

Основные тенденции развития, проблемы и угрозы современной микроэлектроники

Анатолий БЕЛОУС,
Д. Т. Н.
ABelous@integral.by
Виталий СОЛОДУХА,
К. Т. Н.
VSaladukha@integral.by

В данном аналитическом обзоре, выполненном с помощью форсайт-методов, рассмотрены основные тенденции, направления развития и задачи мировой микроэлектроники, новые драйверы развития, проблемы экспоненциального роста количества используемых материалов и веществ, экономические особенности организации субмикронного производства, основные решаемые исследователями технологические проблемы, троянские и троллинговые угрозы.

Введение

Холдинг «Интеграл» является одним из крупнейших предприятий электронной промышленности Республики Беларусь и сегодня специализируется в основном в области кремниевой технологии изготовления интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов.

Для разработки стратегии развития на средне- и долгосрочный периоды руководителям и техническим специалистам, руководителям маркетинговых служб предприятия необходимо хорошо понимать механизмы, тенденции, направления, проблемы, риски и потенциальные угрозы мирового рынка полупроводниковой индустрии.

Современная экономика характеризуется стремительным развитием товарных рынков, усилением конкуренции на действующих и ростом входных барьеров на вновь формирующихся рынках. Все активнее начинают использоваться нематериальные активы (патенты, ноу-хау) для обеспечения конкурентных преимуществ компаний. Нынешняя ситуация на рынке характеризуется также применением новых методов управления и форм организации бизнеса: не только дифференциацией, но и интеграцией малых, средних, крупных предприятий для получения дополнительного экономического эффекта благодаря выгодному взаимодействию. Сегодня полупроводниковый бизнес строит свою деятельность, подчиняясь ключевому требованию — производить только то, что реализуется, а не продавать то, что производится, поскольку главная задача — удовлетворять все возрастающий спрос потенциальных потребителей.

Целью этой аналитической статьи и является попытка проведения системного анали-

за вышеперечисленных тенденций, проблем и угроз на основе изучения информации, опубликованной в научно-технической печати, размещенной на интернет-ресурсах, полученной авторами в процессе работы над созданием технических монографий и учебных пособий, а также в процессе личного участия в международных конференциях, форумах и симпозиумах, переговорах с техническими специалистами и руководителями иностранных полупроводниковых компаний.

Еще одна цель данной публикации — предоставить читателям краткую информацию о состоянии и перспективах развития белорусской микроэлектроники. Отдельно здесь рассмотрены некоторые особенности проблем и угрозы применения ЭКБ иностранного производства. Авторы решили оформить результаты этого системного анализа в виде настоящей статьи, полагая, что она будет полезна как руководителям, так и техническим специалистам других предприятий полупроводниковой отрасли и потребителям ЭКБ.

Что касается холдинга «Интеграл», то во многом благодаря полученной в ходе наших исследований информации в текущем году в структуре холдинга завершается создание специального подразделения — отраслевой лаборатории новых материалов и технологий (ОЛНТМ), где кроме традиционных, кремниевых технологий будут разрабатываться конструкции и технологии новых приборов на основе широкозонных материалов (GaN, SiC и др.).

Форсайт как инструмент долгосрочного прогнозирования научно-технического развития

Важной тенденцией последнего десятилетия в мире стала активизация про-

гнозных исследований, связанных с определением перспективных направлений научно-технологического и инновационного развития, а также оценкой последствий принятия управленческих решений в сфере науки и технологий. Такие исследования являются сегодня неотъемлемым компонентом государственной научно-технической и инновационной политики всех развитых стран. Для обеспечения устойчивого развития требуются знания о том, на какие рубежи выйдут наука, техника и технологии не только в краткосрочном периоде, но и в достаточно отдаленном будущем. На основе долгосрочных прогнозов определяются приоритетные области науки и технологий, являющиеся объектами государственной поддержки. С их помощью формируются национальные научно-технические программы, определяются стратегические направления инновационного развития, разрабатываются конкретные меры государственной политики в этой сфере [1].

В развитых странах деятельность по стратегическому прогнозированию осуществляется в рамках национальных программ с использованием системы методов, объединенных общим названием «форсайт» (от *англ.* foresight — «предвидение»). Форсайт представляет собой систему методов экспертной оценки стратегических перспектив инновационного развития, выявления технологических прорывов, которые способны оказать максимальное воздействие на экономику и общество в средне- и долгосрочной перспективе [2].

Использование форсайта связано с растущей потребностью в использовании методов долгосрочного прогнозирования, не только основанных на экстраполяции существующих тенденций, но и учитывающих возможные технологические прорывы в будущем.

Основные направления развития современной микроэлектроники

Круг задач, стоящий перед исследователями, определяет и специфику конкретных используемых методов. Так, для эффективного управления инновационными процессами необходимо обеспечить связь между спросом на инновационную продукцию и ее предложением, которое, в свою очередь, определяется результативностью научных исследований и существующими возможностями производства. Для решения этой задачи в мировой практике широко применяется один из методов форсайта — технологические дорожные карты.

Технологическая дорожная карта — это направленный в будущее взгляд на выбранный круг проблем, представляющий собой продукт коллективного знания и предвидения наиболее авторитетных специалистов.

Карта дает комплексное, взаимосвязанное представление о перспективах развития технологий в конкретных сферах деятельности, позволяя взаимно увязать программы научных исследований, создания промежуточных и конечных продуктов, а также показать их связь с намеченными целями развития.

Отличительной чертой таких дорожных карт является детальный учет фактора времени. Этапы инновационного цикла для различных продуктов и технологий отображаются на единой «линии времени», при этом делается акцент на согласовании временных координат действий и событий. Такой подход позволяет связать воедино планы научных исследований, разработки и внедрения продуктов. Дорожная карта помогает определить степень готовности к производству отдельных видов продукции, одновременно давая представление о долгосрочных тенденциях развития рынка. Благодаря этому, например, можно оценить необходимость фундаментальных исследований в тех областях, которые не дают быстрого коммерческого эффекта, но стратегически важны для развития отрасли.

Еще одна существенная особенность дорожных карт — представление результатов исследования в четкой и понятной форме. Ядром дорожной карты служит визуальная схема движения к намеченной цели, которая интегрирует другие компоненты исследования и обычно пересматривается раз в год.

Ведущие специалисты в области электроники всех уровней под методическим руководством IEEE еще в 2018 году разработали комплекс официальных документов, представляющих собой техническую и методологическую основу новой редакции известного документа, который называется «Международная маршрутная карта развития полупроводниковых приборов, материалов и технологий» (International Roadmap For Devices and Systems). В этом документе следу-

ет выделить четыре ключевых направления развития микроэлектронных технологий:

- «Больше Мура» (миниатюризация КМОП). Предусматривает непрерывное уменьшение горизонтальных и вертикальных физических размеров КМОП ИС с целью уменьшения их стоимости и улучшения функциональных возможностей. Это *цифровая микронаноэлектроника, включающая базовую линию КМОП: логику, память, процессоры*. Пределом развития этого направления является «Система на чипе» (SoC). Основная функция — обработка информации.
- «За пределами КМОП». Описывает приборы, основанные на новых физических явлениях, которые предусматривают функциональное масштабирование за пределами КМОП-технологии. Это *квантовые вычисления, спинтроника, ферромагнитная логика и память, молекулярная электроника, атомные переключатели*.
- «Больше, чем Мур» (диверсификация). Имеет дело с гетерогенными компонентами — приборами, которые не обязательно масштабируются согласно закону Мура, предусматривают дополнительные функциональные возможности. Это *аналоговые ИС, радиочастотные (RF) приборы и ИС, пассивные элементы, возобновляемые источники энергии, сенсоры и актюаторы, биочипы*. Такие изделия имеют нецифровой контент. Основные функции — взаимодействие с человеком и окружающей средой.
- «Комбинация SoC and SiP». Системы высшего уровня. Новая технология — встраиваемые компоненты внутри печатных плат. Формируется печатный узел со сложной 3D-структурой, в которой как дискретные, так и пленочные компоненты расположены внутри самих печатных плат. Преимущества достигаются за счет гетерогенной интеграции, что позволяет совместить в одном корпусе элементы, изготовленные с применением различных микро- и нанотехнологических маршрутов. Рассмотрим более подробно основные тенденции развития современной микроэлектроники.

