32	299,52	291,56	305,58	335,84	335,17	338,93	401*	414*
Объем российского рынка, млрд долл.	1,9	2,3	2,5	2,6	2,8	2,4	2,3	2,1*	2,0*
Доля российского рынка от мирового, %	0,65	0,77	0,86	0,85	0,83	0,7	0,68	0,57*	0,5*

* Прогнозные значения.

журналу «Эксперт» [17]. Он признал, что российский рынок мал и возможностей экстенсивного развития не осталось. Российским производителям предлагается встраиваться в мировые цепочки производства, продавать конкурентные на мировом рынке товары по сравнительно низким ценам. Признавая, что большинству отраслей промышленности в настоящее время это не под силу, министр предложил им провести активную технологическую модернизацию. Правда, министр не уточнил, как ее осуществить в условиях экономического кризиса в стране при текущих банковских процентных ставках в отсутствие зарубежных кредитов, при действующих санкциях, высоких российских налогах и т. д. Делая правильный вывод о необходимости поддержки не конкретных отраслей, а изделий и характеристик, министр не смог объяснить, почему средства в размере 236 млрд руб. выделяются всему агропромышленному сектору, а не конкретным товарам с конкурентными характеристиками.

Касаясь вопросов развития микроэлектроники, министр сообщил об увеличении доли отечественных ИЭТ в бортовой аппаратуре ракетно-космической техники с 36 до 44% и о появлении в стране производств, работающих с использованием технологических норм 90 и 65 нм. Однако он не сказал, что эти производства не загружены из-за отсутствия заказов. Процитируем один фрагмент из его интервью: «Я, к сожалению, не могу пообещать в ближайшей перспективе, что у нас будет фабрика 28 нм. Возможно, появится «бутиковая» фабрика небольшого объема. У нас есть планы на 45 нм, но пообещать, что они будут реализованы через год–два, я тоже не могу. Мы прорабатывали вопрос с конечными потребителями не только в России, но и за рубежом. Наш рынок им интересен».

Очевидно, под «бутиковой» фабрикой министр имел в виду компактные кремниевые мини-фабрики, о которых

автор настоящей статьи писал ранее [18]. Кроме того, Мантуров сообщил о конкурентоспособности наших компаний по зарплате, коммунальным платежам, ценам на электричество из-за девальвации рубля. Из этого министр сделал вывод о наличии у наших производителей конкурентных преимуществ (даже над Китаем) по себестоимости и операционным затратам. Однако он не ответил, как при таких преимуществах мы продолжаем проигрывать конкурентную борьбу с зарубежными и китайскими товарами даже на своем рынке. Главное, на что не ответил министр:

- почему не растет и будет ли расти рынок микроэлектроники в стране, или наша отрасль так и останется «бутиковой» микроэлектроникой для внутреннего потребления;
- почему не появляются отечественные ИЭТ, которые успешно конкурировали бы на мировых рынках, и как этого добиться;
- как провести масштабную модернизацию отрасли и встраивание в мировые цепочки в условиях кризиса и зарубежных санкций;
- как добиться конкурентной себестоимости и цены в условиях мелкосерийного производства и отсутствия рынка микроэлектроники в стране;
- кому из зарубежных компаний был интересен наш рынок микроэлектроники и почему мы так и не увидели их на нашем рынке в 2017 г.; вместо этого мы получили ужесточение санкций и поименное включение наших производителей микроэлектроники в санкционный список;
- почему мы все время такие бедные, если мы не обездоленные;
- почему за 15 лет России так и не удалось хотя бы частично воспроизвести китайскую модель развития экономики, рынка и микроэлектроники, что позволило бы на большинство этих вопросов дать ответы;

- если у нас имеется собственная модель развития, то почему она не дает результатов.

Ошибочным является также утверждение министра, что электронное машиностроение традиционно в России не существовало, поскольку эту отрасль в СССР развивала Белоруссия. К сведению министра, в СССР именно в России было больше всего предприятий электронного машиностроения – в Зеленограде, Воронеже, Горьком, Калининграде, Саратове и других городах. В Белоруссии работало только одно крупное предприятие этого профиля – НПО «Планар». Разница в том, что многие из предприятий полупроводникового машиностроения в России мы потеряли, а Белоруссия свое сохранила. Эта оговорка, очевидно, означает, что заниматься электронным машиностроением Минпромторг не планирует. А какое оборудование должны использовать предприятия для масштабной модернизации? Отечественного нет, а на импортное распространяются санкции.

Разнонаправленность движения мирового (вверх) и российского рынков (вниз) уже в течение пяти лет приводит к падению доли нашей страны в общем объеме мирового рынка (см. табл. 1). Нет никаких оснований полагать, что в ближайшие годы эта тенденция изменится. Низкие цены на нефть, слаборазвитый рынок, экономический кризис в России, крайне высокая доля государства в микроэлектронике страны и ее экономике, изношенность основных фондов, отсталость технологий, монополизация, отсутствие частного и зарубежного капитала в отрасли – далеко не полный перечень проблем, из-за которых как минимум в ближайшие пять лет не следует ожидать качественных изменений в микроэлектронике России.

Китаю за последние два десяти-

летия не только удалось извлечь максимальную пользу от вовлечения в мировую интеграцию, но и свои недостатки превратить в преимущества и стать одним из главных драйверов мировой микроэлектроники. Наша страна, входившая в бытность СССР в лидирующую мировую тройку, растеряла свои преимущества и все глубже погружается на дно мировой экономики.

«РОСТЕХ» КАК ЗЕРКАЛО РОССИЙСКОЙ ДИВЕРСИФИКАЦИИ ЭКОНОМИКИ

Постоянно растущий все годы военный бюджет России в условиях сжимающейся экономики, превалирование импорта над экспортом в электронике вынуждает руководство страны и промышленности искать новые статьи доходов. В качестве такой статьи чиновники видят выпуск гражданской продукции на предприятиях ВПК. Для реализации этой цели корпорация «Ростех» – один из столпов нашего ВПК – в 2015 г. утвердила стратегию развития до 2025 г. [19]. Ее основная задача – увеличить долю высокотехнологической продукции и догнать General Electric и Samsung (!!!) по ключевым финансовым показателям. Для достижения этих показателей «Ростехом» ВВП страны должен вырасти в три раза, а производство и реализация продукции корпорации должны ежегодно увеличиваться. Своей основной целью компания считает диверсификацию российской экономики и снижение ее зависимости от нефти и газа. Это должно быть достигнуто за счет диверсификации продукции, уменьшения выпуска военных изделий и увеличения доли высокотехнологической гражданской продукции. Доля вооружений должна снизиться

с 20 до 13% к 2025 г., а телекоммуникационного оборудования – вырасти с 4 до 12%, систем безопасности – с 1 до 5%. Должны также увеличиться доли медицинского оборудования и фармацевтики. Планы корпорации «Ростех» выйти к 2035 г. на уровень таких конкурентов как General Electric и Samsung эксперты оценивают крайне скептически. Ни по увеличению доли гражданской продукции, ни по частным инвестициям особых прорывов не предвидится [20]. Компания не может заниматься всем – «от пушек до игрушек», а должна специализироваться на узком наборе изделий, постоянно их совершенствуя. Об этом автору статьи уже приходилось писать [21]. Пока что результаты деятельности «Ростеха» за 2016 г. в сравнении с компаниями, которые эта корпорация планирует догнать (см. табл. 2), красноречивее любых слов [20]. Если оценить эффективность «Ростеха» и Samsung по размеру выручки на одного работающего, то по итогам 2016 г. у Samsung она почти в 15 раз выше. Тем временем «основной конкурент» «Ростеха» компания Samsung завершила I кв. 2017 г. с выручкой 44,7 и с прибылью 6,8 млрд долл., а II кв. 2017 г. оказался рекордным за последние четыре года – выручка 54,7 и прибыль 9,9 млрд долл. [22]. Не прошло и трех месяцев, как рекорд II кв. оказался в прошлом. В III кв. новый рекорд – выручка 55, а операционная прибыль – 12,87 млрд долл. С такими темпами скоро годовую выручку «Ростеха» Samsung достигнет за 10 дней. Цена только одного бренда Samsung почти в три раза превышает выручку «Ростеха» за весь 2016 г.

