

О РОЖДЕНИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ВЕЛИЧАЙШАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

Ю. Носов, д.т.н. nosov-diod@yandex.ru
ОАО "НПП "Сапфир"

История рождения микроэлектроники, увлекательная сама по себе, вызывает сегодня особенно пристальное внимание в связи с обострившейся общеполитической ситуацией в мире, стремлением западных держав посредством санкций изолировать нашу страну от мирового прогресса электроники. Характерно, что во времена "холодной войны" нам приходилось решать многие из тех проблем, которые возникают сегодня.

В 2000 году Нобелевскую премию по физике получил американец Джек Килби "за участие в изобретении интегральной схемы". Речь шла о полупроводниковой монокристаллической интегральной схеме, именно она стала предметом его изобретения, а в последующие десятилетия – материальной сущностью и символом научно-технического направления, получившего наименование микроэлектроника.

К этому времени (2000 г.) микроэлектроника не только достигла фантастических успехов в определяющих характеристиках интегральных схем, но и распространила влияние своей технологии на принципиально новые, не чисто электронные, сферы. Появились оптоэлектроника, микромеханика, акустоэлектроника, дисплейная и ТВ-микроэлектроника, магнитоэлектроника, микросенсорика (микроэлектронные датчики), на подходе светодиодная микроэлектронная светотехника.

Обобщим: к 2000 году микроэлектроника достигла высочайшей эффективности по соответствию своему функциональному назначению, универсальности по решаемым задачам, глобальности по проникновению практически во все сферы техники и человеческой деятельности. При этом в отличие от других ярких новаций 20 века она вошла в жизнь буквально каждого человека. Микроэлектроника стала материальной основой зарождения информационно-телекоммуникационной (ИТ) технологии и соответственно этому – информационного

общества. Фактически микроэлектроника все определеннее становится основой перехода человечества к новой общественно-экономической формации.

Наш общий посыл: микроэлектроника по своему рождению – дитя США, никаких других стран и рядом не стояло. Но поскольку "микроэлектронные" сюжеты напрямую пересекались с сюжетами "холодной войны", без нашего участия – вроде бы косвенного – дело не обошлось. Обе стороны, США и СССР, постоянно спешили, первые – уйти в недосягаемый отрыв, вторые – не отстать.

ПРЕДЫСТОРИЯ

Миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) стала жизненно необходимой по мере ее усложнения и расширения областей применения. Еще во время Второй мировой войны радиоэлектроника заявила о себе как о существенной составляющей оружейного арсенала; в ряде случаев ее роль оказалась решающей, в первую очередь, следует назвать радиосвязь и радиолокацию.

С началом "холодной войны" (1948 г.) роль радиоэлектроники многократно возросла: к радиолокации добавились средства подавления радиолокаторов противника и создания радиопомех, счетно-решающие устройства головок управляемых зенитных снарядов и ракет, радиорелейная связь, приборы ночного видения, наконец, "большие" универсальные компьютеры (по нашему – электронные вычислительные машины, ЭВМ). Военные стратеги

сформулировали доктрину: "вооруженному противостоянию предшествует радиоэлектронная война, которая и предопределяет все последующее". За военными подтягивалась и "гражданка" – радиовещание, телевидение, автоматизация производства... Радиоэлектроника стремительно разрасталась вширь (массовость применения) и вглубь (функциональное усложнение). Все это ставило новые проблемы перед разработчиками и производителями РЭА, прежде всего проблему "тирании количества" – необходимость надежного соединения огромного количества "разношерстных" элементов в единое радиоэлектронное устройство. Именно создатели РЭА и крупных радиотехнических систем первыми осознали необходимость перехода от традиционной дискретной электроники к чему-то новому, и определяющие концепции этого нового формулировались так: интеграция дискретных элементов в однотипные модули, гарантирование их сверхвысокой надежности, разработка технологии, обеспечивающей низкую себестоимость и возможность массового производства модулей и автоматизацию их монтажа при изготовлении РЭА. Простейший анализ приводил к заключению, что ни одно из этих требований не может быть удовлетворено без миниатюризации элементов и модулей. Кроме того, было очевидно, что все требования взаимосвязаны, и решение проблемы должно быть комплексным.

Фактически в конце 1940-х – начале 1950-х годов потребители электронных приборов – создатели РЭА и радиоэлектронных систем – сформулировали "социальный заказ" на микроэлектронику. Они же стали и первыми исполнителями этого "заказа", точнее – технологические подразделения соответствующих предприятий. Разумеется проблему решали как могли, а могли – однозначно убого, технология (и технологи) были не в чести.

Появились два крупных конструкторско-технологических направления: модульное и пленочное. Модульное направление заключалось в создании небольших стандартизированных герметичных конструкций, внутри которых размещался функционально законченный узел, использующий 10–15 радиокомпонентов. Радиолампы, как активные элементы, для модулей почти не годились, направление обрело жизнь только после появления транзисторов. "Тирания количества" ослаблялась на один-два порядка, кроме того само конструирование и сборка аппаратуры упрощались, становились "игрой" в кубики. Из наиболее распространенных разновидностей модулей надолго задержались в технике микромодули. В них каждый конкретный

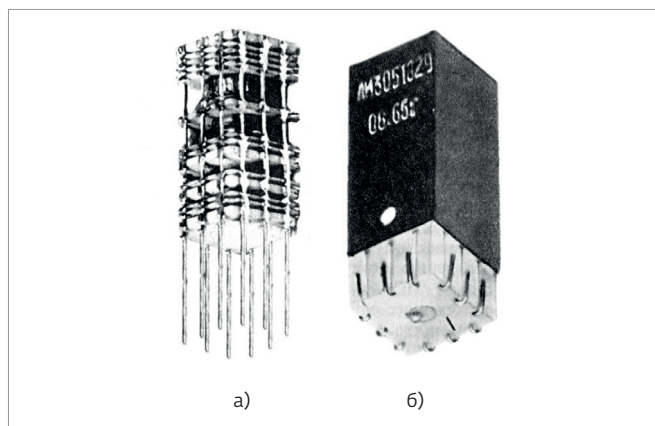


Рис.1. Этажерочный микромодуль: после сборки (а) и после герметизации пластмассой (б)

элемент предварительно монтируется на специальный керамический квадратик с металлизированными площадками по торцам, затем все элементы узла спаиваются в "этажерку" и герметизируются пластмассой (рис.1).

