

1.1. МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Цель лекции: ознакомление с курсом, изучение принципов микроминиатюризации электронной компонентной базы приборостроения.

1.1.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Приборостроение как научное направление возникло не на пустом месте. Приборостроение – междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, предметом которой являются исследования, проектирование и совершенствование *методов производства приборов* и применения *интегрированных приборных систем*. К ведению приборостроения относится высокоточное приборостроение, машиностроение и биотехнологии.

Начало микроминиатюризации интегрированных систем было положено с первых дней зарождения радиотехники. Развитие полупроводниковой электроники связано с изобретением в 1948 г. (а точнее в декабре 1947 г.) сотрудниками американской фирмы «Bell Telephone Laboratories» Уильямом Шокли, Джоном Бардиным и Уолтером Браттейном транзистора (так называемого точечного транзистора, см. рис. 1.1.1), за что все трое в 1956 г. получили Нобелевскую премию по физике.

СПРАВКА

Уолтер Х. Браттейн (1902–1987) – американский физик, специалист по квантовой механике. Родился в Китае. Степень бакалавра получил в Уитменском колледже (1924), степень магистра – в Орегонском университете (1926). Защитил докторскую диссертацию (1929) в университете шт. Миннесота, куда приезжали читать лекции по новой квантово-механической теории ее создатели – Арнольд Зоммерфельд, Эрвин Шредингер и Джеймс Франк. В 1929 г. поступил на работу в фирму «Bell Telephone Laboratories». В 1931 г. возглавил в ней вместе с Дж. Беккером работы по исследованию купроксных выпрямителей.

Джон Бардин (1908–1991) – американский физик-теоретик, единственный в мире дважды лауреат Нобелевской премии по физике, вторая премия – за работы по сверхпроводимости в 1972 г. (теория Бардина–Купера–Шриффера).

Уильям Брэдфорд Шокли (1910–1989) – американский физик, специалист по физике твердого тела. Родился в Лондоне. Степень бакалавра получил в Калифорнийском технологическом институте (1932), степень доктора наук – в Массачусетском технологическом институте (1936).

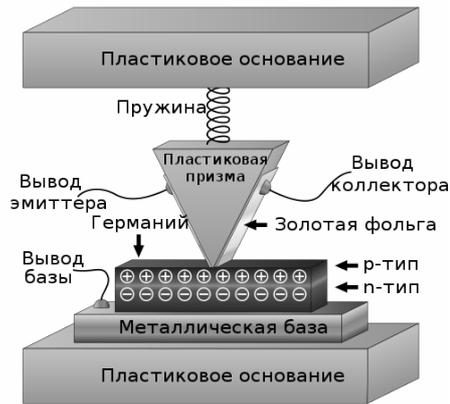


Рис. 1.1.1. Схема точечного транзистора. Золотая фольга разделяется на две части в вершине пластиковой призмы и образует два отдельных контакта с верхней частью германиевой подложки p-типа, когда призма поджимается к нему пружиной. Два куска золотой фольги образуют коллектор и эмиттер, а металлический электрод, прикрепленный к другой стороне полупроводника, образует контакт к базе

История создания транзистора вообще заслуживает отдельного повествования, поскольку является невероятно интересной. В качестве интриги можно сказать, что если бы не Вторая мировая война, то транзистор был бы открыт на 7 лет раньше. Уже в 1940 г. исследователи, сами того не подозревая, получили первый *p-n*-переход и начали исследовать его свойства. Однако война помешала продолжению этих работ, и все три будущих Нобелевский лауреата были направлены в разные исследовательские группы, работавшие на военные нужды.

В 30-е годы XX века промышленностью выпускались купроксные выпрямители – по сути дела приборы, использующие полупроводниковые свойства твердого тела. Однако принцип их работы в то время еще никто не понимал.

В работы по получению сверхчистых материалов, в частности германия и кремния, и исследованию их свойств внесли свой вклад: Рассел С. Оль (химик, работы по получению кремния высокой чистоты), Дж. Х. Скафф и Х. С. Тойерер (металлурги, работавшие с кремнием в начале 40-х годов).

В 1948 году независимо от группы Шокли транзистор был изобретён работающими во Франции двумя немецкими физиками — Хэрбертом Матаре и Хайнрихом Велкером. Оба прибора были с неудобным в производстве точечным контактом к полупроводнику.

В 1951 г. Шокли изобрёл биполярный транзистор с двумя *p-n*-переходами, полностью заменивший точечные уже к середине 1950-х.К

1954 году транзисторы уже стали обязательными компонентами в телефонных станциях и аппаратах фирмы Bell.