Совсем недавно в СМИ появились сообщения о включении «Ростеха» в список компаний, на которые распространяется новый американский закон о санкциях. Похоже, санкции ограничат возможности «Ростеха» не только по крупным транзакциям и зарубежным кредитам, но и по любому взаимодействию американских и связанных с ними компаний по передаче «Ростеху» военных и современных гражданских технологий и изделий. История с турбинами Siemens еще не закончилась, и следует ожидать санкций со стороны Евросоюза. Вполне возможно, что они окажутся спасительными для «Ростеха» в оправдании возможного провала новой стратегии. Почему бы и нет, раз подобное получи-

Таблица 2. Финансовые показатели корпорации «Ростех» и зарубежных компаний в 2016 г.

Компания	Выручка, млрд долл.	Прибыль, млрд долл.	Численность сотрудников, тыс. чел.
«Ростех»	18,9	1,3	453
Samsung (Ю. Корея)	180,9	20,4	309
Siemens (Германия)	88	6,2	351
Boeing (США)	94,6	4,9	148
General Electric (США)	111,5	17,5	295
Northrop Grumman (США)	24,5	3,2	67
Leonardo (Италия)	13,2	0,6	46

Источник: отчетность компаний, 2016 г.

лось у руководства страны с оправданием падения нашей экономики из-за санкций по Крыму и Украине.

БОРЬБА ЗА НАНОМЕТРЫ И ЗАКАЗЧИКОВ НА МИРОВОМ РЫНКЕ

Кроме преодоления рубежа продаж в 400 млрд долл. (если оно состоится), к главным достижениям мировой микроэлектроники в 2017 г. можно отнести достижения в области 7-нм техпроцесса. Обострившаяся конкуренция за рынки вынудила ведущие мировые компании ускорить эти работы и перейти к коммерциализации этой технологии.

В последние годы технологическую моду в новых производственных процессах микроэлектроники задает великолепная четверка – Samsung, TSMC, Intel, Globalfoundries. Два предыдущих процесса – 28 и 14 нм – компания Globalfoundries лицензировала у Samsung. Однако затем она решила самостоятельно разрабатывать следующие процессы по нормам 10 и 7 нм. Для этого Globalfoundries приобрела заводы и специалистов IBM, что позволило ей сделать технологический рывок. В июле 2017 г. компания объявила о доступности технологии 7 нм 7LP FinFET [23]. Эта технология предназначена для выпуска процессоров для мобильных устройств, серверов и оборудования сетевой инфраструктуры. Первые заказы будут выполнены в первом полугодии 2018 г., а со второго полугодия начнется серийный выпуск.

Globalfoundries анонсирует, что по сравнению с технологией 14 нм, плотность компоновки чипов увеличится более чем вдвое, а производительность возрастет на 40%. Эта технология, которая станет осваиваться на Fab 8 в США, будет использовать литографию в жестком ультрафиолетовом диапазоне (EUV).

В начале этого года компания Intel заявила о намерении начать тестовый выпуск процессоров по 7-нм норме в текущем году, а сам процесс уже находился в стадии тестирования [24]. Новые процессоры должны быть меньше и гораздо более энергоэффективными в сравнении с техпроцессом 14 нм. Однако не менее интересным является анонсирование использования в этих процессорах новых материалов, включая нитрид галлия, что открывает новые возможности в повышении уровня автономности ноутбуков с подобными про-

цессорами. Одной из причин проблем, возникших у Intel в последние годы, как раз являлось недостаточное внимание компании к изделиям для мобильных приложений. Являясь безоговорочным лидером в процессорах для стационарных приложений, Intel не уделяла должного внимания продукции для планшетов, смартфонов и т. д. Осознав эту ошибку, руководство компании несколько лет назад решило изменить подходы.

Борьба за заказчиков и скорейшее начало серийного производства по меньшим проектным нормам носит очень жесткий характер. Каждая из компаний использует свою тактику в надежде опередить конкурентов. Так, Samsung ранее отказалась от техпроцесса 20 нм, чтобы ускорить работы по процессу 14 нм. В гонке за реализацией процесса 7 нм у Samsung не все складывается, как ожидалось. По плану во второй половине 2017 г. должен был быть завершен монтаж оборудования новой линии 7 нм, а с IV кв. 2017 г. должно было начаться массовое производство. Однако возникшие трудности вынудили Samsung перенести сроки более чем на квартал [25]. Тем самым Samsung дает фору своему основному конкуренту – TSMC. Эта фабрика уже перехватила у Samsung заказы Qualcomm на 7-нм чипы SnK. В середине 2017 г. Samsung заявила о сокращении инвестиций в развитие 7-нм техпроцесса и о желании сосредоточить усилия на освоении 6-нм технологии. Начало массового производства по этому процессу запланировано с 2019 г. Ранее Samsung запустила производство по техпроцессу 10 нм и подтвердила работы над процессом 8 нм. 20 октября текущего года Samsung заявила о завершении аттестации процесса 8 нм FinFET 8LPP и готовности к массовому производству [26]. Процесс 8LPP обеспечит 10-% уменьшение потребления и такое же сокращение площади чипа в сравнении с 10-нм техпроцессом. Новый процесс предназначен для мобильных сетевых, серверных, облачных приложений, а также для операций с криптовалютами. Из заявлений Samsung следует, что аттестация закончена на три месяца раньше срока.

Для компании TSMC, основного конкурента Samsung в последние годы, опередить южнокорейского гиганта является не столько делом принципа, сколько задачей первоочередного

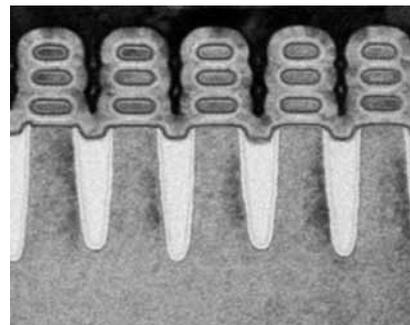


Рис. 4. Транзистор объединения Research Alliance с нанослоями кремния для 5-нм техпроцесса

наполнения заказами своего производства и борьбы за заказчиков. В отличие от Samsung, компания TSMC является чистой фондри. Не имея собственной продукции, TSMC может получить прибыль только за счет выполнения заказов по контрактному изготовлению кристаллов от сторонних заказчиков. Именно новые технологии в последние годы дают основную выручку компании. Например, в 2016 г. более половины доходов получено по заказам на реализацию кристаллов по норме 28 нм и менее.