Пленочное исполнение концептуально продолжило технологию печатных плат, зародившуюся в США еще во время войны. Пленочная интегральная схема изготавливается на керамической или ситаловой подложке посредством последовательного нанесения пленок проводящих, резистивных и диэлектрических материалов и формирования рисунка, который создает резисторы, конденсаторы и межсоединения. Получили распространение толстопленочная технология (нанесение соответствующих паст продавливанием через металлические и шелковые сетки – метод шелкографии) и тонкопленочная технология (нанесение пленок в вакууме методами термического или катодного распыления). Толстопленочная технология нашла ограниченное применение в силовой и СВЧ-электронике.

Тонкопленочные интегральные схемы получили более масштабное применение, благодаря тому, что эта технология предоставляет разработчику широкий выбор материалов и позволяет использовать фотолитографию для получения рисунка с микронными размерами. Изготовление пленочных интегральных схем требует обязательного встраивания в них бескорпусных транзисторов и диодов. Их называли гибридными интегральными схемами (ГИС).

Модульное и пленочное направления создания РЭА, которые по сути относятся к предистории микроэлектроники, развивались в условиях исключительно сложной общеполитической ситуации в мире. В конце июня 1948 года в ответ



Рис.2. Родоначальники полупроводниковой электроники: Уильям Шокли, Джон Бардин, Уолтер Браттейн

на введение Западной Германией своей дойчмарки, что сулило крах экономике Восточной Германии, советские войска полностью блокировали Западный Берлин, это и стало началом "холодной войны". Развернулась ракетно-ядерная гонка. В этих условиях не все решалось оптимально, были неоправданно большие затраты на тупиковые направления, а, напротив, что-то очевидно перспективное откладывалось "на потом".

Тем не менее постепенно вырисовывались определяющие концепции будущей микроэлектроники. Стремление к модульности, миниатюризации, высокой надежности, низкой стоимости обосновало концепцию интеграции. Бурное развитие телефонии, ИКМ-связи, автоматики и особенно вычислительной техники привело к концепции цифровизации. Наконец, создание транзистора породило концепцию транзисторизации как материальной основы реализации двух предыдущих концепций.

ТРАНЗИСТОР

Наш первый тезис: история микроэлектроники начинается с транзистора. Изучением полупроводников занимались многие ученые, долгие десятилетия господствовал эмпиризм, и лишь после создания зонной теории полупроводников (25-летний англичанин А.Вильсон, 1931 г.), опиравшейся на новейшие представления квантовой механики, начала формироваться полупроводниковая наука в ее теперешнем понимании.

Во второй половине 1930-х годов в Bell Laboratories, мозговом центре Американской телеграфно-телефонной компании AT&T, была поставлена работа по созданию твердотельного аналога электромеханического реле в обеспечение безудержно растущих appetитов телефонии (через 10 лет цель была переформулирована: "глобальная связь", - масштабно

мыслили их менеджеры). При этом исходили из того, что "существуют большие возможности получения новых полезных свойств путем управления расположением и поведением атомов и электронов, из которых состоят твердые тела". Понятно, что руководителем работы виделся не изобретатель-самоучка типа Эдисона, а интеллектual из плеяды ученых новейшей генерации "американской мечты":

фундаментальные знания квантовой механики, нацеленность на технический результат, успешность в бизнес-реализации достигнутого. Таким был Уильям Шокли, и вскоре (29.12.1939 г.) в рабочем журнале 29-летнего честолюбца появился первый набросок полупроводникового прибора-усилителя электрических сигналов (это был прообраз будущего полевого транзистора). Но грянула война, поисковые исследования оборвались, сам Шокли стал консультантом Пентагона.

Война – двигатель технического прогресса: радиолокаторам нужны были кристаллические детекторы и в Bell Laboratories разработали технологию изготовления высокосовершенных монокристаллических образцов германия и кремния. Вся предвзятая эмпирика, основанная на таких невоспроизводимых полупроводниках, как закись меди и селен, и потому принципиально противоречивая, фактически – и с восторгом – была вычеркнута из истории, все пришлось переоткрывать заново на германии и кремнии.

Именно на кусочке германия сотрудниками Шокли У.Браттейном и Дж.Бардином (рис.2) был открыт и объяснен транзисторный эффект [1]. Его общественная презентация (30.06.1948 г.) убедила специалистов в фундаментальности открытия, однако практическая значимость заслужила весьма прохладной оценки: "новые приборы в ряде случаев могут заменить радиолампы". Дело в том, что транзисторный эффект был продемонстрирован в структуре, которую позднее назвали точечным транзистором: две тонкие иголочки, прижатые к поверхности германиевого кристалла на небольшом расстоянии друг от друга, образовали эмиттер и коллектор, а сам кристалл – базу (рис.3а). Понятно, что эта хлипкая конструкция не могла стать и не стала знаменем транзисторной революции, тем более микроэлектронной. Точечные транзисторы просуществовали

в технике и в промышленности не более 5-7 лет и безвозвратно сошли со сцены.

Отношение к транзисторам кардинально изменилось после того, как Шокли изобрел плоскостной транзистор (1948 г.), разработал его теорию как часть теории р-п-переходов в полупроводниках [2] и принял участие в создании первых экспериментальных образцов (рис.3б). Примечательно, что во время презентации транзистора руководству Bell Laboratories 23 декабря 1947 года Шокли ощутил, что он "чужой на этом празднике жизни" – в первооткрывателях не был, а натянутые отношения с ними обоими делали невозможным его включение в соавторы великого открытия. Он был близок к суициду, но это продолжалось лишь двое суток, после чего огромный взрыв его творческой активности ("энергия заблуждения") превратил рождество в его "страстную неделю", и в ночь на 1 января 1948 года он во сне увидел всю "сагу плоскостного транзистора", которую и реализовал в течение 1948-1951 годов.

