

У волны растут мозги, глаза и руки

Микроэлектронная революция будет продолжаться еще долгие годы

• [Александр Механик](#)

Ведущие мировые разработчики микроэлектроники предсказывают, что микроэлектронная революция будет продолжаться еще долгие годы. У России есть шанс занять в этом движении достойное место



Рисунок: Константин Батынков

Международная ассоциация полупроводниковой промышленности издала очередной прогноз развития отрасли «International Technology Roadmap for Semiconductors». В нем названы главные технологические проблемы микроэлектроники, которые надо решить, чтобы обеспечить ее дальнейшее революционное развитие.

Во-первых, речь идет о технических приемах, позволяющих продолжить миниатюризацию электронных элементов: создание новых видов фотолитографии, переход от планарной технологии изготовления чипов к объемной, применение новых материалов. Во-вторых, о расширении применения микроэлектронных технологий, например при создании микроэлектромеханических устройств (МЭМС). Все это может привести к тому, что не только закон Мура (о котором речь пойдет ниже) останется в силе еще на длительный срок, но и новый долгосрочный технологический драйвер экономики опять, как и полвека назад, будет связан с ИКТ.

В своей на шумевшей книге «Технологические революции и финансовый капитал» известный экономист **Карлота Перес** показывает, что с конца XVIII века человечество пережило пять технологических революций, каждая из которых порождала технологическую волну, сопровождавшуюся распространением достижений технологических революций в виде новой техники и технологий. Длительность каждой из волн составляла примерно пятьдесят лет. И этот срок был не случайным. Он определялся особенностями функционирования связки финансового капитала и инновационных возможностей новой технологии. Исчерпание технологической волны лишает экономику драйверов развития и ведет к кризису, из которого экономика выходит благодаря следующей волне. Последняя технологическая революция, по мнению Перес, была связана с изобретением в 1961 году микросхемы, на основе которой были созданы современное

телевидение, мобильная связь, персональные компьютеры, интернет. Если следовать логике Переса, то технологическая волна, связанная с этим изобретением, находится в стадии истощения, и человечество должно ожидать новой революции, а пока его будут мучить кризисы.

С такой точкой зрения не согласен **Алан Астье**, вице-президент по производству STMicroelectronics — одной из крупнейших в мире компаний, занимающихся разработкой, изготовлением и продажей различных микроэлектронных компонентов, который, как и авторы прогноза, не видит признаков угасания микроэлектронной революции: «В настоящее время 90 процентов инноваций основано на микроэлектронных решениях, и эта тенденция нарастает. Мы не предвидим какого-либо изменения в этом направлении в ближайшей и среднесрочной перспективе. Все крупные страны — развитые или развивающиеся — напротив, стремятся уделять больше внимания и оказывать больше поддержки полупроводниковой отрасли, так как рассматривают ее в качестве основного двигателя инноваций и социального прогресса». Попробуем разобраться, кто точнее предсказывает будущее.

Больше Мура

В 1965 году один из создателей корпорации Intel **Гордон Мур** высказал предположение, которое впоследствии назвали законом Мура: число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые полтора-два года, а их размеры — с той же скоростью уменьшаться. И если в 1971 году проектные нормы производства микросхем, выполняемых как системы на кристалле*, были 10 мкм, то сейчас речь идет о размерах меньше 20 и даже 10 нм. Однако с каждым годом, особенно в последнее время, шаги в сторону миниатюризации электронных схем становились все труднее. И, естественно, возникает вопрос о направлениях и пределах этого развития.

Еще недавно считалось, что совокупность технических проблем, стоящих перед микроэлектроникой, не позволит достичь проектных норм меньше 10 нм. Потом этот предел отодвинули до 6 нм. Недавно вице-президент Samsung, возглавляющий там научные исследования, высказал мнение, что достижимы и 2 нм.