Ограниченные поставки TSMC чипов по норме 7 нм начались в первом полугодии 2017 г. [27]. Поскольку экономические показатели и выход годных были недостаточными, TSMC увеличила штат инженеров-исследователей и выделила рекордные 2,2 млрд долл. на НИОКР. Начало массового производства запланировано на I кв. 2018 г. У TSMC – более 20 заказчиков на 7-нм кристаллы.

В 2016 г. TSMC начала строительство в Китае нового завода производительностью 20 тыс. пластин в месяц диаметром 300 мм по норме 16 нм [28]. Выбор 16 нм обусловлен действующими ограничениями на передачу в Китай современных технологий, к которым относится техпроцесс 14 нм. Предприятие будет

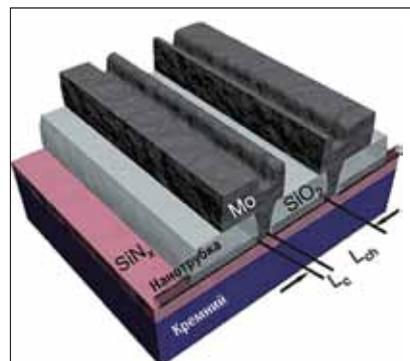


Рис. 5. Транзистор IBM, выполненный по проектной норме 1,8 нм, с каналом из углеродной нанотрубки

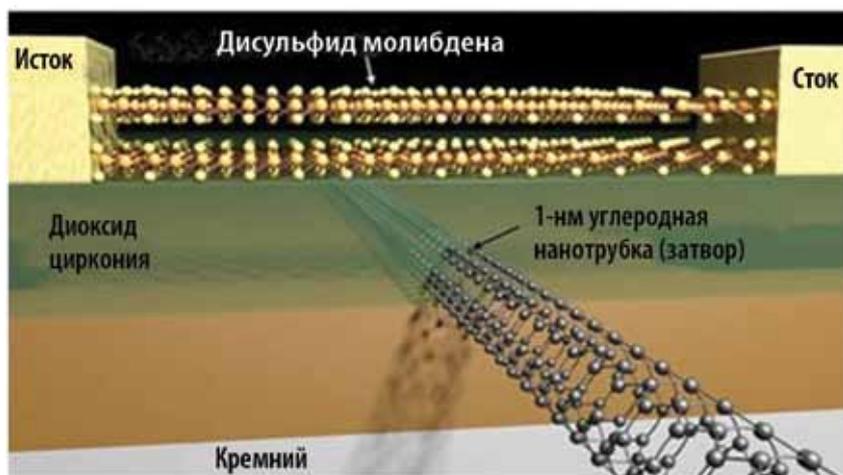


Рис. 6. Транзистор Калифорнийского университета, изготовленный по проектной норме 1 нм, с затвором из углеродной нанотрубки

запущено в работу во второй половине 2018 г. Нет сомнений, что довольно быстро на этом предприятии будет освоена технология 14 нм. Однако больше, чем TSMC, в этом проекте строительства завода автор отметил бы заслугу правительства Китая. Несмотря на все формальные и неформальные ограничения со стороны Тайваня и США, Китай планомерно добивается передачи самых современных технологий, производств и рынков сбыта на свою территорию. Чаще всего для этого ему нет необходимости вкладывать в эти проекты собственные гигантские инвестиции – достаточно создать привлекательные условия для зарубежных компаний. Насколько резко это контрастирует с действиями руководства и правительства России!

TSMC также ведет работы по 5-нм техпроцессу и менее. Для этого чипмейкер запланировал строительство нового завода в южной части Тайваня с инвестициями примерно 15,6 млрд долл. Серийное производство на нем намечено на 2020 г. В этом же году запланирован монтаж технологических линий по норме 3 нм с началом серийного производства в 2022 г. Однако этот проект столкнулся с рядом трудностей, обусловленных природоохранной оценкой и недостатком электричества в Тайване. В результате TSMC начала рассматривать возможность строительства завода, работающего в США по 3-нм техпроцессу. В этом проявляется отличие открытой частной рыночной компании от государственной: при возникновении непредвиденных препятствий она моментально реагирует и ищет альтернативные варианты, чтобы не нарушить

ключевые сроки проекта. И государственный патриотизм не играет никакой роли. Хотя можно было бы предположить, что при прочих равных условиях решение будет принято в пользу Тайваня. И действительно, в октябре текущего года TSMC сообщила об урегулировании всех спорных вопросов с тайваньским правительством и о решении строить новую фабрику все-таки в Тайване [29].

Одним из сдерживающих факторов в ускорении подготовки 7-нм производства является задержка компанией ASML поставки литографического оборудования с излучением в жестком ультрафиолетовом диапазоне (EUV). С начала года ASML выпустила всего шесть систем EUV при текущей потребности в 23 установках, что привело к борьбе чипмейкеров за это оборудование. Однако увеличение выпуска оборудования позволило ASML в III кв. текущего года увеличить выручку до 2,447 млрд евро, чистую прибыль до 557 млн евро [30]. В одном можно не сомневаться – текущий спрос на системы EUV в еще большей мере улучшит финансовые показатели ASML в 2018 г.

Конкурентная битва этой «великолепной четверки» за заказчиков и рынки, а уже потом за нанометры разительно контрастирует с гонками наших отечественных чипмейкеров за большие нанометры в отсутствие заказчиков [31]. Именно благодаря этой конкурентной борьбе идет технический прогресс, постоянно снижается себестоимость и цены на рынке электроники. Благодаря ей объемы мировых рынков полупроводников растут и регулярно во все более короткие сроки обновляют рубежи в очередную сотню миллиардов долларов. Наша

страна с 0,5-% мировой долей затерялась на дне, и все ускоряющийся мировой поток не замечает нашего присутствия. Похоже, что нам на дне становится если не комфортно, то привычно. Очевидно, концепция отечественной «бутиковой» микроэлектроники устраивает руководство нашей промышленности.

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ БЕСКОНЕЧНА

По мере приближения к рубежу проектных норм 10 нм и менее мировой полупроводниковой электронике все сложнее и дороже обходится преодоление новых барьеров и подтверждение закона Мура. Ранее пределом кремниевой технологии ученые считали норму 7 нм. В настоящее время они полагают, что по кремниевой технологии могут изготавливаться транзисторы с 5-нм затвором.

Однако даже жесткая конкуренция между собой ведущих мировых компаний не мешает им объединять свои усилия в разработке новых процессов. Так, компании IBM, GlobalFoundries и Samsung, входящие в объединение Research Alliance, разработали новый техпроцесс изготовления транзисторов с нанослоями кремния. Эти транзисторы, в отличие от FinFET, имеют многослойную структуру затвора в виде нанолистов (см. рис. 4) [32]. Применение такого транзистора в 5-нм процессе позволяет увеличить количество транзисторов на чипе до 30 млрд против 20 млрд для 7-нм технологии. Новая технология позволит повысить производительность и уменьшить потребление, благодаря чему ресурс работы батарей в смартфонах и других мобильных устройств может быть увеличен в два-три раза. Новый техпроцесс был представлен на конференции в Киото (Япония). Специалисты IBM считают, что 5-нм кристаллы появятся быстрее, чем это предполагалось ранее. В 2014 г. компания IBM заявила, что для выполнения исследований по технологии с нанолистовой архитектурой ее часть инвестиций на пять лет составит 3 млрд долл.