Транзисторный эффект, открытый Браттейном и Бардином в точечном транзисторе, покорил мир лишь в плоскостном транзисторе Шокли. И сразу же стали реализовываться ожидаемые достоинства – миниатюрность, экономичность, эффективность, долговечность и др.; примерно с 1952 года началось триумфальное шествие транзистора по миру радиоэлектроники и по миру вообще. Высочайшее физическое совершенство транзистора получило всеобщее признание: в 1956 году Дж. Бардин, У. Браттейн и У. Шокли были увенчаны Нобелевской премией.

Напомним, что в транзисторном эффекте проявляется совместное действие обоих типов зарядов – электронов и дырок, поэтому и транзисторы, о которых мы здесь ведем речь, стали называть биполярными. Необходимость в этом уточнении возникла, когда все тем же Шокли были созданы [3] униполярные полевые транзисторы, в механизме действия которых задействован лишь один тип носителей заряда – либо дырки, либо электроны.

Возможность создания монолитных полупроводниковых интегральных схем стала осознаваться классиками полупроводников практически одновременно с изобретением плоскостного транзистора, даже раньше его фактического изготовления. Уже в 1950 году Шокли заявил о рождении транзисторной электроники [4] и анализировал модель тиристора, устройство которого есть не что иное, как два транзистора, интегрально слитые в объеме полупроводника, при этом возникало новое функциональное качество. Да и сам р-п-р-транзистор можно трактовать в некотором смысле, как интегральную

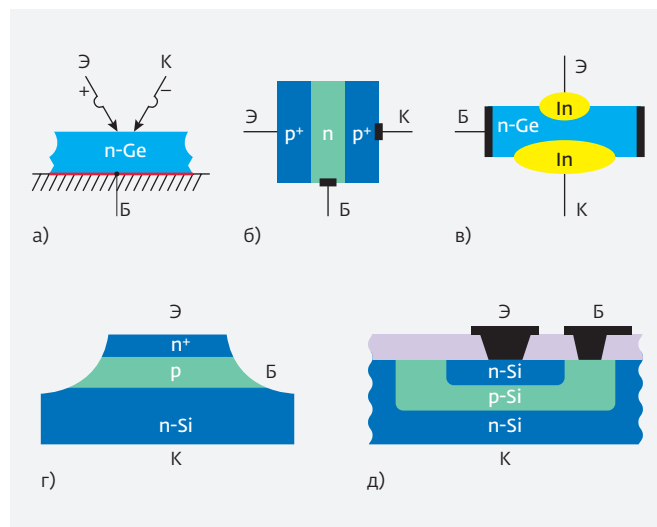


Рис.3. Структуры транзисторов: точечный транзистор (а), модель плоскостного транзистора (б), сплавной транзистор (в), диффузионный меза-транзистор (г), планарный транзистор (д)

структуру: процессы, происходящие в эмиттерном и коллекторном р-п-переходах, невозможны без области базы. Транзистор не предтеча микросхемы, он ее часть, он – ее Начало.

ТЕХНОЛОГИЯ

Между тем происходит стремительное совершенствование плоскостного германиевого транзистора. На несколько лет доминирующие позиции заняли сплавные структуры (рис.3в), даже на беглый взгляд не пригодные для микроэлектроники, но уже в 1956 году появляются диффузионные транзисторы. Здесь р-п-переходы создаются методом высокотемпературной диффузии примесей в кристалл, причем с одной стороны полупроводниковой пластины, что в сочетании с фотолитографией позволяет получать одновременно множество транзисторных структур (рис.3г); родилась групповая технология – естественный и единственный путь к достижению низкой себестоимости. Германиевые меза-транзисторы (выступы окрестили "мезами") уже неплохо смотрятся как элементы микросхем, но теперь наступает черед кремниевых транзисторов. Германиевые приборы не устраивают военных из-за низкой рабочей температуры (-70°C), яркая звезда этого полупроводника меркнет и практически угасает к началу 1960-х годов. Зато звезда кремния стремительно разгорается и тому, кроме высокой рабочей температуры кремниевых транзисторов (-125°C), есть другая, более веская причина – уникальность технологии его обработки.

Во второй половине 1950-х годов при разработке технологии кремниевых диффузионных транзисторов было обнаружено, что тончайшая пленка диоксида кремния, SiO_2 , выращенная на его поверхности при высокой температуре во влажной среде, сочетает три уникальных свойства: служит защитной маской при диффузии или ионной имплантации донорных и акцепторных примесей; пассивирует кремний и тем самым защищает зоны выхода p-n-переходов на поверхность кремния от внешних воздействий; а также является прекрасным изолятором, на поверхности которого могут создаваться тонкопленочные алюминиевые токоподводы к активным областям будущего транзистора. Разумеется, потребовались многолетние усилия многих физиков, химиков, аналитиков, чтобы все это стало воспроизводимой реальностью, и к 1958 году фирма Fairchild (о ее рождении далее) первой сумела замкнуть все эти достижения с традиционной фотолитографией в единый технологический цикл изготовления транзисторов (рис.2д). На всех этапах обработки пленка оксида неразрывна с кремнием, это естественное его продолжение, она имеет субмикронную толщину, так что поверхность кремниевой пластины фактически остается плоской. Отсюда и термин - планарная технология: все технологические воздействия осуществляются в одной плоскости, в плане; первым публикатором по новой технологии и ее формальным разработчиком стал Дж.Хёрни [5]. Планарная технология вобрала в себя все лучшее, что уже было создано, ее отличительными особенностями стали: групповая обработка кремниевых пластин; односторонность и плоскостность всех воздействий; отсюда пригодность для автоматизации последующих монтажных операций; высокое качество, идентичность, надежность изготовленных транзисторных структур.

Под каждый шаг планарного техпроцесса подведено выверенное научное обоснование чуть ли не до атомного уровня, управляемость и воспроизводимость планарного производства кажутся сказочными. Кроме всего, в нем заложены почти безграничные возможности уменьшения размеров транзисторов, для этого надо лишь менять фотошаблоны (принцип масштабирования).

Планарная технология - это наивысшее достижение инженерной мысли, ничего подобного ни в одной области техники нет. Для нашего рассмотрения особенно подчеркнем: планарная технология - это идеальный и пожалуй что единственный инструмент создания транзисторных структур и межсоединений монокристаллических интегральных схем. Забегая вперед, отметим, что впоследствии

научились на оксидном покрытии кремниевого кристалла выращивать тонкую пленку кремния, в ней формировать "второй этаж" транзисторов и так далее - возможности объемной микроэлектроники воистину безграничны.