Руководитель бизнес-направления «Ситроникс Микроэлектроника», генеральный конструктор ОАО «НИИМЭ и Микрон», академик РАН **Геннадий Красников** с этим согласен: «Но реализация этих проектных норм требует новой технологии. Не традиционной планарной КМОП, то есть плоскостной технологии, а так называемой FinFET технологии». Полевой транзистор FinFET (известный еще как 3D-транзистор, или транзистор с трехмерной структурой затвора) имеет объемную, трехмерную структуру расположения элементов, благодаря которой удалось уменьшить его размеры, токи утечки и время задержки и увеличить плотность размещения элементов. Согласно оценкам компании Intel, производительность 22 нм FinFET-транзисторов на 37% выше производительности планарных 32-нанометровых структур. При этом их энергопотребление на 50% меньше. Специалисты считают, что FinFET-технология, которую Intel собирается представить в этом году в рамках нового техпроцесса с нормами 22 нм, скорее всего, определит развитие всей микроэлектроники на ближайшие пять-десять лет.

Генеральный директор компании НТ-МДТ **Виктор Быков**, совмещающий бизнес с должностью заместителя директора по науке ФГУП Институт физических проблем им. Ф. В. Лукина, так описывает перспективы развития микроэлектроники, опирающейся на новые технологии, в ближайшие годы: «Если в этом году объявлено о начале промышленного

производства микросхем на 22 нанометра, то через два года следует ожидать 14 нанометров, а в 2015 году — 10 нанометров». Быков вспоминает, что он начинал свою работу в институте в 1970-е годы в отделе молекулярной электроники. Прошло сорок лет, и мы становимся свидетелями реального перехода мировой электроники на молекулярный уровень. А президент и главный исполнительный директор компании Intel **Пол Оттелини** объявил на недавней встрече с инвесторами, что компания планирует после 2015 года перейти к производству микросхем на 7 и 5 нм. Так что пока нарушение муровской закономерности нам не грозит.

Шире Мура

В прогнозе «International Technology Roadmap for Semiconductors» отмечается, что развитие микроэлектроники не ограничивается дальнейшей миниатюризацией систем на кристалле в соответствии с законом Мура, которое в прогнозе получило название «More Moore» («Больше Мура»). Специалисты называют еще несколько направлений развития микроэлектроники, которые в прогнозе названы «More than Moore» («Больше чем Мур»). Одни из них тоже направлены на миниатюризацию, но иными методами, другие расширяют возможности чипов, третьи используют новые технологии изготовления чипов.

В отличие от систем на кристалле эти направления физически реализуются как системы в корпусе, то есть комбинация нескольких активных электронных компонентов различной функциональности, например пассивные элементы, оптические компоненты, МЭМС, собранные в едином корпусе. В результате конструкция становится меньше, легче, надежнее и дешевле. Другим вариантом нового конструктивного исполнения электронных устройств является 3D-интеграция, то есть расположение кристаллов друг над другом с созданием вертикальных соединений между ними. Еще один вариант конструкции — встраивание активных и пассивных компонентов в печатные платы, которое позволяет отказаться от разварки выводов компонентов.

Микроэлектромеханические системы, МЭМС, — технологии и устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты, которые изготавливают на кремниевой подложке с помощью технологий, аналогичных технологии изготовления однокристалльных интегральных микросхем. Типичные размеры микромеханических элементов лежат в диапазоне от 1 до 100 микрометров. Но и здесь наблюдается стремление к дальнейшей миниатюризации. В настоящее время МЭМС-технологии уже применяются для изготовления различных миниатюрных датчиков, таких как акселерометры, датчики угловых скоростей, гироскопы, магнитометрические датчики, барометрические датчики, анализаторы среды (например, для оперативного анализа крови). Как выразился один из специалистов, если микросхемы — мозг электронных систем, то МЭМС — их глаза и руки.