Глобализация полупроводникового бизнеса

Современная электронная промышленность представляет собой глобальную многоуровневую систему кооперации различных исследовательских институтов, промышленных предприятий, разработчиков технологического оборудования и средств проектирования.

Направление «Больше Мура», предусматривающее удвоение количества элементов на кристалле каждые два года и масштабирование приборов КМОП-технологии под более жесткие проектные нормы, уже многие годы доминирует в развитии микроэлектроники, обеспечивая подавляющую долю

в общем объеме прибыли [3]. Стремление добиться лидерства в данном направлении подхлестнуло гонку технологий: каждые два-три года появлялась новая технология с более жесткими проектными нормами, постепенно вытесняя предшествующие.

Вместе со сложностью технологий неуклонно росла и стоимость оборудования. Затраты на строительство фабрик для производства чипов по технологии 22 нм возросли вчетверо по сравнению с фабрикой на 130 нм — с \$1,5 млрд более чем до \$6 млрд.

Экспоненциально росла и стоимость разработки новых изделий по передовым проектным нормам. Например, затраты на создание одного изделия по проектным нормам 65 нм составят порядка \$6 млн. А если учитывать, что проект не может быть единственным (хотя бы из соображений венчурности), то расходы на НИОКР могут достигать астрономических величин.

Понятно, что сегодня такие объемы инвестирования могут позволить себе только отдельные компании. Поэтому крупные мировые компании тратят огромные деньги на разработку новых технологий и закупки нового технологического оборудования. Удержать столь высокий темп гонки капиталовложений в стремлении сохранить технологическое лидерство и свою долю рынка сегодня под силу лишь компаниям-гигантам, в этом мы видим главную причину наблюдаемого в последние годы процесса объединения и слияния полупроводниковых фирм [4].

Второй стороной укрупнения полупроводникового бизнеса и активизации процессов слияний является тенденция монополизации рынка: так, в 2018 году совокупная выручка 25 крупнейших производителей микроэлектроники составила 79,3% от всех объемов продаж на рынке полупроводников.

Использование новых материалов

Сегодня технологические инновации во всем мире осуществляются, главным образом, за счет появления новых материалов, снижения их стоимости и увеличения доступности, совершенствования технологий производства и увеличения функциональности. Подобно тому как 30 лет назад появление вместо биполярных конструкций транзисторов полевых транзисторов (MOSFET), созданных на основе кремния, определило качественный технологический скачок, появление сравнительно недавно новых полупроводниковых материалов группы Compound materials на основе нитридов металлов III группы (AlIN) в настоящее время знаменует начало нового этапа развития полупроводниковых технологий (рис. 1) [4].

Особенностью последнего десятилетия стал тот факт, что количество материалов и веществ, вовлеченных в технологический процесс изготовления, активно увеличилось, практически по экспоненциальной

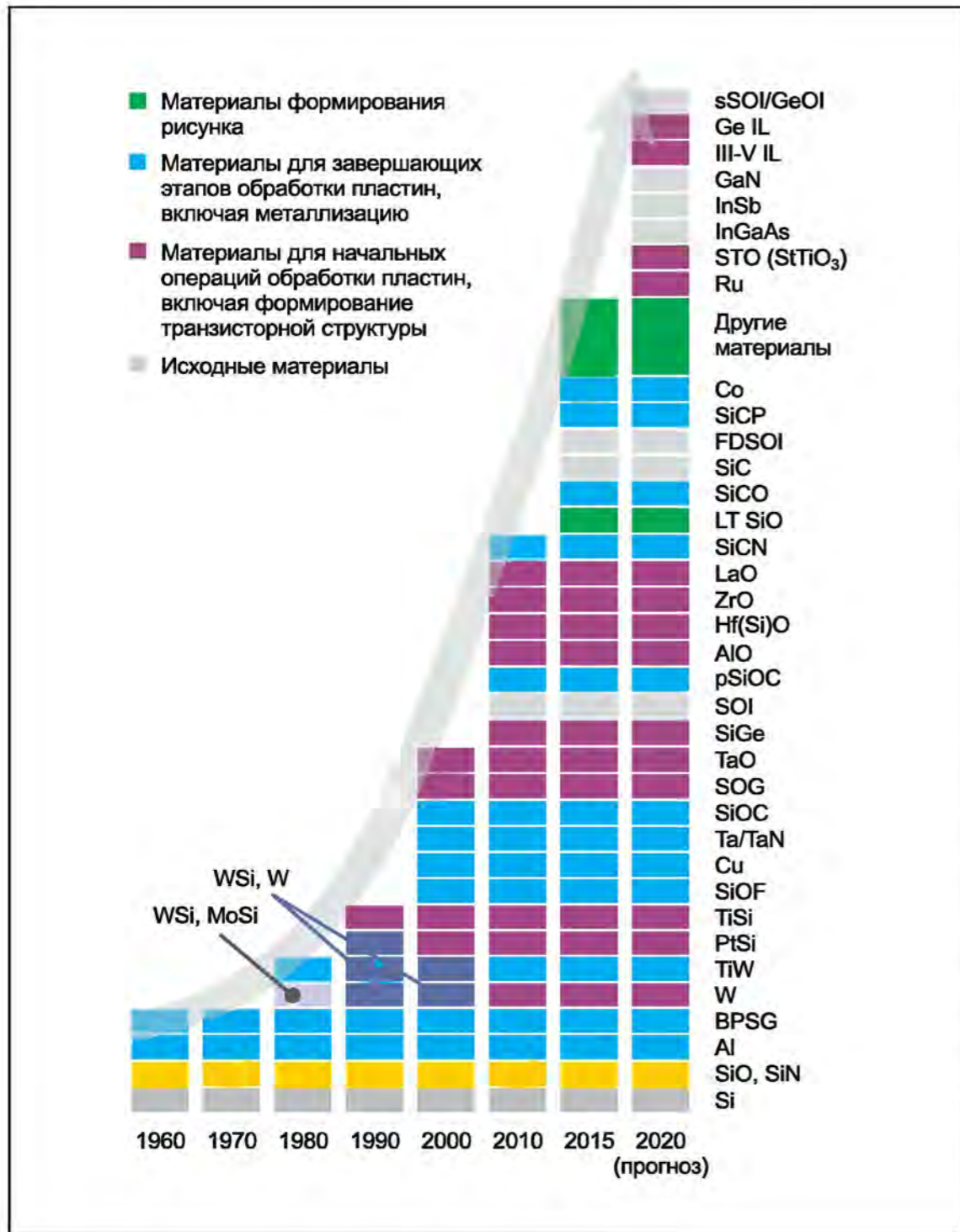


Рис. 1. Характер изменения количества материалов, используемых в новых технологиях

зависимости. И если в 1980 году в технологии использовалось только шесть основных типов материалов (Si, SiN, Al, BPSG, W, TiW), то в 2000-м — 12 типов, в 2010-м — 19, в 2015-м — 29, а к 2020 году прогнозируется уже не менее 37 [4].

В последние годы все большие усилия разработчиков ЭКБ концентрируются на применении широкозонных материалов и гетероструктур на их основе, прежде всего на карбиде кремния (SiC) и нитриде галлия (GaN), а также фосфиде индия (InP), в том числе нитридах металлов III группы АІІІ и гетероструктурах Al (In)GaN/GaN, которые выращивают на таких подложках, как карбид кремния, сапфир и кремний. Вторая группа новых материалов относится к так называемым 2D monolayer materials — это графен, дихалькогениды переходных металлов (MoS₂, NoSe₂, WS₂ и др.).

К третьей группе пока исследуемых новых материалов следует отнести Carbon Nanotubes и Nanowires.

Смена драйверов развития

Еще одной из основных тенденций развития современной микроэлектроники стала смена так называемых драйверов — главных стимулов развития отрасли (Major Growth Drivers in Electronic Industry), что обусловлено очередным этапом эволюции технологий современного информационного общества. За последние пять лет здесь мы наблюдаем практически экспоненциальный рост достижений технического прогресса: интернет-трафик удваивается каждые полгода, объем передаваемой информации по беспроводной связи — каждые девять месяцев, оптической связи — каждые 12 месяцев. А ведь классический закон Мура, выполняющийся более 50 лет, говорит о том, что число компонентов/транзисторов на кристалле микросхем удваивается только каждые 24 месяца!

Как известно, долгое время такими драйверами развития микроэлектроники служили микропроцессоры, точнее процесс их масштабирования (scaling) (рис. 2) [5, 8].