И чуть о другом. По нашему мнению, именно с планарной технологии начался парадигмальный переворот в развитии электроники: классическая схема "от фундаментального физического открытия к созданию нового прибора" все явственнее уступает место постмодернистской схеме "от создания технологически совершенного артефакта к получению нового знания, к открытиям в физике, химии, биологии". Гуманитарии, выросшие на противопоставлении естественно-технических и гуманитарных наук, оказались буквально раздавленными сверхдинамичным и непредсказуемым развитием микроэлектронной технологии, являющейся миру через непрерывную смену IT-гаджетов. И, не умея философски осмыслить происходящее, удрученно объявляют: творчества нет, есть только технология. Неважно, идет ли речь о создании нового смартфона, или о выборах президента.

ПЕРВАЯ МИКРОСХЕМА

Пишущие о рождении микроэлектроники частенько приводят высказывание Дж.Даммера на конференции в Вашингтоне в 1952 году, трактуемое почти как предвиденье: "С появления транзистора и работ в области полупроводниковой техники вообще можно себе представить электронное оборудование в виде твердого блока, не содержащего соединительных проводов. Он может состоять из слоев изолирующих, проводящих, выпрямляющих и усиливающих материалов, в которых определенные участки вырезаны таким образом, чтобы они могли непосредственно выполнять электрические функции". По сути, бессодержательная маниловщина - похоже, сотрудник Британского королевского радиолокационного управления мыслил категориями ГИС, другого у него и быть не могло; он попытался что-то исполнить экспериментально (1956 г.) и, разумеется, провалился, почти не начав.

Подлинное начало было подготовлено появлением плоскостного транзистора и диффузионной технологией его изготовления, а сама идея интеграции уже витала в воздухе, нужен был лишь какой-то внешний толчок. И он последовал, причем оттуда, откуда мало кто ожидал, - 4 октября 1957 года Советский Союз запустил в космос первый искусственный Спутник Земли! Мир испытал шок, прежде всего, США - в одночасье рухнула уверенность

в абсолютном превосходстве страны в технике. Немедленной реакцией на Спутник стало вбрасывание миллиардов бюджетных долларов в ракетно-космическую отрасль и в ее неизменного поводыря – радиоэлектронику. И как прямое следствие этого – уже зимой-весной 1958 года сотни тысяч инженеров и ученых перешли из "гражданки" на предприятия военно-промышленного комплекса. Одним из них был Джек Килби (рис.4). Тогда же были созданы национальное аэрокосмическое агентство НАСА и Агентство перспективных оборонных исследований DARPA.

Килби родился в 1923 году в семье инженера-электротехника, создавшего свою компанию, в отроческом возрасте участвовал в делах отца, юношей увлекся радиолюбительством и сдал экзамен на лицензию "коротковолновика", войну отслужил радистом-разведчиком в тылу японских войск в Бирме, с 1947 года в фирме Centralab (дочка компании Globe Union) начал заниматься разработкой аппаратуры на толсто пленочных микросхемах; разумеется, при всем том сумел к 1950 году получить дипломы бакалавра и магистра. (Автору довелось близко видеть наших парней – ровесников Килби, прошедших через фронт, – бешенная энергия и целеустремленность, стремление во чтобы то ни стало наверстать пропущенное в университетские годы, отданные войне, идти непременно в новое дело, "твори, выдумывай, пробуй". Это было удивительное поколение русских и американцев!) С 1952 года он возглавил разработку слуховых аппаратов, но уже к 1957 году вполне сформировался как убежденный адепт микроэлектроники, в ее исключительно кремниевом монолитном образе. Что-либо попробовать в аппаратурной фирме было нереально и он ушел в полупроводниковый гигант – Texas Instruments (TI). Его взяли на микромодульный проект для ракет Minuteman, выбора не было, хотя он осознавал, что микромодули – позавчерашний день. Но ему повезло. Было начало лета, инженеры фирмы разбежались по отпускам, и Килби, бродя по цехам, где производились германиевые меза-транзисторы, вскоре записал в своем рабочем журнале: "Действительная миниатюризация может быть достигнута, если резисторы, конденсаторы, транзисторы и диоды изготовить в одном кристалле кремния" (24.07.1958 г.).

Вернувшиеся сотрудники отнеслись к идее иронично, но руководство поддержало новичка, и к 12 сентября 1958 г. был изготовлен прототип микросхемы, состоявшей из нескольких кристалликов германия, склеенных пчелиным воском и электрически соединенных тонкими золотыми

проволочками. "Это выглядело грубо, это и было грубо. Но это работало!" – вспоминал Килби. В январе 1959 года была создана уже полностью монолитная микросхема. В Патентное бюро заявка на "Миниатюризованные электронные схемы" была направлена 6 февраля 1959 года, а в марте 1959 года состоялась публичная презентация микросхемы. На этом можно поставить точку в истории Дж. Килби как изобретателя микросхемы, однако история ее самой только начиналась...

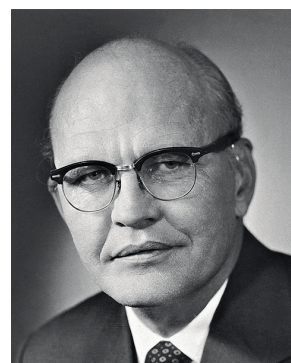


Рис.4. Джек Килби – изобретатель монолитной микросхемы

В том же 1958 году на микроэлектронной авансцене появился и другой главный герой нашего повествования – Роберт Нойс (рис.5). Он родился в 1927 году и после окончания университета защитил степень Ph.D по физике в знаменитом Массачусетском технологическом институте (MIT). С 1956 года начал работать на калифорнийской фирме У.Шокли (Shockley Semiconductor Laboratory) в числе других талантливых учеников своего великого патрона. Но к началу 1957 года на фирме возник серьезный конфликт: Шокли ориентировал своих "мальчиков" на изобретение новых полупроводниковых приборов, а они видели будущее в развитии технологии как основы массового производства транзисторов. Ситуацию довел до скандала непростой характер Шокли – заносчивый, не терпящий возражений, капризный; к тому же он только что (октябрь 1956 г.) был вознесен на Нобелевский Олимп. В начале 1957 года "восьмерка предателей" (так окрестил Шокли своих бывших аспирантов) ушла и под эгидой фирмы Fairchild Camera and Instrument образовала полупроводниковую компанию Fairchild Semiconductor. Роберт Нойс стал директором и руководителем разработок, Гордон Мур возглавил производство транзисторов.