А Виктор Быков обратил особое внимание на возможности адаптивных элементов, мемристоров, электрическая проводимость которых зависит от полярности приложенного напряжения и от заряда, который протекал через структуру ранее. На них можно строить так называемые нейронные вычислительные системы, которые отличаются способностью к обучению и адаптации.

В нейронных сетях человека и высших животных ключевую роль в обучении и последующей работе обученной сети играют синапсы — точки контакта между проводящими волокнами отдельных клеток. Синапс обеспечивает передачу сигнала от одной клетки к следующей, причем он может облегчать или затруднять проведение сигнала в зависимости от того, как часто сигнал проходил через данное соединение в ходе обучения.

Мемристоры, по мнению Быкова, способны стать синапсами вычислительных систем, построенных на принципах нейронных сетей, способных к обучению.

Сочетание достижений в разных областях микроэлектроники позволяет, по мнению Геннадия Красникова, считать, что новым драйвером экономического роста становятся персональные роботы, или, шире, интеллектуальные системы, создание которых обеспечивается новыми достижениями микроэлектроники. Это системы распознавания речи, образа, системы тактильного распознавания, более того, это системы, создающие вокруг человека искусственную окружающую среду. На их основе уже сейчас появляются и новые бытовые приборы, которые могут, например, в домашних условиях диагностировать болезни, помогать по дому, служить секретарями, сиделками, экспертами, советчиками, способными общаться с человеком и давать ему советы в быту и на работе, и новые системы анализа, управления и контроля, способные решать сложнейшие технические, научные и оборонные задачи.

Политэкономия микроэлектроники

Явный признак оживления ситуации: на этот раз и американские, и европейские разработчики не склонны передавать свои разработки, как это часто происходило ранее, в Китай или другие страны. На конференции SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) в Брюсселе в мае этого года крупнейшая европейская компания по разработке и производству микроэлектроники IMEC призвала европейцев вернуть в Европу микроэлектронику, обратившись к европейским разработчикам и производителям микроэлектроники с призывами «вернуть лидерство», «планировать надолго», «мыслить глобально».

Как пояснил генеральный директор ЗАО «Синтез-Микроэлектроника» **Дмитрий Боднарь**: «Уменьшение топологических размеров элементов микросхем приводит с каждым своим шагом к удельному уменьшению цены одного транзистора в разы. За счет увеличения количества транзисторов в одной микросхеме соответственно увеличивается количество функций, которые она может выполнять, и уменьшается удельная цена одной функции». Именно экономика наряду с ростом функциональных возможностей является двигателем процесса миниатюризации.

Кроме того, стремление к дальнейшей миниатюризации — 20 нм и меньше — связано с тем, что с увеличением количества транзисторов повышаются универсализм и производительность чипов. Не надо будет производить, например, 30 типов специализированных чипов, а можно производить один, использование вычислительных мощностей которого будет не оптимальным, но он будет намного меньше и дешевле. С условием, конечно, что он будет производиться десятками или сотнями миллионов штук.



МЭМС механизм фокусировки цифровой камеры
Фото: mems.sanda.gov

Но если удельная стоимость транзистора и функций, выполняемых микросхемами, падает, то стоимость самих микросхем и процессов их проектирования и изготовления возрастает многократно. На недавней конференции Common Platform, альянса крупнейших разработчиков и производителей микроэлектроники IBM, Global Foundries, Samsung, ST и др., отмечалось, что из-за роста затрат на производство и разработку чипов компаний, которые могут себе позволить изготовление чипов с применением новейших технологий, становится все меньше. Так, затраты на строительство фабрики для производства чипов по технологии 22 нм возросло вчетверо по сравнению с фабрикой на 130 нм — с 1,5 млрд долларов до более 6 млрд. Разработка соответствующей технологии подорожала с 250 млн до 1,3 млрд. А стоимость разработки отдельного чипа выросла с 15 до 150 млн.