Упомянутые выше исследования IBM подтверждают вывод о преждевременном исключении кремния из числа перспективных материалов на ближайшие годы. Однако уже при нормах менее 5 нм из-за эффекта квантового туннелирования происходит резкий рост токов утечек, что делает кремний непригодным

для создания транзисторов. Выходом является использование новых материалов вместо кремния. Компания IBM разработала вариант 1,8-нм транзистора с углеродной нанотрубкой в качестве токопроводящего канала транзистора (см. рис. 5) [33]. Материалом управляющего электрода являлся молибден. В IBM заявили, что первые кристаллы с углеродными нанотрубками должны появиться в 2020 г.

По последней информации, ученым из IBM удалось практически реализовать транзистор с углеродными нанотрубками площадью 40 нм [34]. Для этого пришлось использовать новую технику и технологию создания молибденовых контактов к углеродным нанотрубкам. Для увеличения плотности тока ученые использовали соединение из нескольких нанотрубок в каждом транзисторе. Результаты испытаний транзисторов с углеродными нанотрубками показали их более высокие быстродействие и эффективность в сравнении с кремниевыми транзисторами при более чем в два раза меньшей площади новых транзисторов.

Ученые из Калифорнийского университета в Беркли анонсировали создание самого миниатюрного в мире 1-нм транзистора с использованием углеродных нанотрубок в качестве затвора, а не канала транзистора (см. рис. 6) [35]. В таком транзисторе в качестве токопроводящего канала используется дисульфид молибдена (MoS₂), который иногда применяется для смазки двигателя. В отличие от кремния, MoS₂ более устойчив к эффекту квантового туннелирования. Ученые из Беркли полагают, что их транзистор позволит продлить действие закона Мура, правомерность которого для норм менее 7 нм подвергается сомнению. Команда ученых из Калифорнийского университета признает, что, несмотря на успешные результаты

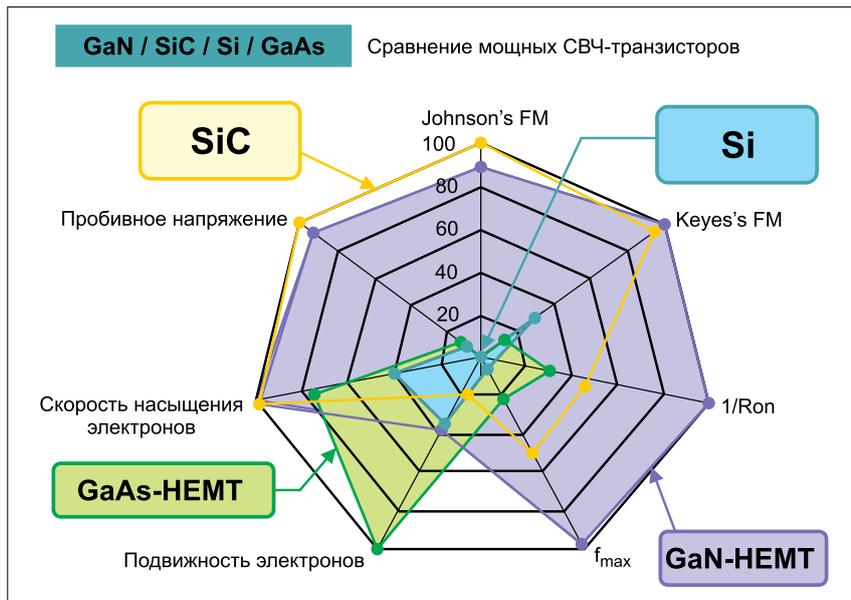


Рис. 7. Сравнительная диаграмма ограничений параметров СВЧ-транзисторов по частоте, электронной подвижности, обратному напряжению, сопротивлению

тестирования 1-нм транзистора, для его использования в архитектуре ИС предстоит пройти длинный и непростой путь. Однако передовая микроэлектроника никогда не стоит на месте и то, что вчера казалось фантастикой, завтра становится реальностью.

НИТРИД ГАЛЛИЯ

Если для сверхбольших интегральных схем с проектными нормами менее 7 нм еще только предстоит найти замену кремнию, то в некоторых текущих изделиях силовой электроники это уже удалось с успехом реализовать. Карбид кремния (SiC) считается одним из самых перспективных материалов в силовой электронике. Однако, несмотря на увеличение диаметра пластин SiC в последние годы с 50 до 150 мм, направленное на снижение стоимости, карбиду кремния пока не удалось стать широко применяемым коммерческим материалом. Диоды и транзисторы из карбида кремния из-за их высокой стоимости пока

остаются изделиями экстремального или безальтернативного применения. В последние семь лет бурное развитие получил нитрид галлия (GaN) – еще один материал из группы широкозонных полупроводников. В таблице 3 приведены основные физические параметры GaN в сравнении с Si, SiC, Ga₂O₃ [36]. В сравнении с кремнием GaN обладает высокой дрейфовой подвижностью носителей заряда, высокой критической напряженностью электрического поля, что позволяет использовать его в работе при более высоких пробивных напряжениях, частотах и температурах.

На рисунке 7 показана сравнительная диаграмма областей ограничения по обратному напряжению, электронной подвижности, частоте, сопротивлению для СВЧ-транзисторов на основе Si, SiC, GaAs HEMT, GaN HEMT [37]. Широкий диапазон преимуществ делает его наиболее перспективным материалом при постоянно растущем спросе в области СВЧ (см. рис. 8) и силовой электроники (см. рис. 9) [38–39]. Предполагается, что рост рынка нитрид-галлиевых СВЧ-транзисторов будет также происходить за счет снижения доли LDMOS в общем мировом рынке.

До 2010 г. GaN в основном использовался как материал эпитаксиального слоя на оксиде алюминия для светодиодов. Однако низкая теплопроводность Al₂O₃ не дает возможности использовать его в мощных изделиях силовой электроники. Применение подложки SiC вместо Al₂O₃ не позволяло перевести эти продук-

Таблица 3. Основные физические параметры Si, 4H-SiC, GaN, Ga₂O₃

Тип материала	Si	4H-SiC	GaN	β-Ga ₂ O ₃	α-Ga ₂ O ₃ (структура корунда)
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	3,3	3,4	4,5	5,3
Подвижность μ, см ² /(В·с)	1400	8000	1200	200	300
Напряженность электрического поля пробоя, мВ/см	0,3	2,5	3,3	6,5	10
Диэлектрическая постоянная	11,8	9,7	9,0	10	10
Критерий качества BFOM Si = 1	Низкая частота (εμE _c ³)	340	870	1231	6726
	Высокая частота (μE _c ²)	1	50	104	67

ты в разряд коммерчески доступных из-за высокой стоимости карбида кремния.

Одной из первых мировых компаний, приступивших к использованию

GaN на Si и продемонстрировавших значительный экономический эффект от его применения, стала Nitronex [40]. Еще в 2008 г. Nitronex показала, что

с эпитаксиальными структурами GaN-Si в сравнении с GaN-SiC стоимость чипа можно уменьшить более чем в 3 раза (см. рис. 10) [41]. Nitronex была первой компанией, начавшей выпуск СВЧ-транзисторов с использованием GaN на Si. В 2014 г. Nitronex была приобретена компанией MACOM. С 2012 г. началось широкое применение пластин GaN-Si в силовой электронике сначала для диодов Шоттки и транзисторов HEMT, а в последние два года – для создания интегральных микросхем силовой электроники. За пять лет сегмент GaN-продукции совершил такой рывок, что многие фирмы, начинавшие как стартапы, были приобретены большими компаниями, увидевшими большие перспективы этого направления. В настоящее время большое количество компаний в Америке, Европе, Азии специализируется на бизнесе изделий силовой электроники на основе GaN-Si. Главным преимуществом диодов Шоттки GaN-Si являются превосходные динамические характеристики в сравнении с Si и даже с SiC (см. рис. 11) [42]. У современных мощных GaN HEMT-транзисторов сопротивление в открытом состоянии в 40 раз меньше по сравнению с Si-MOSFET и в 15 раз меньше, чем у Si-SJMOSFET с суперпереходом (см. рис. 12) [43]. В таких же пропорциях это позволяет сократить площадь чипа, чтобы обеспечить одинаковые значения сопротивления.