Использование планарной технологии в разработке "беспроволочных транзисторных кластеров" (транзисторных сборок) заметно удешевило себестоимость транзисторов, увеличило объем их поставок и обеспечило большую прибыль. Позднее о том времени Нойс вспоминал: "Интегральная схема – плод моей лени. Мы брали транзисторы, которые были аккуратно расположены на кремниевой пластине, разрезали пластину на мелкие куски и затем

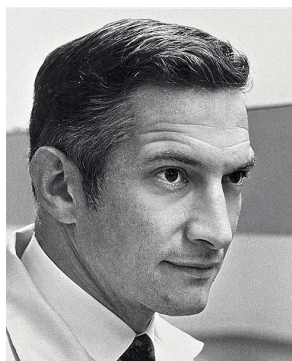


Рис.5. Роберт Нойс – автор и создатель первой планарной интегральной схемы

Роберт Нойс мгновенно развернула интересы Нойса в сторону микроэлектроники, и уже 25 апреля 1959 года он изобрел "свою" микросхему. Патентная заявка Нойса принципиально отличалась от заявки его предшественника всеми достоинствами планарной технологии, в частности, тонкопленочными межсоединениями вместо фактически неприемлемой связи тонкими проволочками; эксперты увидели в ней технически реализуемое предложение, а не "бумажный патент", каким представлялась заявка Килби (но через 40 лет она дала ему Нобелевскую премию!).

Две заявки на один и тот же конечный предмет потребовали значительных усилий со стороны Патентного ведомства и юристов обеих фирм, лишь в 1961 году мудрая и осторожная патентная власть пришла к туманному компромиссу: Килби отдавался приоритет вообще, а Нойсу – авторство микросхемы с тонкопленочными межсоединениями; фактически каждый становился первоавтором в рамках своей заявки [6, 7]. При этом первым получил патент Нойс (апрель 1961 г.), а Килби еще три года бодался с Бюро патентов.

Реальная жизнь решила их спор однозначно: в производство, начиная с первых же шагов, пошла только кремниевая микросхема Нойса, изготавливаемая по планарной технологии; мгновенно переориентировалась на нее и TI, вскоре подключились Motorola и Westinghouse. Микросхема, изобретенная Килби, покорила мир лишь в форме кремниевой планарной микросхемы Нойса. Увы, Роберт Нойс скончался в 1989 году, не дожив до Нобелевской премии (2000 г.), которую, несомненно он на равных разделит бы с Килби. Нойс не был первым, но его вклад был решающим.

А мир в те же дни жил в состоянии непрерывно разрастающегося транзисторного бума, и вот новый,

отгружали их потребителям, которые должны были вновь собрать эти кусочки вместе. Я и подумал: нельзя ли выбросить все эти промежуточные шаги и соединить транзисторы друг с другом, пока все они находятся на одной кремниевой пластине. Мы так и поступили". Это рисовка, он шел не от транзисторных кластеров: мартовская (1959 г.) презентация микросхемы Килби

еще более мощный шок. Газеты запестрели традиционными американскими гиперболами-завлекалками: "радиосхема в размерах рисового зерна", "компьютер меньше банки сардин", – но фактически реклама и не требовалась, каждый понимал, что когда в привычном транзисторном корпусе вам дают пару логических вентилях из двух десятков транзисторов, а через год в тех же габаритах – уже 20 таких же вентилях, содержащих несколько сот транзисторов, это – революция. Серийное производство логических микросхем началось на Fairchild и TI с 1961-1962 годов, через пару лет появились первые микросхемы для оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), началось, пока еще робкое, вытеснение ферритовой памяти. Микросхемы логики и памяти – два определяющих вида микросхем, наиболее массово используемых в компьютерах, именно они и стали впредь характеризовать технический уровень микроэлектроники: степень интеграции, быстродействие, потребляемая мощность.

В 1965 году появились большие интегральные схемы (БИС) с числом элементов на кристалле более 1000 и с двухуровневой системой пленочных межсоединений – это уже был не чисто количественный, но и качественный скачок. Разработка таких микросхем потребовала принципиально новых методов схемотехнического конструирования – оптимально разместить тысячу транзисторов и их межсоединений в кристалле совсем не то же самое, что в объеме РЭА. Зарождались САПР – системы автоматизированного проектирования, они потребовали создания адекватных математических моделей элементов микросхем. В начале 1970-х годов объем производства микросхем обогнал объем производства транзисторов, который и сам продолжал непрерывно нарастать. Рождение микроэлектроники состоялось!

ВСЕ НАЧИНАЕТСЯ ЗАНОВО

Хронологически последовательное описание истории от транзистора к микросхеме вполне адекватно, но вообще-то жизнь – это полиэкранное телевидение: сделанное разными людьми в разных местах не всегда сходится к одной точке. Идея микросхемы витала в воздухе, и "ее время пришло, когда технология развилась до того, что это стало возможным; и если бы не мы, то это сделал бы кто-то другой" (Р.Нойс).

Упрямство покинутого У.Шокли все же довело его до создания образцов тиристорного реле, он предложил их AT&T, но там забраковали: сложно, дорого, невоспроизводимо. Что-то подобное развивал в Bell

Labs Дж.Мортон, декларируя полное исключение межсоединений в будущих приборах. Направление назвали молекулярная электроника, под заворачивающий бренд получили солидное финансирование от ВВС, но дальше дело не пошло (видимо, следуя моде, ведущему зеленоградскому НИИ тоже приклеили "молекулярную электронику", однако ни тогда, ни позже ничем подобным там не занимались).