Однако осуществлять scaling становится все труднее технически и все затратнее экономически. Поэтому сегодня очевидным новым

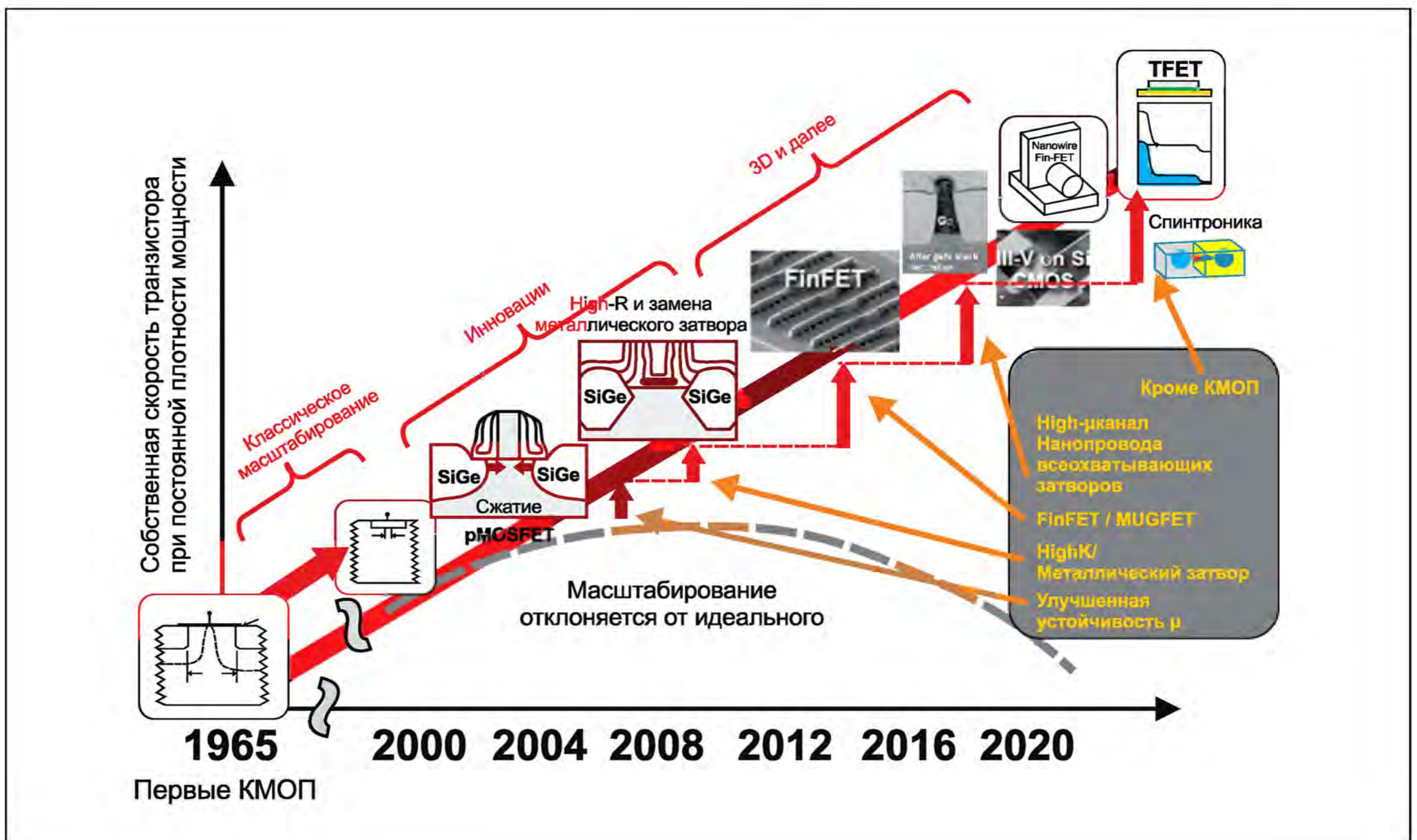


Рис. 2. Эволюция конструкции транзистора

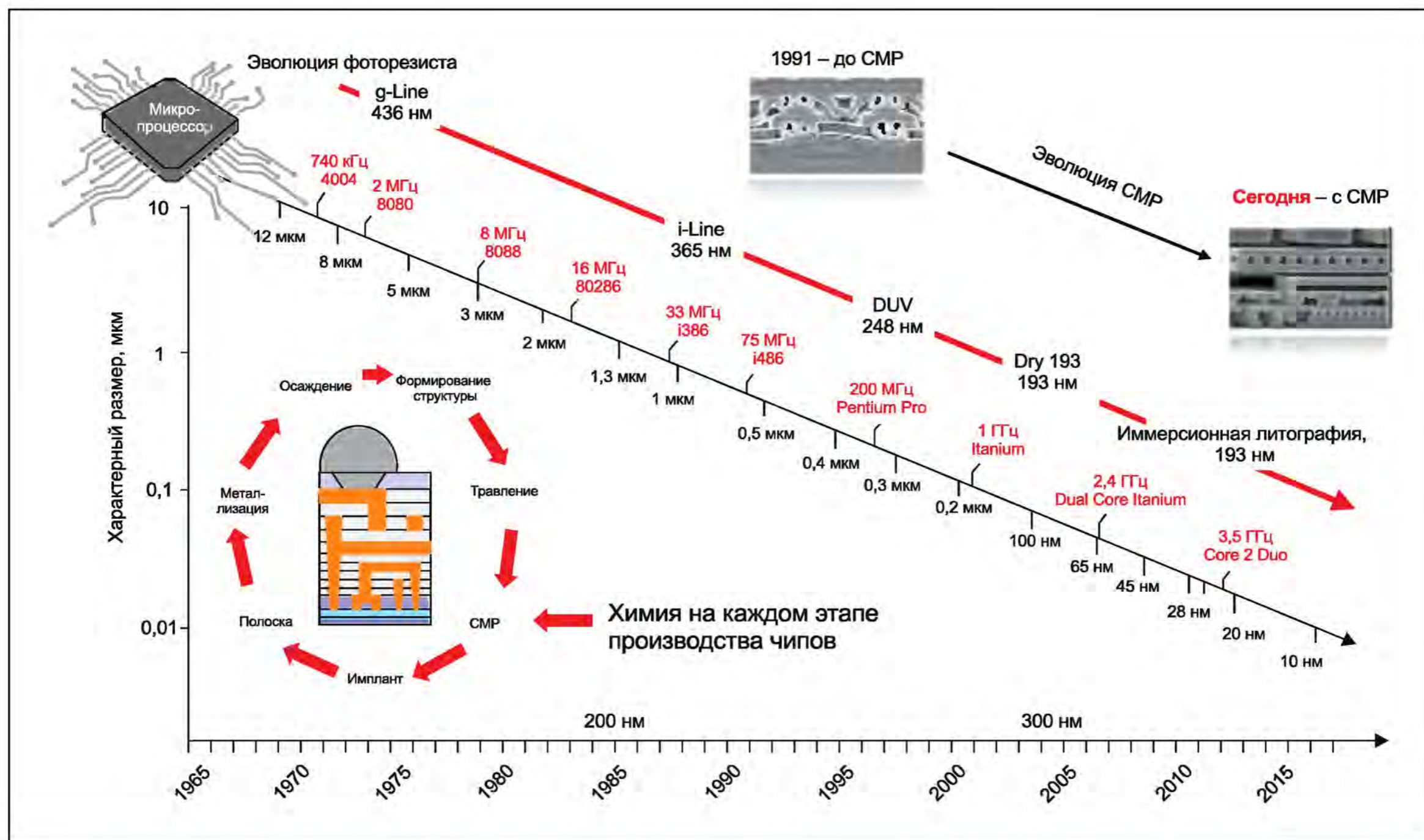


Рис. 3. Хронология процесса замены химических обработок на операции химико-механической полировки

драйвером являются глобальные телекоммуникации, а точнее «Интернет вещей» и «Интернет всего» (Internet of Everything, IoE), для которых необходимо создать новое поколение средств вычислений, передачи данных и систем хранения информации (computing, networking and storage systems), они в свою очередь требуют разработки новых вычислительных архитектур (computing paradigms), новых функций типа искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI) и квантовых вычислений (Quantum Computing, QC) [5].