Однако такое революционное уменьшение сопротивления транзисторов потребовало коренного пересмотра технологии сборки и применяемых корпусов. Из-за больших потерь по сопротивлению и мощности стало невозможным использовать технологию проволочной разварки выводов с чипа на корпус. По этой же причине отказались от выводных корпусов типа TO-220, SO8 и аналогичных им. Большинство производителей GaN-транзисторов применяет технологии монтажа чипов flip-chip и безвыводные корпуса с шариковыми выводами (BGA, LGA и др.). На рисунке 13 сравниваются потери между корпусом и кристаллом для разных типов корпусов, что иллюстрирует упомянутое выше [44]. Обращает на себя внимание, что даже корпуса типа LFPACK и DirectFET имеют значительные потери, неприемлемые для более низкоомных GaN-транзисторов, хотя эти корпуса разработаны недавно специально для мощных кремниевых MOSFET. Компания GaN Systems применяет сложную многослойную конструк-

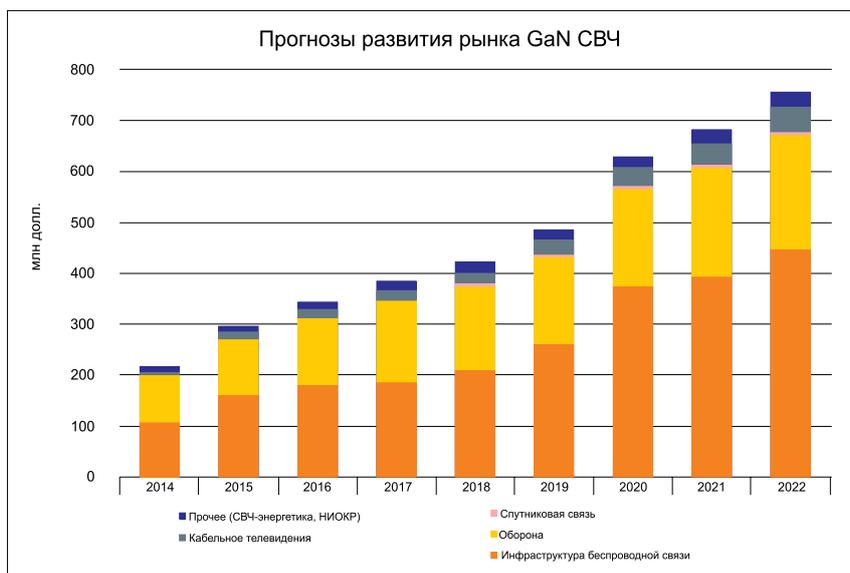


Рис. 8. Мировой рынок GaN СВЧ-транзисторов в 2014–2022 гг.

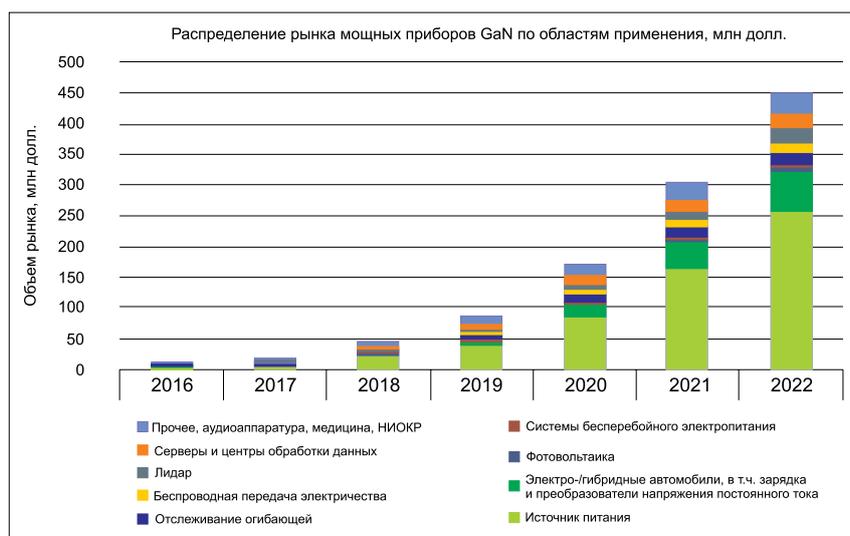


Рис. 9. Мировой рынок мощных GaN-транзисторов в 2016–2022 гг.

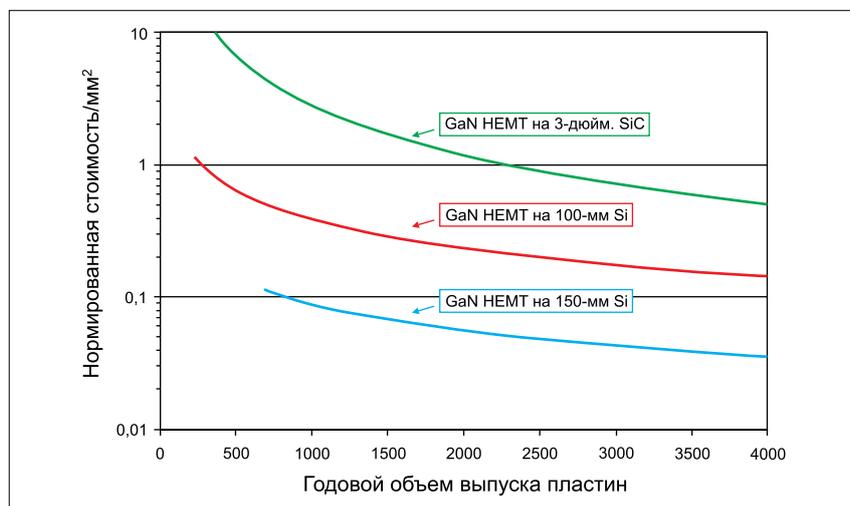


Рис. 10. Стоимость единицы площади чипов GaN HEMT с подложками SiC, Si при разных объемах производства