В результате число компаний, способных самостоятельно заниматься разработкой технологий, оборудования и чипов на самом современном уровне, тоже падает в разы. Как заметил генеральный директор и председатель правления компании «Т-платформы» Всеволод Опанасенко, получается такая воронка: если компаний, которые могут работать на 90 нм, несколько десятков, на 45 — в районе десятка, то на 22 нм — единицы.

Вот почему, объясняет Геннадий Красников, разработка микроэлектронных технологий и оборудования проводится в настоящее время в рамках альянсов, одним из примеров которого как раз является Common Platform. Самостоятельные работы в мире сейчас ведет фактически только научно-исследовательский центр Intel. Всего в области оборудования и инфраструктуры в этих альянсах участвует порядка 35 компаний. «И мы сегодня тоже входим в один из таких альянсов. Существуют разные формы кооперирования. Можно стать акционером. Можно платить за участие отдельных специалистов, можно купить какие-то технологии и результаты определенных экспериментов. Это очень гибкая система», — говорит Геннадий Красников. Похоже, Россию в вопросе создания новой микроэлектронной техники пока рассматривают как часть Европы, и это дает нам шанс.

Место России и ее проблемы

Современная микроэлектроника функционирует как своеобразная матрица, в которой горизонтальными строками являются разработка и производство технологического оборудования, элементной базы, аппаратуры на ее основе, а вертикальными столбцами —

различные формы организации разработки и производства на каждом этапе (см. [«Как нам перезагрузить матрицу»](#), «Эксперт» № 31 за 2006 год).

И каждая страна, занимающаяся микроэлектроникой, стремится занять достойное место в этой матрице. Главный вопрос, который стоит перед российской микроэлектроникой, — какое место сможет занять Россия.

«Россия уже никогда не будет в микроэлектронике технологической державой такого уровня, как Штаты», — считает президент группы компаний ЭЛВИС **Ярослав Петричкович**. В том числе потому, что в современном высокотехнологическом мире американцы заложили огромное количество пороговых ограничителей, благодаря которым в любой момент любое ненужное Штатам развитие может быть перекрыто. Потому что Штаты держат под своим контролем большую часть технологий микроэлектроники и решают, кого к ним и в какой мере допустить. И как минимум в ближайшие десятилетия миру придется жить с этими глобальными ограничителями. Тот же Китай, по словам Петричковича, грубо говоря, придумка Америки для удешевления своей рабочей силы, ничего больше. И не только Китай.

«Но я не могу сказать, что я пессимистичен, — говорит Петричкович. — Оптимизм и пессимизм исходят из модели ожиданий. Если кто-то ожидает, что здесь будет фабрика на 20 нанометров и что мы догоним и перегоним Америку, то я очень пессимистичен. Но я оптимистичен, если речь идет о возможности для России занять серьезные ниши на рынке микроэлектроники».

С последним согласен заместитель директора Физико-технологического института РАН член-корреспондент РАН **Владимир Лукичев**: «В микроэлектронике существует два основных направления развития — малопотребляющие и быстродействующие микросхемы. Когда идет речь о том, что нам никогда не догнать передовую микроэлектронику, имеются в виду либо супербыстродействующие, либо супермалопотребляющие схемы. Но между ними есть огромная ниша для любых других приложений. Поэтому, может быть, и догонять никого не нужно, а нужно заниматься тем, что находится в этой нише».

«Нишевый, но очень большой рынок, — говорит Петричкович, — это рынок систем распознавания, о котором я вам уже рассказывал (см. [“Это будут русские глаза”](#), “Эксперт” № 45 за 2009 года) и который наша компания сейчас пытается занять. И у нас есть шанс. Мы прекрасно выдерживаем конкуренцию и с израильскими, и с немецкими компаниями. В принципе достаточно одного такого рынка для всей России, чтобы ее микроэлектроника могла долго и успешно жить. У нас есть хорошие результаты по космическим системам, которые не стыдно показывать и в Америке, и в Европе. А тот же “Микрон” рассматривается европейцами как фабрика, которая может работать для космоса».