Возможности классического, линейного масштабирования фактически были исчерпаны к 2005 году, затем определенных результатов в период до 2010-го удалось достигнуть за счет инновационного масштабирования (Innovations Scaling) — использования технологий HighK/Metal Gate, SiGe и др. [6].

Третий и последний этап масштабирования, который мы сегодня наблюдаем, связан с подходом 3D and beyond.

Говоря об основных тенденциях развития микроэлектронных технологий, следует отметить и такую важную тенденцию, как замена «чисто химических» обработок на операции «химико-механической» полировки (CMP). Если до 1990 года на абсолютном большинстве технологических операций маршрута изготовления ИС использовали чисто химические процессы, то уже в 1991-м был внедрен первый вариант процесса CMP

при изготовлении микросхем с нормой 0,5 мкм. Все последующие поколения технологий используют исключительно CMP в его различных модификациях (рис. 3) [7].

Особенности экономики субмикронного производства

В современном мире электронная промышленность — один из самых прибыльных секторов экономики. Средний срок окупаемости инвестиций в микроэлектронику не превышает трех лет. Один килограмм изделий микроэлектроники стоит столько же, сколько стоят примерно 100 т нефти. Так, годовые продажи лишь одного производителя мобильных телефонов Nokia в 2017 году сопоставимы по стоимости с годовым объемом экспорта российской нефти. Поэтому за место на рынке микроэлектроники идет жестокая конкурентная борьба.

Интересной особенностью мировой полупроводниковой промышленности является статистическая независимость размера прибыли (Operating Margin, OM) от размеров компании (малая, средняя или крупная) и объемов проданных микроэлектронных изделий. К примеру, усредненный за пять лет (2014–2018 гг.) размер OM составил 20%, причем независимо от объема продаж компании — \$10 млн, \$100 млн или \$10 млрд. Исключение составляет лишь ТОП-10 полупроводниковых фирм с годовым оборотом от 10 до \$80 млрд, где OM составляет 30–40% (рис. 4) [8].

Еще одна особенность: примерно 15% фирм работают годами с отрицательной маржой. Отечественным маркетологам и экономистам сложно представить такую ситуацию для своих предприятий. Ну как можно годами продавать свою продукцию фактически себе в убыток? Но таковы «волчьи законы» мирового рынка. Ведь если твое изделие оказалось неконкурентоспособным и ты уйдешь «зализывать раны» и дорабатывать убыточное изделие, то даже через некоторое время предложив новое замечательное изделие, на рынок второй раз ты уже выступишь с «клеймом» (репутацией ненадежного партнера), при этом бывшие твои покупатели уже работают с конкурентами, а чтобы найти новых, надо пройти весь трудный путь завоевания доверия, в том числе начинать опять с поставки «мелких» партий потребителям для оценки их качества и надежности, что потребует определенного времени. Поэтому надо держаться на рынке, параллельно работая над улучшением изделия (повышение технических характеристик и снижение издержек производства). Небольшой сегмент рынка с OM (30–50%) занимают компании, которые смогли предложить действительно инновационный продукт и некоторое время использовать монопольную позицию. Но конкуренты не дадут им долго «обогащаться» — десятки мелких и средних конкурентов постараются «воспроизвести» изделие с еще более высокими параметрами или более низкими издержками производства.



Рис. 4. Статистика зависимости операционной маржи полупроводниковых компаний от объемов продаж

Согласно оценке независимых экспертов, для успешной коммерциализации любого проекта НИОКР суммарный объем продаж в денежном выражении разработанного нового изделия должен в среднем в 10 раз превышать материальные расходы на его реализацию [6].

Так, если для микроэлектронных изделий с проектной нормой 0,8 мкм минимальный объем продаж, обеспечивающий окупаемость вложенных средств, составляет всего \$5 млн, для 0,5 мкм — \$8 млн, для 0,35 мкм — \$15 млн, для 180 нм — \$40 млн, то уже для 90 нм окупаемости удастся достичь только при объеме продаж свыше \$100 млн, 65 нм — \$200 млн, 45 нм — \$500 млн, а для нормы 22 нм этот рубеж составляет уже не менее \$1,4 млрд [5].

Вместе с тем следует отметить и такую весьма важную для оценки перспектив развития отечественной микроэлектроники тен-

денцию: микроэлектроника активно развивается и вне гонки проектных норм. В 2018 году мировая полупроводниковая промышленность произвела более 1 трлн интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, из которых примерно 700 млрд пришлось на дискретные полупроводниковые приборы, датчики и оптоэлектронные устройства. В частности, производство дискретных полупроводниковых изделий силовой электроники в 2018 году обеспечивало значительную часть загрузки линеек пластин диаметром 100, 125, 150 и 200 мм. Поэтому на текущий момент остается весьма существенным и количество НИОКР, направленных на создание изделий вне области глубокого субмикрона. Так, в 2015 году в мире было реализовано всего 9223 проекта по разработке ИС, причем 1880 проектов (20%) выполнялись по проектным нормам более 0,25 мкм (рис. 5) [8].

Каждое новое продвижение требует все больших усилий и средств и уже не по карману фирмам-одиночкам. Сегодня в мире разработка новых технологий — результат тесной кооперации большого числа компаний (включая малые и средние предприятия), научных институтов и университетов, центров коллективного пользования, обеспечивающих доступ всех участников проектов к дорогостоящему ультрасовременному технологическому и аналитическому оборудованию.

В частности, недалеко от Нью-Йорка была создана гигантская научно-промышленная зона в области микро- и наноэлектроники Albany Nanotech Complex, где расположены штаб-квартира и основные исследовательские центры крупнейшего в мире альянса полупроводниковых компаний Sematech. Входящие в него IBM, Intel, Samsung и другие крупные компании сегодня занимают более 50% мирового рынка чипов во многом благодаря их участию в этом альянсе. Аналогичная зона IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre) создана в Европе, в Бельгии. Именно в таких зонах новейшее производство объединяется с наукой.

Ученые и производственники разных стран, независимо от национальности и места проживания, объединились и уже более 20 лет успешно сотрудничают в области высоких технологий микроэлектроники, активно обмениваясь результатами и координируя свои действия.

Здесь нельзя не отметить общеизвестный и печальный факт, что за те же 20 лет существования Союзного государства России и Беларуси отечественная («славянская») микроэлектроника развивалась независимо в каждом из этих братских государств, часто дублируя как научные исследования,