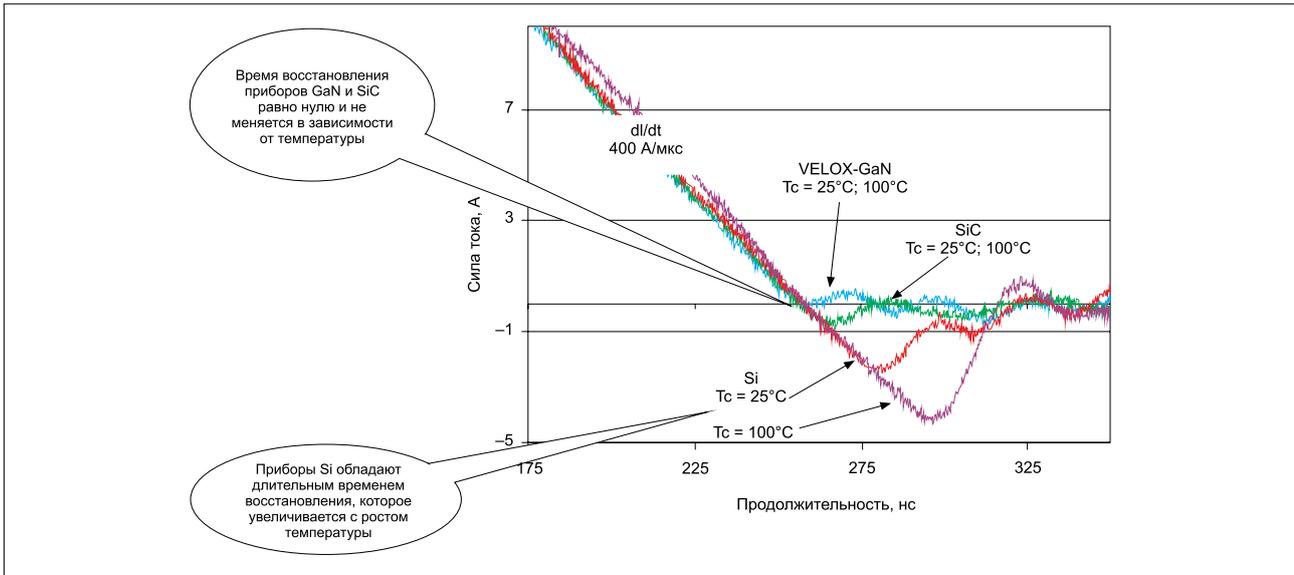


Рис. 11. Динамические характеристики диодов на основе Si, SiC, GaN при разных температурах



Рис. 12. Сравнение сопротивления и соотношения площади чипов 650-В транзисторов Si-MOSFET, Si-SJMOSFET и GaN HEMT

цию корпусов, позволяющую не только минимизировать потери, но и эффективно отводить тепло (см. рис. 14) [45].

На рисунке 15 показаны области применения GaN-изделий [46]. Основную долю рынка занимают источники питания

и преобразователи напряжения. В этих изделиях главным «мозговым и силовым центром» являются ИС управления (драйвер) и мощный выходной MOSFET-транзистор. 10–15 лет назад эти функции выполняли ИС и MOSFET, изготовленные на разных чипах и смонтированные в отдельных корпусах. Проблема их объединения в одном корпусе заключалась в невозможности соединения на одном кристалле сильно различающихся несовместимых технологий изготовления драйвера и MOSFET. Разработка технологий CDMOS, BCD позволила объединить эти функции на одном кремниевом чипе, что значительно повысило эффективность источников питания и преобразователей напряжения. Появление нового класса нитрид-галлиевых транзисторов потребовало идентичной интеграции функций на одном кристалле. Самой первой компанией, которой удалось решить эту задачу, стала Navitas

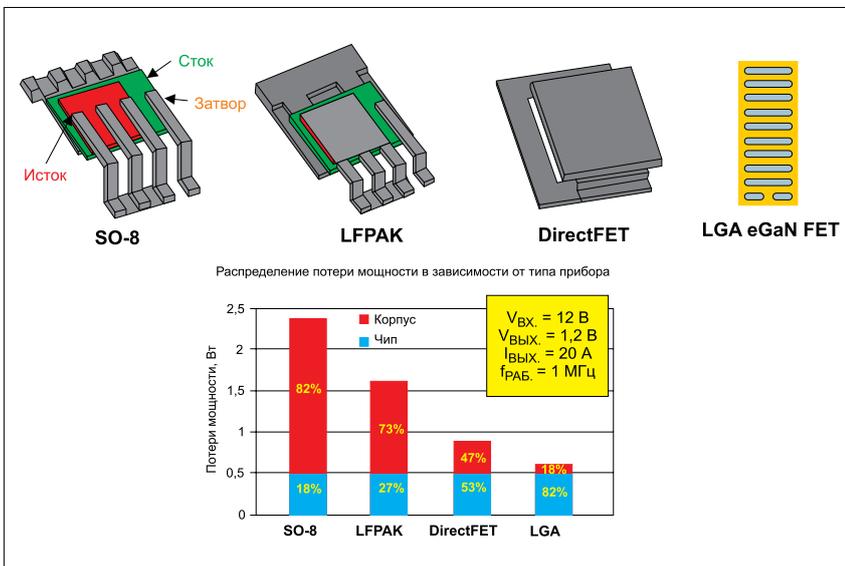


Рис. 13. Потери мощности между кристаллом и корпусом для различных типов корпусов



Рис. 14. Конструкция корпуса компании GaN Systems, разработанного для GaN-транзисторов

Semiconductor. Для интеграции функций ей потребовалось меньше времени, чем для кремниевых аналогов [47]. Компания была образована в 2013 г., но уже в 2016 г. выпустила на рынок под торговой маркой AllGaN первые драйверы с интегрированными на одном чипе GaN-транзисторами на кремнии. По данным Navitas, использование силовой ИС марки AllGaN в сравнении с изделиями по традиционной кремниевой технологии позволяет повысить быстродействие в 100 раз, в пять раз увеличить плотность мощности, на 40% повысить энергоэффективность и на 20% снизить стоимость.

17 октября 2017 г. компания Navitas анонсировала начало партнерства с TSMC по производству мощных ИС по технологии GaN на Si и с компанией Amkor – по сборке этих изделий [48]. Данное партнерство позволит удовлетворить резко возросшие заказы клиентов. Как заявил Брэдфорд Полсен (Bradford Paulsen), старший вице-президент по управлению бизнесом TSMC, компания инвестировала значительный капитал в технические и производственные возможности новой технологии. Такой интерес и инвестиции мировой фаундри-компании № 1 в новую технологию не только подтверждает ее

перспективность, но обещает максимально короткие сроки освоения и выпуска новой продукции для рынка.

ОКСИД ГАЛЛИЯ

В 2016 г. среди новых материалов для силовой электроники появился еще один фаворит. По крайней мере, таким его видят специалисты японской компании FLOSFIA Inc. [49]. Эта компания, являющаяся стартапом Киотского университета, создана для коммерциализации нового материала – оксида галлия. Ga_2O_3 относится к группе широкозонных полупроводников и обладает высокой напряженностью электрического поля, а его ширина запрещенной зоны 5 эВ выше, чем у GaN (3,4 эВ) и SiC (3,3 эВ), что обеспечивает Ga_2O_3 одинаковые значения напряженности электрического поля при меньшей толщине. Основной недостаток оксида галлия – плохая теплопроводность, что ограничивает возможности применения подложек Ga_2O_3 в мощных приборах. Компенсацию этого недостатка специалисты FLOSFIA видят в использовании в качестве подложки материала с лучшей теплопроводностью. Таким материалом они считают сапфир (Al_2O_3), широко применяемый в светодиодах. Именно на структурах $Ga_2O_3-Al_2O_3$ специалисты FLOSFIA получили первые высоковольтные диоды Шоттки с пробивными напряжениями 855 В [50]. В сравнении с SiC эти значения