Пример конкретной ниши, которую может освоить наш бизнес, привел Всеволод Опанасенко: это специализированные чипы, необходимые для производства уникального оборудования. Например, в суперкомпьютерах есть набор специфических микросхем, предназначенных для межпроцессорных связей, которые в обычной жизни не используются, но при этом производительность и скорость обмена этих суперкомпьютеров напрямую зависят в том числе и от них. Разработчиков и производителей таких чипов в мире меньше, чем пальцев на одной руке. Наличие таких чипов дает достаточно большое конкурентное преимущество. «Поэтому, — объясняет Опанасенко, — разработка таких чипов — неизбежный дальнейший шаг развития нашей компании». Необходима программа поддержки разработки подобных специализированных чипов различного назначения.

А Физико-технологический институт РАН предлагает построить завод по производству МЭМС-микросхем в Ярославле, где расположен его филиал, в котором производятся акселерометры и твердотельные гироскопы. Возможность создания производства МЭМС изучают и в «Микроне». Однако там считают, что предварительно надо проработать рыночные перспективы этого направления в России.

По мнению Быкова, наладив выпуск собственных МЭМС, Россия получает шанс произвести прорыв в многолучевой электронной литографии (она позволяет обойтись без фотошаблонов), разрешение которой составляет единицы нанометров. Благодаря технологии микроэлектромеханических систем появилась возможность существенно упростить системы управления электронными лучами и в целом упростить устройство литографических машин по сравнению с традиционной фотолитографией. Виктор Быков заметил, что это прекрасный пример того, как микроэлектроника позволяет создавать новые устройства, которые, в свою очередь, дают новый импульс развитию самой микроэлектроники.

Многие наши респонденты отметили, что возможная ниша для нашей микроэлектроники — номенклатура, которая может частично освободиться при переходе европейских и американских фабрик на новые технологии (скажем, с 90 и 65 нм они переходят на 30, 20, 14 нм). Это, например, микросхемы для автомобильной или медицинской промышленности, где нет необходимости в проектных нормах менее 90 нм. «Конечно, это непросто, — говорит директор по маркетингу “Ситроникс Микроэлектроники” **Карина Абагян**, — свою номенклатуру нам просто так никто не отдаст, здесь действуют более сложные схемы — лицензии, передача технологий под уплату роялти, вход на защищенные внутренние рынки, вход в капитал локальных компаний».

На конференции SEMI в Брюсселе в мае представители «Ситроникса» убеждали представителей электронной промышленности Европы в готовности России воспринять необходимые технологии и новую номенклатуру. И в качестве примера приводили два удачно выполненных проекта по трансферу технологий между «Микроном» и STMicroelectronics: 180 нм EEPROM + КМОП и 90 нм КМОП. Компании создали в Зеленограде экосистему микроэлектроники с участием более чем 50 компаний, часть которых локализовала там свои офисы, производство и исследовательские ресурсы.

По мнению Геннадия Красникова, «одна из проблем российской микроэлектроники состоит в том, что, когда распался СССР, в микроэлектронике, и не только в ней, разрушились старые и не установились новые кооперационные связи между фундаментальной и прикладной наукой и производством. А микроэлектроника развивается именно в кластерах. Скажем, в Европе это Гренобль, Дрезден. Мы в Зеленограде пытаемся восстановить кластер, который исторически здесь существовал. И уже сейчас вокруг нас возникло полсотни высокотехнологичных предприятий, которые работают с нами в кооперации и в области материалов, и в области оборудования, и в области дизайна, в области исследований, подготовки кадров, инфраструктуры».