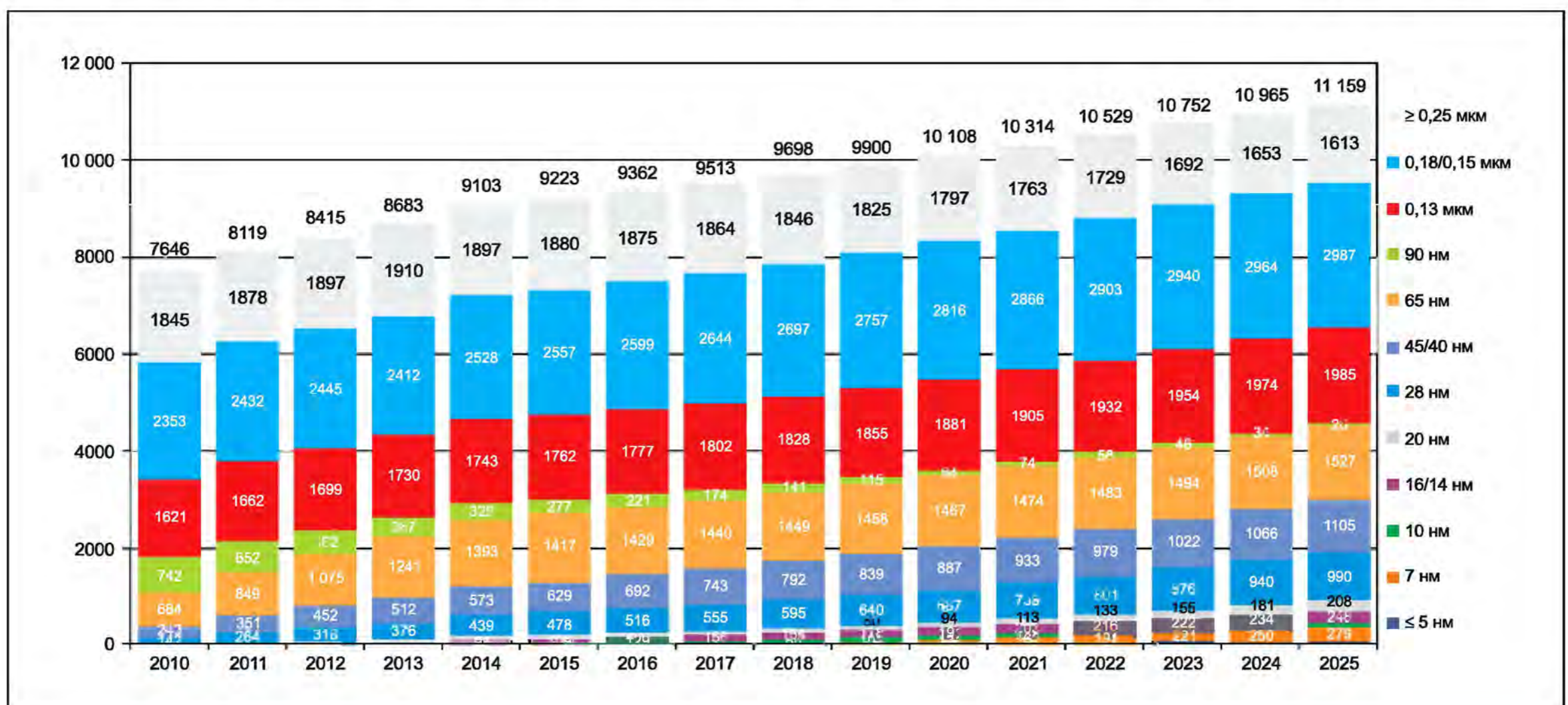


Рис. 5. Распределение новых проектов (НИОКР по разработке изделий микроэлектроники) в разрезе норм проектирования

так и конкретные разработки микросхем и полупроводниковых приборов (немногочисленные примеры реализации совместных научно-технических программ являются редким исключением из правил).

Учитывая вышеперечисленные тенденции развития современной микроэлектроники, нужно отметить, что назрела очевидная потребность использовать этот мировой опыт — создать аналогичные объединенные центры микроэлектроники с участием всех российских и белорусских коллективов (академические и отраслевые институты, промышленные предприятия, исследовательские и испытательные центры, в том числе совместные межгосударственные центры коллективного пользования).

Необходимо, что также вытекает из международного опыта, в экстренном порядке разработать межгосударственную программу развития отечественной микро- и нанoeлектроники.

Усиление деструктивного действия эффекта Yield Killer

Связанные с технологией изготовления микросхем флуктуации (разбросы) численных значений характеристик базовых транзисторов полупроводникового прибора всегда были серьезной проблемой для разработчиков и производителей микросхем. На технологическом сленге это явление известно как эффект Yield Killer («убийца процента выхода годных»). Как было показано в [6], для субмикронной технологии данный эффект оказывает действительно убийственное влияние на основные рабочие характеристики полевых транзисторов, причем чем меньше проектная норма, тем тяжелее с ним бороться. Как известно, все флуктуации (случайный разброс) технологических параметров в зависимости от их природы можно разделить на глобальные и локальные. Глобальные флуктуации влияют на все идентичные компоненты (пластины в реакторе подвергаются неравномерному нагреву в зависимости от их местоположения), локальные — не только на конкретную пластину, но даже на единичный кристалл (неравномерный нагрев пластины в центре и на периферии в процессе высокотемпературного окисления и др.). Причем оба типа флуктуаций включают как детерминированные, так и случайные составляющие. В качестве примера детерминированной составляющей можно привести распределение концентраций легирующей примеси (характер перераспределения примеси в центре и по краям пластин различен). Типовым примером возникновения недетерминированной (случайной) составляющей флуктуации является операция ионной имплантации, когда доза легирующей примеси устанавливается априори и итоговое распределение имеет конечную величину разброса. В итоге результи-

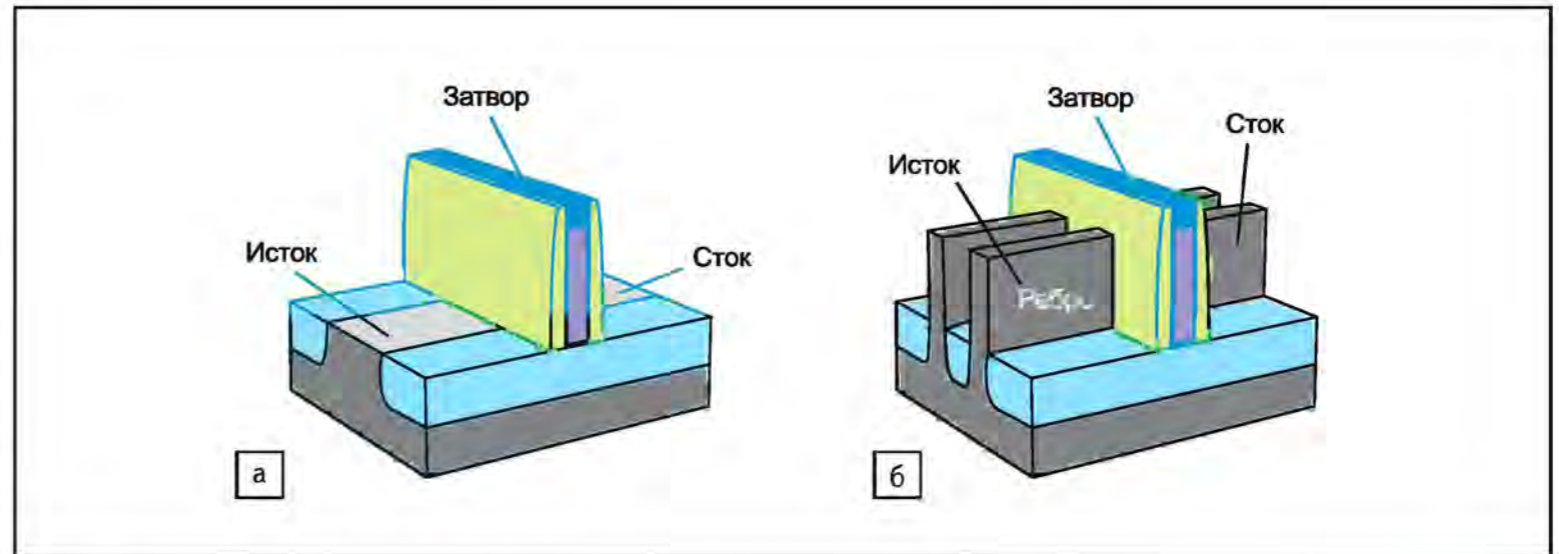


Рис. 6. Сравнение типов конструкций транзисторов: а) планарного; б) FinFET

рующее значение любого технологического параметра p в точке на пластине с координатами (x, y) определяется выражением:

$$p = p_{ном} + \Delta p_g + p_{id}(x, y) + \Delta p_{ir}$$

где $p_{ном}$ — номинальное значение параметра; Δp_g — величина глобального отклонения; p_{id} — локальное детерминированное отклонение, зависящее от местоположения; Δp_{ir} — локальное случайное отклонение.

Ярким примером усиления влияния флуктуаций в субмикронной области является Roughness (шероховатость, неравномерность) краев отдельных структурных областей транзистора. Так, по мере уменьшения размеров транзистора и его эффективной длины канала L величина Roughness приобретает все большее значение, что приводит к большему разбросу численных значений величины эффективной длины канала L_{EFF} а следовательно, и величины токов в транзисторе. Вот это и становится самым опасным следствием работы «убийцы». Например, как известно, разброс значений величины одного из важнейших компонентов эквивалентной электрической схемы субмикронного транзистора — подпорогового тока I_{SUB} обусловлен флуктуациями дозы легирования, толщины подзатворного оксида, длин каналов [9]. С другой стороны, величина I_{SUB} экспоненциально зависит от важнейших электрических параметров транзистора — пороговых напряжений и туннельного тока затвора, причем зависимость эта имеет ярко выраженный нелинейный характер даже в случае незначительного увеличения разброса технологических параметров. Влияние эффекта «убийцы» приводит к тому, что численные значения отдельных компонентов «токовой модели» субмикронного транзистора (туннельный ток затвора I_{GATE} , подпороговый ток I_{SUB} , ток перехода I_{JUNC}) при переходе к нормам «глубокого субмикрона» могут изменяться не в разы, а на порядки величин, что с учетом температурных и радиационных воздействий делает задачу проектирования и организации производства надежных микросхем архисложной и чрезвычайно дорогостоящей. Понимая этот факт, все вхо-

Таблица. Возможности производственных линий SMIC

Наименование	Технологическая нм	Мощность (пластин в месяц)	Расположение
BJ	200	50 000	Пекин, Китай
	300	35 000	
SH	200	120 000	Шанхай, Китай
	300	20 000	
SZ	200	60 000	Шэньчжэнь, Китай
TJ	200	50 000	Тяньцзинь, Китай
LF	200	50 000	Авеццано, Италия

дящие в ТОП-25 мировые лидеры полупроводникового бизнеса уделяют данной проблеме большое внимание [10–18]. Так, TSMC, GlobalFoundries, Samsung для своих линий 130, 90, 65, 40, 28, 20, 16 и 14 нм используют комплексы приборно-технологического моделирования PVT corner design, Fast PVT, 3-sigma Monte Carlo design, Fast Monte Carlo, High-Sigma Monte Carlo [24], предназначенные для борьбы с «убийцей». Из отечественных работ в области учета и противодействия Yield Killer в процессе приборно-технологического моделирования следует отметить [19–21].