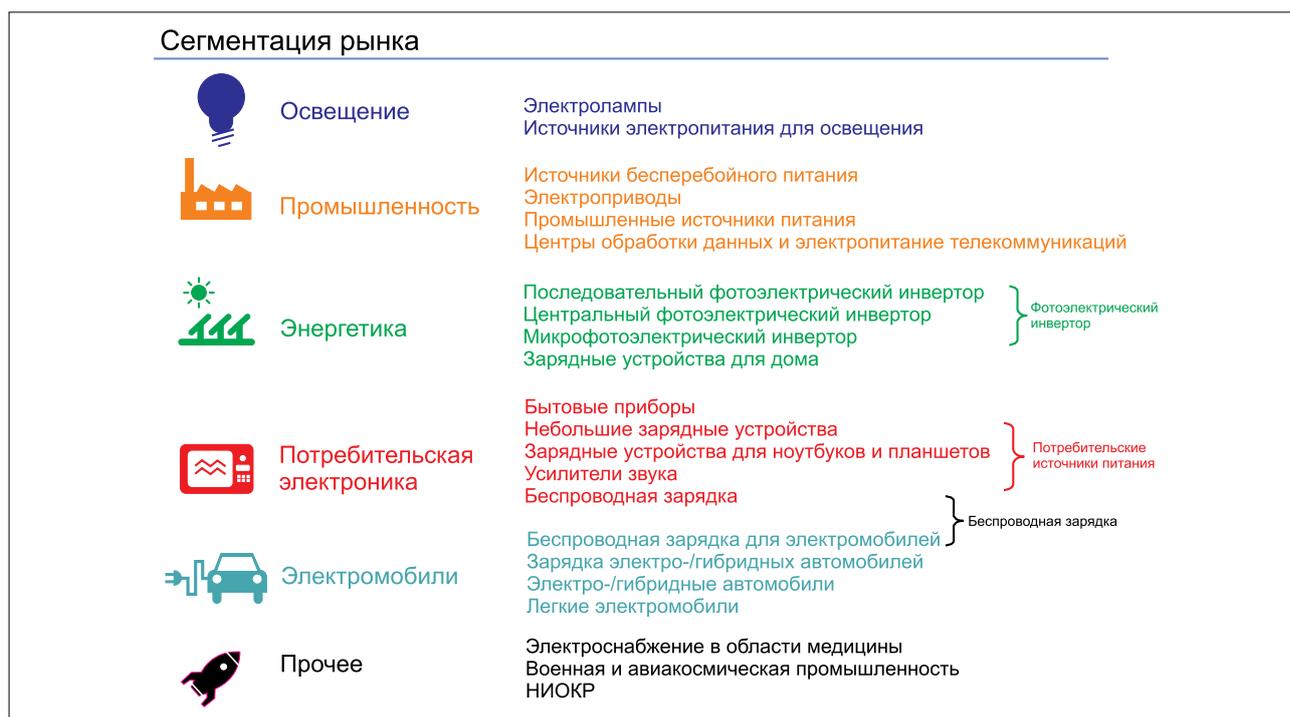


Рис. 15. Основные области применения изделий по технологии GaN

не впечатляют, если учитывать большую ширину запрещенной зоны Ga₂O₃. Авторы исследований связывают это с тем, что тестированию подвергались бескорпусные чипы, а не корпусированные приборы. В 2017 г. FLOSFIA передаст своим клиентам первые образцы в корпусе, а в 2018 г. планирует начать массовый выпуск диодов Шоттки с Ga₂O₃ на сапфире. В этом году компания привлекла 100 млн йен на завершение исследований и подготовку производства. Общая сумма инвестиций составила 850 млн йен. В 2016 г. были опубликованы результаты исследований японских ученых по Ga₂O₃ MOSFET с использованием в качестве канала, имплантированного кремнием, слоя Ga₂O₃ на подложке полупроводящего β-Ga₂O₃ [51].

Ближайшие годы покажут, действительно ли появился на рынке материалов для силовых полупроводников новый фаворит, или он станет в очередь следом за SiC в ожидании реальной коммерциализации. Пока что оксид галлия испытывает те же болезни роста, что и карбид кремния: у Ga₂O₃ – высокая цена, малые размеры пластин, и требуется достаточное время на совершенствование технологии.

ИНТЕРЕС ДЛЯ РОССИЙСКОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А что же российская микроэлектроника? Единственным предприятием, которое ведет технологические работы по компандным материалам для изделий силовой и СВЧ-электроники, является АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург) [52]. Но вот самого перспективного материала GaN на кремнии автор у них не увидел. Ни одно из российских полупроводниковых предприятий пока не анонсировало начало производства ИЭТ с использованием GaN–Si, хотя бы даже на импортных чипах. Работы, проведенные АО «Синтез Микроэлектроника» с мировыми производителями GaN ИЭТ, показали, что многие из них не стремятся выйти на российский рынок со своими изделиями. Ограничениями являются низкие объемы нашего рынка, а также проблема двойного применения изделий.

Тем временем IMEC, ведущий европейский центр по исследованиям и инновациям в микроэлектронике, сообщил о разработке технологии для 200- и 650-В изделий по технологии GaN на кремни-

вых пластинах диаметром 200 мм [53]. Как заявил Стефан Декутер (Stefaan Decoutere), директор программы GaN, IMEC предлагает клиентам разработку прототипов, изготовление небольших партий и передачу технологии. Особого внимания для российского рынка заслуживают результаты испытаний на радиационную стойкость приборов GaN на кремнии, проведенные IMEC совместно с Thales Alenia Space [54]. Они показали превосходную радиационную стойкость, что позволит на втором этапе квалифицировать эти изделия для применения Европейским космическим агентством. В 2011 г. компании Microsemi и Efficient Power Conversion (EPC) провели исследования температурной и радиационной стойкости GaN-транзисторов с напряжениями 40, 60, 100, 150 и 200 В. Результаты испытаний продемонстрировали хорошую работу транзисторов при температурах перехода близких к 300°C, устойчивость к одиночному импульсу (SEE) и накопленной дозе (TID) [55]. Это позволяет использовать GaN-транзисторы в военных программах, а также работать на высоких орбитах в условиях глубокого космоса.

В 2016 г. к выпуску мощных интегральных микросхем по технологии GaN на кремнии также приступил один из ведущих мировых производителей – компания Texas Instruments [56]. Как отмечалось выше, Intel, также рассматривающая GaN как материал посткремниевой эпохи, начала работы по разработке нитрид-галлиевых продуктов. GaN уже начал оправдывать и технические, и коммерческие надежды участников полупроводникового рынка. Коммерческие продажи GaN-продуктов силовой электроники (диодов, транзисторов, ИС) идут полным ходом. Теперь очередь за цифровыми большими интегральными схемами с нанометровыми проектными нормами.

Учитывая то, что около половины всей электронной элементной базы микроэлектроники в России составляют изделия для военной промышленности, вероятно, именно на эту сферу будут направлены основные исследования и работы по новым материалам в нашей стране. Хотя на мировом рынке такая продукция будет максимально востребована в гражданских сферах коммуникационной, потребительской, автомобильной и промышленной электроники. Это означает, что отставание отечественной микроэлектроники от мировой будет только возрастать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировая микроэлектроника развивается более быстрыми темпами, чем мировая экономика. Но это не значит, что первая развивается в отрыве от второй. Одно можно уверенно утверждать – в отличие от глобальной экономики, мировая микроэлектроника более отчетливо представляет, куда и как она будет двигаться, по крайней мере в ближайшие 5–10 лет. И это не может не вызывать оптимизма у участников этого движения.