Мощнейший интеллектуальный потенциал Bell Labs все же не мог не проявить себя. Вернулись, как водится, к истокам. Снова начали от транзистора, но теперь уже от полевого, уповая на его главное функциональное отличие от биполярного – управление напряжением, а не током, и, в принципе, без затрат энергии. М.М.Аталла вспомнил о патенте Дж.Бардина еще "дотранзисторной" поры (1947 г.), в котором металлическая игла прижималась к поверхности электрохимически окисленного германия. Времена изменились, объектом исследования избрали структуру "кремний – диоксид кремния – алюминий", и через пять лет на конференцию по новым твердотельным приборам в Питтсбурге в июне 1960 года Д.Кэнг и М.М.Аталла представили доклад "Silicon-silicon dioxide field induced surface devices" [8]. Родился МОП-транзистор (рис.6а), никто не хотел отказываться от привычного "транзистор", хотя никакого отношения механизм усиления нового прибора к транзисторному эффекту не имел. В последующие годы к первоначально представленному р-канальному прибору добавился более быстродействующий п-канальный МОП-транзистор, затем комплементарная пара р- и п-канальных приборов КМОП (рис.6б), подтвердившая работоспособность при ничтожно малом потреблении энергии. Наконец, в 1967 году были предложены МОП-элементы памяти, основанные на длительном сохранении зарядов на "плавающем" металлическом затворе или в пленке нитрида кремния (рис.6 в, г).

Функциональное многообразие, рекордно низкая потребляемая мощность, простота изготовления и, главное, полная совместимость с планарной технологией сделало МОП-транзистор уже к началу 1970-х годов премьером микроэлектроники, каким до того был биполярный транзистор. А к 1980 году МОП-микроэлектроника превзошла биполярную по объемам производства, особенно это было очевидно в области СБИС (память, микропроцессоры).

Обращает на себя внимание то, что в истории МОП-микросхем практически нет звонких имен, которые характерны для истории биполярной микроэлектроники. Меньше пафосности, но больше

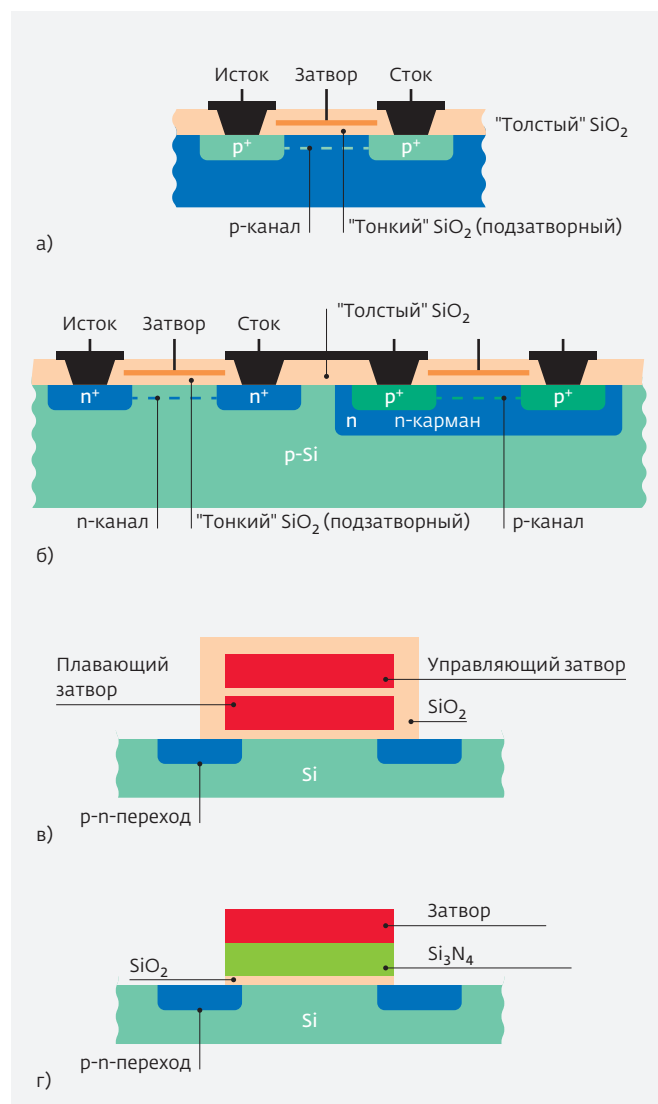


Рис.6. Транзисторы типа "металл-окисел-полупроводник": МОП-транзистор с р-каналом (а) и планарная КМОП-структура (б); МОП-структуры ячеек памяти: МОП-транзистор с "плавающим" затвором (в) и МОП-транзистор с нитридом кремния в качестве запоминающей среды (г)

практически значимых результатов. Прежде решали физики, а это всегда – личности, теперь – технологи, а это – коллективы. Скучно, господа, сказал бы классик. Но как не крути, а будущее, по мнению футурологов, с замахом лет на 30–50, – за КМОП-технологией, похоже, что никакой фуллерено-графеновой или квантовокомпьютерной альтернативы за этот период не сформируется.

В конце 1960-х годов, по мере повышения степени интеграции микросхем, производители столкнулись со своеобразным проявлением "тирании количества". При строго определенной схеме

межсоединений десятков и сотен тысяч транзисторов микросхема фактически становилась изделием "частного применения", удовлетворяющим одного или нескольких потребителей; множеству других нужно было функционально такое же, но с незначительными отличиями. А неограниченное расширение номенклатуры – это смерть массового производства. Поэтому вполне логично, что когда микросхема превратилась во фрагмент будущего вычислительного устройства, она должна была и концептуально что-то позаимствовать от него.

Так родился микропроцессор – программно-управляемая микросхема, осуществляющая процесс обработки цифровой информации и управление им. Схемотехнически такая микросхема содержит арифметико-логическое устройство; запоминающие устройства, хранящие исходные данные, программу, промежуточные и окончательные результаты; блок управления и синхронизации, реализующий изменения алгоритма вычислений. Микропроцессор был создан группой инженеров под руководством Р.Нойса на фирме Intel в 1971 году (ее в 1967 году образовали все те же неутраченные Р.Нойс и Г.Мур, переместившие туда все наработанное в Fairchild). Какое-то время для его изготовления использовали разные техпроцессы, но в конце концов победительницей микропроцессорной гонки стала КМОП-технология – сверхвысокая степень интеграции и минимально потребляемая мощность!