Состояние и перспективы развития технологии FinFET в Китае

Как мы уже отмечали, третий и, наверное, последний этап scaling характеризуется массовым переходом на технологии FinFET/MUGFET, TFET. На рис. 6 показано сравнение общего вида конструкций классического планарного транзистора и FinFET (так его называли разработчики одного из первых FinFET за характерный внешний вид, напоминающий «рыбий хвост»). Учитывая ограниченный объем статьи, ниже мы рассмотрим текущее состояние с развитием этой технологии именно в Китае, который по прогнозу задействованных в последних форсайт-исследованиях экспертов в ближайшей перспективе станет мировым лидером в производстве изделий на основе FinFET-технологии. В качестве примера рассмотрим только одну китайскую компанию — SMIC, располагающую сегодня пятью производственными линиями: четыремя в Китае и одной в Италии (таблица).

В начале 2019 года компания SMIC завершила строительство своего завода SMIC South FinFET стоимостью \$10 млрд, который сможет значительно увеличить производство чипов с соблюдением 14-нм, а затем и 12-нм норм FinFET [6]. Это первая производственная линия FinFET в Китае, что весьма важно для страны, где уже находится более 150 полупроводниковых производств: ведущие мировые производители ранее никогда не разворачивали технологию FinFET в Китае по геополитическим причинам и соображениям охраны интеллектуальной собственности.

«Собственный» техпроцесс FinFET вводит SMIC в «элитный клуб», где пока насчитывается лишь пять компаний, выпускающих чипы с транзисторами FinFET.

В настоящее время SMIC имеет две 300-мм HVM-фабрики (используются для печати 28–65-нм чипов), которые загружены и приносят 40–49% выручки компании.

Долгосрочные планы SMIC включают освоение 10- и 7-нм норм, причем последний процесс потребует использования фотолитографии в глубоком ультрафиолетовом диапазоне, для чего в прошлом году SMIC приобрела сканер EUV у ASML.

SMIC не единственная китайская компания, которая готовится к началу массового 14-нм производства с транзисторами FinFET. Шанхайская компания Huali Microelectronics (HLMC) станет второй в 2020 году.

Массовое производство с проектными нормами 65 нм и менее в настоящее время организовано только в компаниях так называемого первого эшелона (TOP-10), в том числе Samsung, Intel, TSMC, GlobalFoundries, STMicroelectronics, Fujitsu, Cypress Semiconductor. Компании второго эшелона сегодня в основном работают с проектными нормами 90 нм и более и реально осваивать в массовом производстве проектные нормы ниже пока не планируют по вышеперечисленным причинам. В третий эшелон (180 нм и более) входят так называемые нишевые компании.

А что нас ожидает «за горизонтом FinFET»?

Как видно из вышеизложенного, технология FinFET и ее многочисленные разновидности (MUGFET и др.) прошли многолетний мучительный путь от революционной идеи (эскиза конструкции) до серийного производства, что мы и постарались показать на примере конкретной китайской фабрики. Эксперты мирового микроэлектронного сообщества прогнозируют с привлечением форсайт-методов дальнейшую эволюцию конструкции «рыбьего хвоста» по пути, иллюстративно отображенному на рис. 7 [8]. Этот путь называется Multigate Structures, конечной видимой сегодня точкой которого является структура типа Gates-all-around

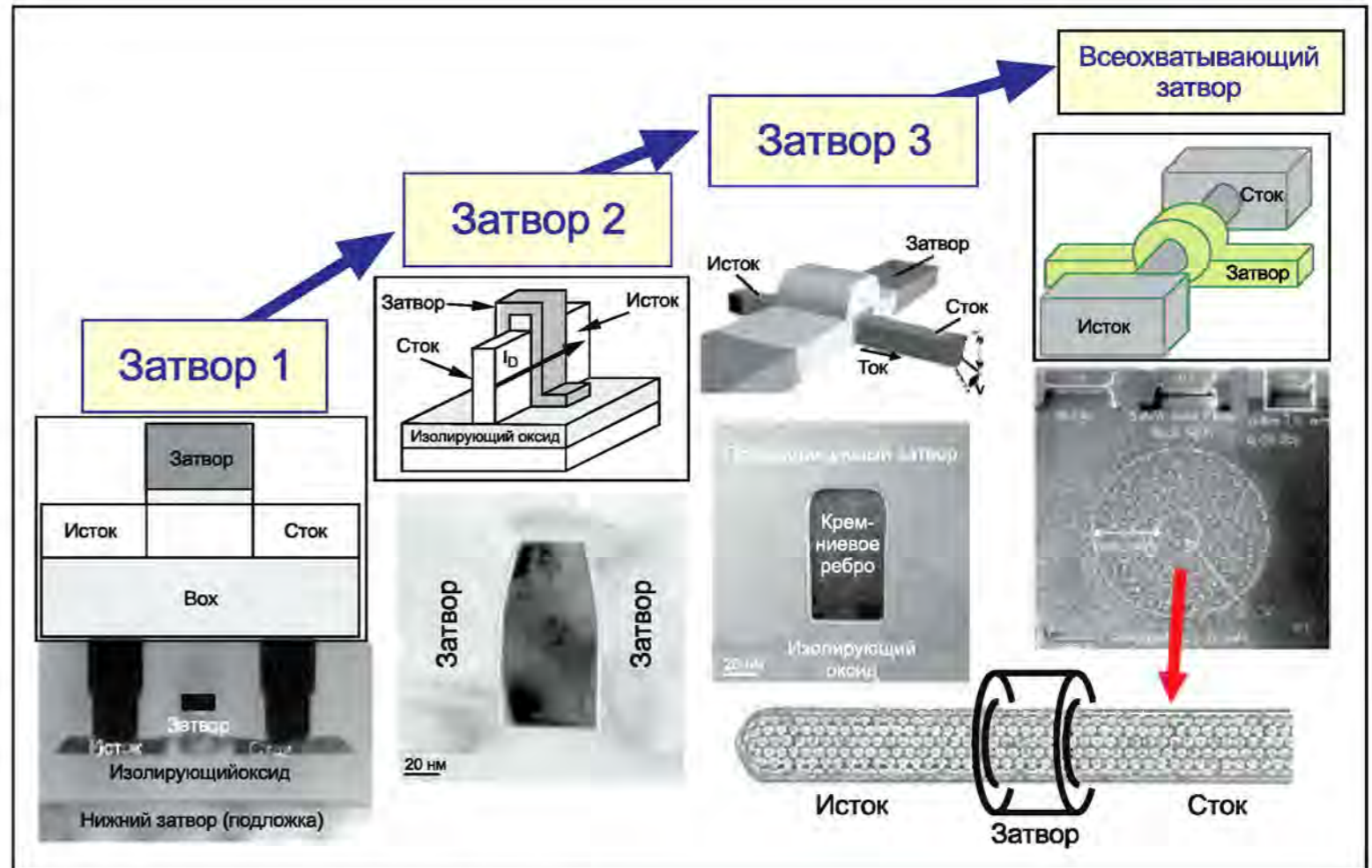


Рис. 7. Эволюция конструкции по пути Multigate Structures

(GAA) — продолжение поиска путей расширения возможностей CMOS FinFET.