Соглашаясь с проблемами, которые возникают в микроэлектронике из-за той роли, которую играют в ней США, Всеволод Опанасенко считает, что тем не менее место России в этой области не предопределено: «Нам необходим четкий последовательный план государственного развития микроэлектроники. К сожалению, в России такого плана нет. И чем позже такой план появится, тем дольше, дороже и сложнее будет ее развитие. Более того, в такой области электроники, как суперкомпьютинг, которым занята наша фирма, должна быть какая-то сила в государстве, которая это направление ведет. Иначе

суперкомпьютинга в России не будет никогда. Может быть, в автомобилестроении без этого можно обойтись, но в микроэлектронике это абсолютно необходимо».

На отсутствие в России государственной политики в области микроэлектроники указывал в интервью «Эксперту» (см. [«Лучше, чем в Китае»](#), «Эксперт» № 33 за 2011 год) **Хайнц Кундерт**, президент европейского отделения SEMI: «Первое, что нужно мировому микроэлектронному сообществу, — увидеть, что у России есть стратегия развития отрасли. Для развития микроэлектроники, в частности, необходимы привилегии, потому что промышленность не может в одиночку себя финансировать — это стоит слишком дорого, здесь необходима поддержка правительства. И только после того, как будет принята подобная стратегия, зарубежные страны проявят заинтересованность и придут на ваш рынок. А пока у вас в России нет такой стратегии и системы привилегий, вам никто не доверяет. Вот в чем главная проблема».

В итоге обсуждения проблем российской электроники практически все наши респонденты сошлись во мнении, что основой ее развития должны стать следующие далее пункты, о которых мы уже неоднократно писали.

1. Постановка конкретной цели для развития микроэлектроники, например, занятие лидирующих позиций на рынке роботов.
2. Развитие «фабрики» на основе «Микрона» в сторону уменьшения проектных норм и расширения набора технологий по принципу «More than Moore».
3. Формирование устойчивого внутреннего спроса на изделия электроники через локализацию производства электронных компонентов для большей части собираемой в России техники, чему может способствовать «сброс» номенклатуры европейскими фабриками.
4. Поддержка и развитие компаний, способных занять принципиально новые ниши на мировых рынках.
5. Развитие фундаментальной и прикладной науки, необходимой для разработки новых технологий и нового оборудования, чтобы не проспять очередной виток электронной НТР.

Наверное, нам стоит заимствовать у Европы призывы, о которых мы написали выше: «вернуть лидерство», «планировать надолго», «мыслить глобально».