О НАШЕМ ВХОЖДЕНИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ

Определяющая особенность истории рождения нашей полупроводниковой электроники связана с тем, что она разворачивалась на фоне острейшего противостояния США в период "холодной войны", и единственной ее задачей являлось своевременное обеспечение комплектами оборонных систем. В угоду срокам жертвовали оптимальностью технических решений и технологичностью, лишь бы обеспечивались функциональное соответствие американскому аналогу и немедленное начало производства.

Другая особенность нашей истории заключалась в том, что она активно формировалась руководителями государства, директивное руководство позволяло концентрировать необходимые материальные и людские ресурсы на прорывных направлениях. Принципиально, что во главе нашей полупроводниковой электроники оказался такой выдающийся руководитель, каким показал себя Александр Иванович Шокин – сегодня, сопоставляя "век нынешний и век минувший", мы это

особенно остро чувствуем. Характерно, что по мере развития электроники он развивался и сам, осознав ее комплексность и интегративность, его первые шаги – создание электронного материаловедения и специального машиностроения. Только благодаря этому была создана промышленность, опирающаяся на замкнутые технологические циклы.

Еще одна наша особенность той поры (опять хочется сказать – "важнейшая") – наличие высокообразованных кадров как в Академии наук (ленинградский Физтех, ФИАН в Москве), так и в отраслевой науке, запущенной Постановлением "О радиолокации" еще в 1943 году – НИИ-160 ("Исток"), НИИ-108 (ЦНИРТИ), позднее НИИ-311 ("Сапфир") в 1951 году и НИИ-35 ("Пульсар") в 1953 году. Были и условия расширенного воспроизведения кадров для новой техники, особую роль на первом этапе сыграли "кембриджеподобные" вузы, созданные по инициативе П.Л.Капицы под обеспечение атомного проекта: МФТИ, МГУ, МИФИ, спецфаки МЭИ, МХТИ, ЛЭТИ; позднее, для электроники по инициативе А.И.Шокина, – МИЭМ, МИЭТ, МИРЭА. Наконец, особенно следует отметить, энтузиазм, энергию, целеустремленность нашего научно-технического сообщества, еще не остывшего от героики времен Отечественной войны.

Прежде чем перейти к хронологии отечественных разработок ЭКБ, заметим, что, по нашему мнению, при вторичности отечественной электроники, имеет смысл в качестве "первых" рассматривать лишь те изделия, которые либо сами привели к последующему промышленному эффекту, либо стали отправной точкой для развития того или иного жизненно-важного направления. Такие "региональные" приоритеты представляют интерес для истории отечественной техники, причем интерес ограниченный и специфический, главным образом для сопоставления с историей развития тех же направлений в других странах. Для истории науки и техники как раздела всемирной истории интересны лишь приоритеты мирового масштаба (типа гетеролазера Ж.И.Алферова с сотрудниками) и промежуточные свершения на пути к ним. Прочие "приоритеты" – всего лишь факты биографий конкретных ученых, это – для семейного альбома.

Первые транзисторы (германиевые) начали разрабатываться с 1952 года (НИИ-160, А.В.Красилов, С.Г.Мадоян, Ф.А.Щиголь) и пошли в серийное производство в 1954 году (НИИ-35); в 1957–1959 годы там же созданы первые кремниевые транзисторы, наконец, в 1964–1965 годах началось производство

кремниевых планарных транзисторов. Как видим, стартовое отставание (по датам) от США не превышало трех-четырёх лет. В те же годы благодаря нескольким правительственным Постановлениям (1958–1961 гг.) в стране была создана новая отрасль промышленности, порядка 20 крупных заводов.

Необходимость развития интегральной электроники начала осознаваться у нас с 1959–1960 годов, первое Правительственное постановление увидело свет 8 августа 1962 года – оно касалось создания первых пяти предприятий в Зеленограде. Характерно, что все разрабатывающие НИИ имели при себе опытные заводы. Топ-менеджмент разворачивающегося Центра микроэлектроники был рекрутирован из КБ-1 – предприятия, стоявшего в ту пору на ведущих позициях в деле создания радиоэлектронных систем оборонного назначения, уже прославившегося комплексами ПВО С-25...С-200. Разумеется, эти руководители принесли с собой гибридно-пленочную технологию и концепцию плоских модулей, другими категориями тогда и не мыслили.

Первые образцы монолитных интегральных схем были созданы в 1962 году в НИИ-35 Б.В.Малиным, после стажировки в США (промышленный выпуск с 1965 г. во Фрязино). Тогда некоторыми руководителями планировалось дальнейшее развитие этого направления именно на базе НИИ-35 или на каком-то его дочернем предприятии (заметим, что Постановление 1962 года вообще не предусматривало создания НИИ по разработке монолитных микросхем в Зеленоградском Центре, таков был уровень понимания проблемы в то время). По причинам субъективного свойства это направление в 1963–1964 годах в НИИ-35 было свернуто, а в марте 1964 года было принято решение о создании в Зеленограде НИИ Молекулярной электроники (НИИМЭ) для дальнейшего продолжения работ, которые к тому времени уже стали в США генеральным направлением микроэлектроники (в 1965 г. американцы вплотную подошли к производству БИС). В марте 1965 года директором НИИМЭ стал Камиль Ахметович Валиев (1931–2010), молодой казанский физик-теоретик, сумевший тотчас встать вровень с громадной проблемой.

Так при отодвинутом на несколько лет старте у нас начались работы по воспроизведению стандартной американской (фирмы TI) серии логических схем – наша знаменитая "Логика-2" пошла в промышленность в 1969 году в дальнейшем выпускалась чуть ли не десятком заводов. Несколько раньше (~1967–1968 гг.) началось производство монолитных микросхем для особо ответственной

аппаратуры ракетно-космических комплексов на Воронежском заводе полупроводниковых приборов; здесь сориентировались на технологию фирмы Motorola (В.И.Никишин, директор В.Г.Колесников). Это направление получило в дальнейшем важное, но ограниченное развитие.