На момент выхода статьи наиболее глубоко здесь проработана технология получения очередного поколения FinFET в виде Gate-all-around Nanowires, где еще в 2017 году в IMEC были изготовлены пилотные образцы FinFET-транзисторов с проектной нормой 7 нм, в конструкции которых впервые использованы нанотрубки (Nanowires). Разработчики этого перспективного «загоризонтного» направления в свою очередь разделились на несколько групп. Основная часть исследователей трудится над созданием промышленно пригодной технологии изготовления «горизонтальной» структуры транзистора (Lateral Gate-all-around FET) с затвором 5 нм и с количеством используемых в конструкции пяти и более нанотрубок. Вторая группа исследователей занимается вертикальной структурой FinFET (Verticalgate-all-around FinFET (SiNW) [22].

Технологические проблемы современной микроэлектроники

Сегодня основными проблемными моментами, сдерживающими развитие новых приборов, в частности мощных GaN-приборов (как для силовой, так и для оптоэлектроники), являются вопросы обеспечения адекватного теплоотвода от активной области кристалла и необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на чужеродных (отличающихся по параметрам кристаллической решетки, тепловому расширению и т.д.) подложках [5]. Пока наиболее распространенным и коммерчески выгодным для массового производства вариантом остается использование подложек из лейкосапфира, обеспечивающих приемлемое качество гетероструктур при

относительно невысокой стоимости изготовления. Однако, несмотря на применение специальных процедур на начальных стадиях роста, многослойные гетерокомпозиции AlInN на сапфире имеют довольно высокую плотность прорастающих дислокаций. Кроме того, сапфир обладает низкой теплопроводностью, а температура активной области транзисторов, как отмечалось в [5], может достигать +300 °C и выше. Использование flip-chip-технологии переноса кристалла на теплопроводящий носитель позволяет добиться трехкратного снижения теплового сопротивления для обеспечения должного теплоотвода, однако и в этом случае оно более чем втрое превышает аналогичный показатель для случая использования подложек SiC.

Очевидной альтернативой карбиду кремния сегодня являются пластины кремния, которые значительно дешевле и имеют больший диаметр (8 и 12 дюймов). Гетероэпитаксиальные структуры, выращенные на кремниевых подложках, обладают более высокой теплопроводностью по сравнению со структурами, выращенными на сапфире, а производственный процесс изготовления приборов становится совместимым со стандартной кремниевой КМОП-технологией.

Поэтому GaN-приборы на кремниевой подложке большего размера с КМОП-совместимыми процессами являются возможным ключом решения проблемы организации серийного производства большого объема GaN-приборов при обеспечении их низкой стоимости.

Говоря о проблемных вопросах, следует отметить и то, что при разработке гетероэпитаксиального процесса GaN на Si необходимо также решать множество сложных задач, связанных с рассогласованием численных значений величин постоянных решеток и коэффициентов теплового расширения подложки

и эпислоев [5]. Для решения этой проблемы на поверхности кремниевой пластины создают различные специальные буферные слои, технология нанесения которых в настоящее время является ноу-хау и не публикуется в открытой печати.

Сегодня наиболее интенсивно разработкой технологии GaN-on-Si занимаются фирмы «большой пятерки»: IBM, IMEC, EpiGaN, M/A COM (Nitronex), Infineon. В разработанной этими фирмами технологии вышеупомянутые буферные слои представляют собой многослойную структуру из сложных полупроводников, например, такую как Si-AlN — ступенчатообразный слой AlGaN-GaN-AlGaN, — создание которой связано с немалыми сложностями и требует солидных временных и материальных затрат. Поэтому большой интерес к использованию в качестве барьерных слоев исследователи проявляют к тонким эпитаксиальным слоям карбида кремния (SiC), выращенным на поверхности Si-подложки. Сейчас специалисты работают и над созданием гибридных наноструктур из действительно двухмерных металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов, используя графен как полуметалл, полупроводниковые кристаллы, в частности дисульфид молибдена (MoS₂) или дисульфид вольфрама (WS₂) и диэлектрический нитрид бора (BN), который получают методом ALD. Эти двумерные материалы являются наиболее тонкими из всех известных материалов с электронными свойствами, перспективными для широких приложений в нанотехнологии. Имея толщину лишь в один слой, они представляют предельный лимит масштабирования в вертикальном направлении, что определяет и минимальную величину рассеиваемой мощности в связи с минимальными эффектами короткого канала. Исследования путей применения 2D-наноструктур развиваются в следующих основных направлениях:

- широкополосная высокоскоростная оптоэлектроника, вплоть до ТГц-диапазона, включая фотодетектирование, модуляцию и лазерную генерацию света;
- создание высокоэффективных межсоединений и теплоотводящих элементов в интегральных микросхемах благодаря их исключительно высокой электро- и теплопроводности;
- создание мультифункциональных сенсоров исключительно высокой чувствительности к окружающей среде и различным ионизирующим излучениям.

Тенденции развития космической микроэлектроники

Поскольку космические технологии широко вошли в повседневную жизнь общества, которое все сильнее зависит от эффектив-

ности работы космических систем военного и коммерческого назначения, в настоящее время основные усилия ученых и конструкторов направлены на увеличение сроков активного существования космических аппаратов (КА) в течение 10–15 и более лет.

Увеличение сроков эксплуатации КА в первую очередь зависит от разработки эффективных методов защиты микроэлектронной элементной базы бортовых устройств от деструктивного воздействия полей ионизирующих излучений космического пространства и различных видов электромагнитного излучения (ЭМИ) — статические, импульсные, квазистатические поля. Сложность решения этой задачи усугубляется еще и появлением новых радиационных эффектов, обусловленных переходом к субмикронным проектным нормам [7].

В области повышения радиационной стойкости микросхем основные усилия исследователей сконцентрированы на двух основных направлениях: повышение устойчивости к суммарной накопленной дозе радиации и к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов с энергией выше 1 МэВ, вызывающих одиночные сбои (обратимые Soft Errors и необратимые Single Event Upset, SEU) [7, 23].

Однако основной акцент исследований здесь смещается от полупроводниковых структур к конструкции корпуса микросхемы: разработан целый ряд радиационно стойких конструкций корпусов, корпусов со специальными встроенными экранами электромагнитной защиты, а также комбинированные конструкции корпусов с защитой как от радиации, так и от ЭМИ [5, 23].

В качестве самостоятельного направления исследований следует выделить методы защиты от так называемого эффекта сверхглубокого проникновения, обусловленного воздействием высокоскоростных и высокоэнергетических микрочастиц космической пыли (частицы размерами 1–5 мкм и скоростью 10–30 тыс. км/с) [8, 23].

Интегральная фотоника — новый этап в развитии микроэлектроники

Современная фотоника представляет собой совокупность наук, технологий, компонентов и систем, объединяющих квантовые явления использования света в различных сферах применения, включая генерацию, детектирование (обнаружение), передачу и управление световым потоком. Составными частями фотоники являются оптоэлектроника, лазерная физика, иконика, голография, тепловидение, плазмоника и другие. В свою очередь фотоника обеспечила развитие и принципиально новых направлений современной науки и технологии, таких как биофотоника, информационная и компьютерная фотоника, нанофотоника,

фемтосекундная фотоника, терагерцевая и радиофотоника. Замена передачи сигналов электронами на передачу при помощи световых квантов — фотонов — теоретически позволяет создавать суперкомпьютеры, превосходящие по быстродействию самые мощные современные компьютеры в сотни раз при размерах в тысячи раз меньше, передавать с высокой скоростью огромные объемы информации (50–100 Гбит/с) на сотни и даже тысячи километров без потерь.

Сегодня фотоника включена в приоритетные направления развития науки и техники большинства развитых в экономическом отношении государств, включая страны Европейского союза, США, Великобританию, Китай, Японию и Южную Корею. В Европейском союзе в 2005 году была сформирована первая технологическая платформа «Фотоника-21» (Photonics 21), объединяющая более 2500 компаний и исследовательских организаций, а в 2009-м фотоника вошла в состав ключевых обеспечивающих технологий в странах ЕС, выбранных Европейской комиссией. В США реализуется Национальная инициатива в области фотоники (National Photonics Initiative). В 2014 году Комитет по науке Национального совета по науке и технологиям США определил семь ключевых научных направлений развития фотоники и их ожидаемый вклад в развитие национальных приоритетов, таких как исследования мозга, передовое высокотехнологичное производство, высокоскоростная обработка и передача больших массивов данных и ряд других направлений, а также состав мер поддержки и индикаторы оценки успеха их реализации. Ежегодное суммарное финансирование проектов в области исследований и развития фотоники в мире составляет \$18 млрд.