Результаты и итоги российской микроэлектроники в 2017 г. соответствуют достижениям всей экономики России. ВВП нашей страны за последние восемь лет вырос всего на 4,3%, или в среднем на 0,53% в год при росте мирового ВВП за этот же период на 30%. Россия по этому показателю занимает неподобающее ей 163 место из 190 стран. Все последние годы этот показатель находится в отрицательном или нулевом диапазоне. Улучшить его не помогают ни импортозамещение, ни растущие (хотя и слабо) цены на нефть, ни большие денежные вливания в агропромышленный сектор и ВПК. Очередные исторические эксперименты с нашей страной и ее народом лишней раз подтвердили проверенный мировой практикой тезис: никакая страна в мире не может развиваться в изоляции, одиночестве и в отрыве от мировой науки, экономики и реальности. Микроэлектроника это чувствует и реагирует быстрее всех. Свою реальность наша страна создала себе сама без посторонней помощи, и в этой реальности ей жить. Осталось дожидаться, чтобы вся страна это ощутила и поняла, что так дальше жить нельзя. И желательно чтобы это осознание пришло не «задним умом». ☹

ЛИТЕРАТУРА

1. *Global Semiconductors Alliance (GSA). Forecast 2017*//www.gsaglobal.org.
2. *Strong pickup in Semiconductor in 2017. February 26, 2017*//www.semiconductorintel-ligence.com.
3. *Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Forecast to Grow 7.2 Percent in 2017. Press Release. January 23, 2017*//www.gartner.com.
4. *Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue to Reach \$400 Billion in 2017. July 11, 2017*//www.gartner.com.
5. *Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue to Reach \$411 Billion in 2017. October 12, 2017*//www.gartner.com.

6. Record Chip Content in Electronics Projected. *EE Times*. July 19. 2017//www.eetimes.com.
7. IC Insights Raises 2017 Market Forecast to +22%. October 18. 2017//www.icinsights.com.
8. Semiconductor Sales Revenue Worldwide from 1987 to 2019. *Statistics Portal*//www.statista.com.
9. *Research Bulletin*. September 12. 2017//www.icinsights.com.
10. Samsung dethrones Intel as semiconductor king. *The Korea Herald. The Investor*. July 28. 2017//www.theinvestor.co.kr.
11. Why China Wants U. S. Memory Chip Technology – And What Washington is Doing About It. *FORBES*. December. 2016//www.forbes.com.
12. Микроэлектроника (рынок России). Состояние, тенденции, перспективы. 22 июня 2017//www.tadviser.ru.
13. Алексей Волостнов. Российский рынок микроэлектроники: сегодня и завтра. *SEMICON Russia 2014. FROST & SULLIVAN*.
14. Отчет исследования российского рынка электронных компонентов. ООО СОВЭЛ. 2013.
15. www.frost.com.
16. China's Impact on the Semiconductor Industry: 2015 Update//www.pwc.com/chinasemicom.
17. Мы точно не обездоленные. Интервью министра промышленности и торговли Дениса Мантурова. *Эксперт*. 2017. № 3.
18. Дмитрий Боднар. Новый формат компактных кремниевых фабрик – решение для микроэлектроники России. *Электронные компоненты*. 2015. № 3.
19. Ростех «ограждает» и покушается на лавры Samsung и General Electric. *Время электроники*. 25 декабря 2015//www.russianelectronics.ru.
20. Иван Дмитриенко. Технологии поглощения. *Деловой еженедельник. Профиль*. 19 сентября 2017.
21. Дмитрий Боднар. Монопольная глобализация или глобальная монополизация. Что происходит в России? *Электронные компоненты*. 2014. № 1, 2.
22. www.samsung.com.
23. Globalfoundries on Track to Deliver Leading Performance 7 nm FinFET Technology. June 13. 2017//www.globalfoundries.com.
24. Intel pursues Moore's Law with plan to make 7-nm chips this year. Jan 27. 2017//www.computerworld.com.
25. Samsung's 7 nm Process May Be Behind the Schedule. October 12. 2016. *CTIMES*//www.ctimes.com.tw.
26. Samsung Completes Qualification of 8nm LPP Process. October 18. 2017//www.news.samsung.com.
27. TSMC tests 7-nanometer chips, edges ahead of Samsung. *Nikkei Asian Review*. May 26. 2017//www.asia.nikkei.com.
28. TSMC and Nanjing Sign 12-inch Fab Investment Agreement. *Hsinchu. Taiwan*. March 28. 2016//www.tsmc.com.
29. TSMC Aims to Build World's First 3-nm Fab. *EE Times*. October 2. 2017//www.eetimes.com.
30. Press Releases. October 18, 2017. *ASML Holding*//www.asml.com.
31. Дмитрий Боднар. Погоня российской микроэлектроники за нанометрами в отсутствие рынка сбыта. *Электронные компоненты*. 2017. № 1.
32. IBM Research Alliance Builds New Transistor for 5 nm Technology. June. 05. 2017//www-03.ibm.com.
33. IBM Research Breakthrough Paves Way for Post-Silicon Future with Carbon Nanotube Electronics. October 01. 2015//www-03.ibm.com.
34. IBM has made Carbon nanotubes smaller and faster than silicon. June 30. 2017//www.nextbigfuture.com.
35. Scientist Just Developed the World's Smallest Transistor. October 7. 2016//www.sciencealert.com.
36. CS International Conference 2017//www.frosfia.com.
37. Welcome to the Post-Silicon World: Wide Bandgap Powers Ahead. May 2016//www.navitassemi.com.
38. RF Power Market Technologies GaN, GaAs and LDMOS. *Yole Development*. 2017//www.yole.fr.
39. Power GaN 2017: Epitaxy, Devices, Applications and Technology Trends. *Yole Development*. October 2017//www.yole.fr.
40. Qualification and Reliability of a GaN Process Platform. *Nitronex Corporation*. 2007.
41. GaN Essentials. *Substrates for GaN RF Devices. Nitronex Corporation*. June. 2008.
42. Novel 600 V GaN Schottky Diode Delivering SiC Performance without the SiC Price. *Velox Semiconductor*//www.veloxsemi.com.
43. Maximizing GaN Power Transistor Performance with Embedded Packaging. *GaN Systems Inc.*//www.gansystems.com.
44. www.epc-co.com.
45. www.gansystems.com.
46. RF GaN Technology & Market Analysis: Applications, Players, Devices & Substrates 2010–2020. *Yole Development*. May 2014//www.yole.fr.
47. www.navitassemi.com.
48. Navitas Announces TSMC & Amkor Manufacturing Partnerships. October 18. 2017//www.navitassemi.com.
49. www.frosfia.com.
50. Schottky barrier diodes of corundum-structured gallium oxide. *Applied Physics Express* 9. 021101. 2016.
51. Field-Plated Ga2O3 MOSFETs with a Breakdown Voltage of Over 750 V. *IEEE Electron Device Letters*. Vol. 37. No. 2. February. 2016.
52. www.svetlana-rost.ru
53. IMEC World-First to Develop 200V and 650V dispersion free, normally-off, e-mode Power Devices on 200mm/8-inch Si Wafers. June 13. 2017//www.imec-int.com.
54. IMEC's 200mm GaN-on-Si e-mode power devices withstand heavy ion and neutron irradiation. March 7. 2017//www.imec-int.com.
55. Microsemi Announces the Development of Enhancement Mode Gallium Nitride FETs for Radiation Hardened Applications. March 17, 2011//www.microsemi.com.
56. Gallium Nitride (GaN) Solutions//www.ti.com.