Таким образом, пионерами отечественной твердотельной микроэлектроники следует назвать Б.В.Малина, К.А.Валиева, В.И.Никишина. Естественно, что за каждым из них стояла группа соратников и, по большому счету, весь потенциал соответствующих предприятий – НИИ-35, НИИМЭ, ВЗПП.

Воспроизводить или создавать свое? Эта дилемма обсуждается у нас перманентно, а что подсказывает история? И в атомном, и в ракетном проекте наши ученые и инженеры на первых же порах создали Бомбу и Ракету, превосходящие западные аналоги, – это логично: идущие вторыми учитывают просчеты первых. Однако руководители страны настояли на обязательном и буквальном воспроизведении зарубежных аналогов и именно эти образцы пошли на первое испытание. Наше лучшее пока еще экспериментально не обкатано, а провал первой демонстрации – это почти крах всего проекта. Исторический опыт подводит нас к тезису: идущий вторым обязан повторить достижения первого и лишь на основе этого двигаться дальше. В микроэлектронике это еще принципиальнее, чем в случаях с Бомбой и Ракетой, где речь идет о единичных уникальных образцах. Микроэлектроника – это массовка, здесь взаимозаменяемость обязательна в мировом масштабе.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ВЗГЛЯД ИЗ 21 ВЕКА

Сегодня, когда важнейшие события, определившие рождение микроэлектроники, стали историей, мы можем вполне корректно охарактеризовать это емкое понятие. Действительно, можно ли его отождествить с изобретением микросхемы

Килби? Очевидно, нет. Нам представляется, что рождение микроэлектроники (или "микроэлектронная революция") – это многозвенный процесс, и в качестве определяющих звеньев должны быть названы физика полупроводниковых приборов и прежде всего транзисторный эффект (1), плоскостной транзистор (2), планарная технология на основе кремния (3), биполярная микросхема (4), МОП-транзистор во всех его разновидностях (5), микропроцессор (6). Каждое звено (точнее, "звено-событие") относительно независимо от других, оно не есть развитие или модификация какого-то другого (плоскостной транзистор – не усовершенствование точечного, МОП-транзистор – не модернизация биполярного).

Наша концепция многозвенности заключается в том, что микроэлектронная революция характеризуется совокупностью последовательно-параллельных событий, относительно независимых друг от друга и образующих многозвенную цепь (1-6). Выбросьте мысленно одно звено, и микроэлектроника не станет, либо она "опустится" до принципиально иного уровня. Концепция многозвенности универсальна – она справедлива для всех приборов, всех направлений полупроводниковой электроники, в каждом из них интегрируются эффективный физический принцип, оптимально соответствующие ему устройства, тип полупроводника и технология его обработки.

Крайние звенья-события микроэлектронной революции – открытие транзисторного эффекта (1947 г.) и изобретение микропроцессора (1971 г.) – определяют весьма примечательный отрезок времени. В этот же период полностью сформировался и транзисторно-диодный проект, который вроде бы представляет собой исходное звено микроэлектроники, однако не исчерпывается этим и имеет вполне самостоятельное значение, подтверждением чего служат силовая электроника, фотоэлектроника, СВЧ-техника. Также в период 1950–1960-х годов зародилась и утверждалась квантовая электроника: создание мазера (1953 г.), лазера (1960 г.), полупроводникового гетеролазера (1969 г.). Далеко впереди лежала полупроводниковая светотехническая революция (начиная с 1992 г.), однако и ее физико-технологические основы были заложены в 1960-е годы. Воистину, четвертьвековой период (1947–1971 гг.) – это золотой век всей современной электроники.

Как использовать исторический опыт в деле модернизации нашей современной электроники? У автора нет однозначного ответа, ныне мы живем в принципиально иных внутренних и внешних

"предлагаемых обстоятельствах". Но вопросы возникают. Почему концентрация огромных средств дала нам лишь Роснано и Сколково (электронике – ничего), а в 1950-е годы за 7–8 лет была создана отечественная транзисторная электроника с десятками заводов? Почему создание Физтеха и МИФИ дали суперспециалистов для новой техники, а теперешние реформы образования аккуратно удаляют молодежь от нее? Почему, почему? Складывается впечатление, что с теперешним топ-менеджментом мы приближаемся к "точке невозврата". Или прошли ее?

Заметим однако, что многие проблемы носят не субъективный, а достаточно общий объективный характер, связанный с глобализацией мира электроники, удорожанием микроэлектронного производства, монополизмом фирм-гигантов. Можно ли при этом стране иметь "свою" электронику? И так ли уж бесперспективна традиционно ругаемая "сырьевая экономика" в нынешних условиях? Может быть, надо лишь изменить подход?

Заметим к этому, что неверно списывать развал отечественной электроники исключительно на "происки" перестройщиков и реформаторов – уже к началу 1980-х годов переход к субмикронной технологии оказался для нас почти неподъемным.

Автор благодарен Н.Ю.Носовой за подбор материалов, И.А.Сенникову и Ю.А.Концевому – за прочтение рукописи и полезные замечания, И.А. и И.А.Фаттахетдиновым – за помощь при оформлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bardeen J., Brattain W.** The transistor, a semiconductor triode // *Physical Review*. 1948. V. 74. № 2. P. 230–231.
2. **Shockley W.** The theory of p-n-junctions in semiconductors and p-n-junction transistors // *Bell System Technical Journal*. 1949. V. 28. P. 435–489.
3. **Shockley W.** A unipolar field-effect transistor // *Proceedings of the IRE*. 1952. V. 40. P. 1356.
4. **Шокли. В.** Теория электронных полупроводников. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1953, (В оригинале – 1950 г.).
5. **Hoerni J.** Planar silicon transistor and diodes. – IRE Electron devices meeting, Washington, D.C., 1960
6. **Noyce R.** US Patent 2981877 Semiconductor device and lead structure (апрель 1961, заявлено 25.04.1959)
7. **Kilby J.** US Patent 3138743 Miniaturized electronic circuits (июнь 1964, заявлено 06.02.1959)
8. **Kahng D. and Atalla M.M.** Silicon-silicon dioxide field induced surface devices // IRE-AIEE Solid-state Device Research Conference, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, 1960.