При этом темпы роста капитальных вложений в компоненты фотоники почти в два раза превышали среднеотраслевые показатели. А уже в 2012 году мировой рынок только материалов и компонентов фотоники достиг \$20 млрд с показателем роста 10,6% в год, в 2015-м он достиг \$30 млрд, а в 2018-м приблизился к \$40 млрд. Наиболее динамично развивающимися областями фотоники являются лазеры, светодиоды и различные устройства на их основе. Так, мировой рынок лазеров (без учета устройств и систем) в 2014 году составил около \$10 млрд и к 2020-му прогнозируется его увеличение до \$18,5 млрд при средних темпах прироста на уровне 10,5%.

Кремниевая фотоника, в свою очередь, является базой для развития исключительно важной области — радиофотоники [10, 21]. В сложных радиофотонных устройствах и системах, где может потребоваться использование до десятков тысяч модуляторов, лазеров и фотодетекторов, перспективным решением становится интеграция всех компонентов в микрочиповом исполнении. В западных

странах в последние 10 лет активно развиваются технологии интегральной фотоники, позволяющие интегрировать на одной подложке до 1000 компонентов. Уже сегодня фотонные интегральные технологии объединяют пассивные (устройства ввода/вывода оптического излучения, волноводы, разветвители и объединители, мультиплексоры/демультиплексоры, фильтры, линии задержки и т. д.) и активные (лазеры, фотодетекторы, модуляторы, усилители, фазовращатели, переключатели и т. д.) компоненты на единой подложке.

При внедрении интегральной радиофотоники значительно уменьшаются массогабаритные показатели, энергопотребление, появляется возможность интеграции с микроэлектронной технологией, а в перспективе и разработка полностью интегральных радиотехнических устройств и систем нового поколения. Отметим, что GaN/2D/Si-технология позволит на одной кремниевой пластине выполнить практически все элементы радиофотонной схемы.

Так, на основе высококачественного GaN, выращенного на Si, создан ряд источников света (лазер), хотя параллельно проводятся и исследования по созданию кремниевого лазера. В мире имеется большое количество разработок высокоэффективных Si/графен электрооптических преобразователей (модуляторов). Наиболее прогрессивным считается оптико-электрический преобразователь на основе Si/графен-, Si/Ge/графен-фотодетекторов [21].

Основы квантовой микроэлектроники

На смену классическим электронным приборам, для которых применимо классическое описание физики работы, приходит элементная база квантовой микроэлектроники, где используется уже квантовомеханический подход. Квантово-размерные микроструктуры эксперты сегодня начинают рассматривать как основу информационных систем нового поколения, они могут применяться, например, для создания магниточувствительных детекторов, на их основе в оптоэлектронике уже создаются сверхмалые лазерные источники.

Как известно, современная субмикронная технология позволяет создавать физические объекты, в которых движение электронов локализовано «в плоскости». Такая ситуация наблюдается в полупроводниковых гетероструктурах, на переходе металл-диэлектрик. При приложении достаточно высокого напряжения перпендикулярно слоям гетероструктуры электроны выходят на поверхность и ведут себя уже как двумерный «электронный газ». Если приложенный потенциал ограничивает электроны в одном направлении в плоскости, то электроны могут свободно двигаться только в другом оставшемся направлении — это и есть одномерный газ (квантовые про-

волоки). Если же ограничивается движение электронов в обоих направлениях, мы получаем физический объект, который называют квантовой точкой.

Образно говоря, квантовые точки (КТ) — это гигантские «искусственные атомы» с контролируруемыми параметрами. Современные технологии уже позволяют получать и отдельные КТ, и массивы КТ с контролируемыми параметрами, такими как расположение, область локализации, число носителей заряда, крутизна удерживающего потенциала. Если мы сравним КТ и «обычные» атомы, то КТ перспективны из-за возможности управлять их свойствами с помощью магнитного поля. Для того чтобы существенно изменить свойства обычных атомов, требуются поля как в нейтронных звездах, а для квантовых точек — хотя и высокие, но вполне доступные в земных лабораториях.

Системы же КТ могут рассматриваться и как искусственные гигантские молекулы с контролируемо изменяемыми параметрами. Уже в лабораторных условиях получены периодические и аperiodические массивы КТ — искусственные кристаллы и квазикристаллы.

В настоящее время наибольший интерес вызывают гетеронаноструктуры с квантовыми точками на основе арсенида галлия (GaAs) или его твердых растворов разного состава. Основное практическое применение квантово-размерных структур этого типа рассматривается в разработках светоизлучающих приборов, прежде всего лазеров для волоконно-оптических линий связи, а также в квантовых компьютерах [21].

Литература

1. Соколов А. В., Карасев О. И. Форсайт и технологические дорожные карты для нанотехнологий // Научно-техническая политика. Российские технологии. 2009. Т. 4. № 3–4.
2. Шашнов С. Методы форсайт-исследований для оценки перспектив развития гражданского общества и третьего сектора. www.grans.hse.ru/data/2016/09/06/1120025063/Методы%20форсайт-исследований.pdf
3. WSTS Semiconductor for Market Forecast Autumn 2018. November 27, 2018. www.wsts.org
4. Макушин М. Волна сделок слияния/поглощения в микроэлектронике: причины и последствия // Электроника: НТБ. 2018. № 1.
5. Belous A., Saladukha V. High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience. Springer, 2019.
6. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. Space Microelectronics. Vol. 2: Integrated Circuit Design for Space Applications. London, Artech House, 2017.
7. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. Space Microelectronics. Vol. 1: Modern Spacecraft Classification, Failure, and Electrical Component Requirements. London, Artech House, 2017.
8. Меликян В. Дальнейшее масштабирование интегральных схем: вызовы и решения. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2018). Зеленоград, 2 октября 2018.
9. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011.
10. Lu J.-C., Holton W. C., Fenner J. S., Williams S. C. et al. A new device design methodology for manufacturability // IEEE Trans. Electron Devices. 45. No. 3.
11. Cunningham S. P., Spanos C. J. Semiconductor yield improvement: results and best practices // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, 1995. Vol. 8. No. 2.
12. Downs T., Cook A. S., Rogers P. G. A partitioning approach to yield estimation for large circuits and systems // IEEE Trans. Circuits Syst. 1984. Vol. 31. No. 5.
13. Gaston G. J., Walton A. J. The integration of simulation and response surface methodology for the optimization of IC processes // IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing. 1994. Vol. 7. No. 1.
14. Sighal K., Pinel J. F. Statistical design centering and tolerancing using parametric sampling // IEEE Trans. Circuits Syst., 1981, Vol. 13, No. 7.
15. Kouleshoff A. A., Nelayev V. V. New approach for the response surface methodology // Proc. 4th Int. Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering. Russia, St.-Petersburg, 2000.
16. Koskinen T., Cheung P. Y. K. Hierarchical Tolerance Analysis Using Statistical Behavioral Models // IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1996. Vol. 15. Iss. 5.
17. Benkoski J., Stroiwas A. J. A new approach to hierarchical and statistical timing simulation // IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1987. Vol. CAD-6. No. 6.
18. Kurker C. M., Paulos J. J., Gyurcsik R. S., Lu J.-C. Hierarchical yield estimation of large analog integrated circuits // IEEE J. Solid-State Circuits. 1993. Vol. 28. No. 3.
19. Кулешов А. А., Малышев В. С., Нелаев В. В., Стемпицкий В. П. Статистическое проектирование и оптимизация технологии производства интегральных микросхем // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 31.
20. Belous A., Nelayev V., Syakerski V. End-to-end statistical process/device/circuit/system design. 34th Euromicro Conference on Software Engineering Advanced Applications, SEEA and 11th Euro-micro Conference on Digital System Design — architectures, methods and tools, DSD, September 2008.
21. Белоус А., Солодуха В., Шведов С. Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств. Краткий курс «белой магии». М.: Техносфера, 2017.
22. Tomioka K., Yoshimura M., Fukui T. A III–V nanowire channel on silicon for high-performance vertical transistors // Nature. 2012. Aug. 9.
23. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. High Velocity Microparticles in Space. Switzerland, Springer, 2019.