Схема 1

Два направления развития микроэлектроники

Два направления развития микроэлектроники

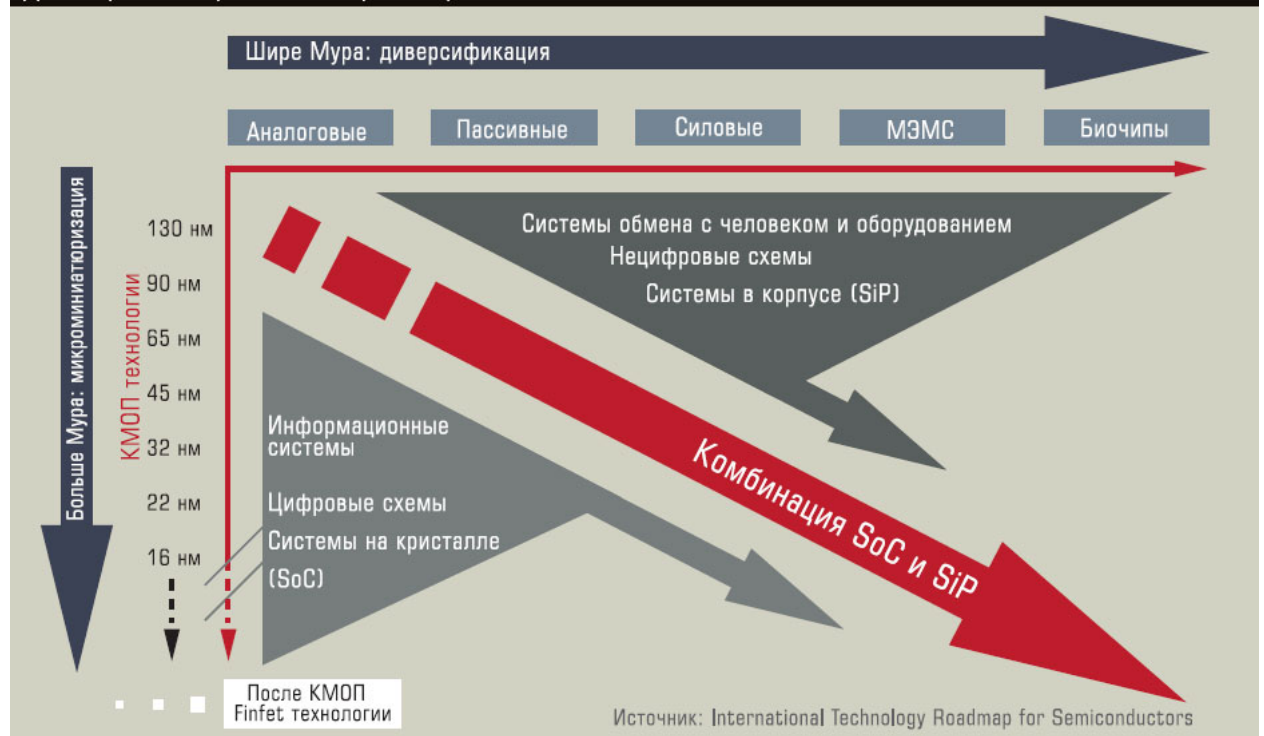
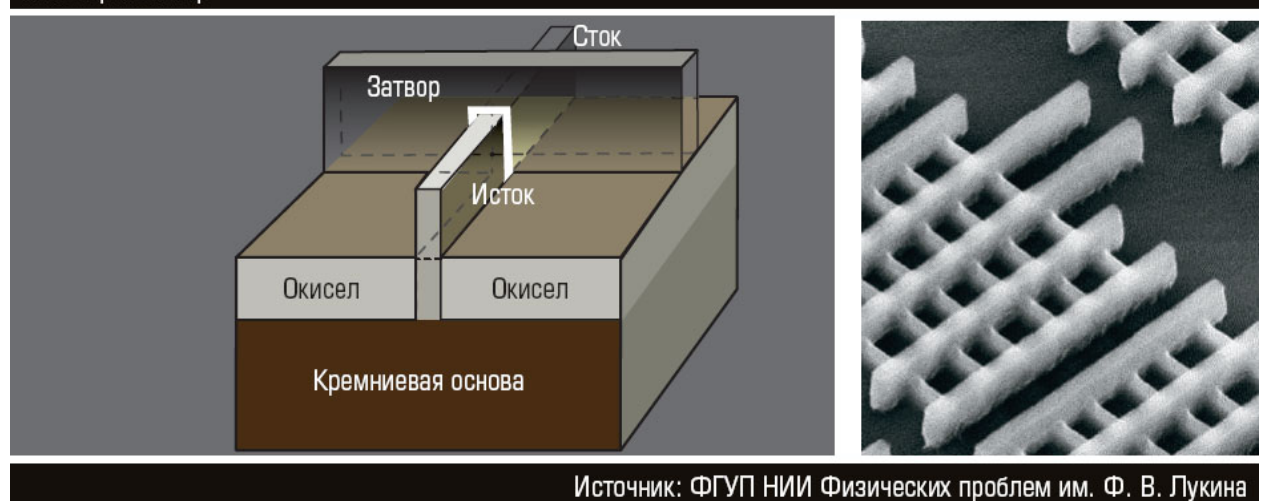


Схема 2

Finfet транзистор

Finfet транзистор



График

Мировой рынок производства полупроводников