В СССР, благодаря работам физиков школы А. Ф. Иоффе, было быстро освоено производство полупроводниковых элементов. Первый транзистор был получен его учеником Б. М. Вулом в 1957 г. (по другим сведениям, в 1953 г.).

В 2000 году нашему соотечественнику – академику Жоресу Алферову – также была присуждена Нобелевская премия по физике, но уже за работы по созданию полупроводниковых приборов на гетеропереходах. При этом сейчас умалчивают, что еще в 1972 г., в советские времена, ему за эти же работы была присуждена Ленинская премия.

Все это говорит о важности работ по микроминиатюризации электронной аппаратуры.

После изобретения транзистора Шокли в 1956 г. основал компанию Shockley Semiconductor Laboratory, где изобрёл ещё один полупроводниковый прибор, названный им «диод Шокли». В отличие от транзистора, тут не 3, а 4 слоя полупроводника, что дало возможность блокировать прибор в открытом или закрытом состоянии без поддерживающего напряжения.

Изначально транзисторы делались из германия, однако p-n переходы из этого материала отличались термической нестабильностью, при этом сам элемент сильно нагревался. Кроме того, применение германия ограничивала его дороговизна. В 1952 году удалось получить кристаллический кремний, после чего уже через 2 года фирма Texas Instruments (TI) начала его применять для производства транзисторов.

В 1955 году Bell Labs впервые использовали для производственных целей почти все основные технологические операции микроэлектроники: осаждение изолятора, фотолитографию с масками, травление и диффузию.

Нерешительность Шокли при управлении проектами не давала возможность немедленно пустить идею в производство. Это так расстроило его коллег, что 8 наиболее молодых из них потребовали сменить главу компании. Когда стало ясно, что навстречу им не пойдут, «вероломная восьмёрка», как прозвала их жена Шокли, сама покинула компанию и в 1957 г. основала Fairchild Semiconductor для производства полупроводниковых транзисторов.

1.1.2. СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И РАЗВИТИЕ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В 1950-е годы были созданы и первые интегральные микросхемы. Впервые идею об интегральной схеме как о «твёрдом бруске без соединяющих проводов» в 1952 году выдвинул британский электронщик

Джэффри Даммер, но его попытка реализовать ее в 1956 году была неудачной неудачно.

12 июля 1958 году работавший в фирме TI инженер-электрик Джек Килби построил первую интегральную схему из пяти элементов (рис. 1.1.2), выполняющую роль генератора, хотя она ещё не была однокристальной. Патент на изобретение интегральной микросхемы был выдан Джеку Килби из фирмы «Texas Instruments» в 1961 г. За это открытие он в 2000 г. получил Нобелевскую премию по физике.

СПРАВКА

Джек Сент Клер Килби начал свою деятельность в 1947г. в фирме «Centralab», шт. Миллуоки.

Изобретение Килби имело большой недостаток: компоненты схемы соединялись золотыми проводками, что делало технологию малоприменимой к дальнейшему уменьшению, усложнению и массовому производству. К концу 1958 г. Жан Эрнст из Fairchild продемонстрировал размещение в кремнии областей с избытком электронов и дырок, вместе составляющих p-n-переход, над которым располагался изолятор из диоксида кремния. В изоляторе было протравлено отверстие, которое заполняется алюминием, образующим контакт. В то же время чешский физик Курт Леховец, работавший в калифорнийской компании Sprague Electric, догадался использовать в качестве изолятора p-n-переход. В 1959 году Роберт Нойс из Fairchild объединил обе идеи с возможностью напылять тонкий слой металла на схему. Этот слой потом выборочно вытравливался, получая одновременно все необходимые межсоединения, что сделало возможным изготовление более сложной схемы за несколько шагов. Эта технология была названа планарной. Первая созданная планарная микросхема показана на рис. 1.1.3.

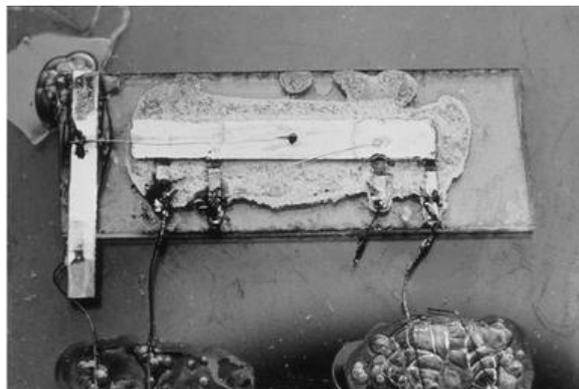


Рис. 1.1.2. Осциллятор Килби. Источник:

http://www.ti.com/corp/graphics/press/image/on_line/co1034.jpg

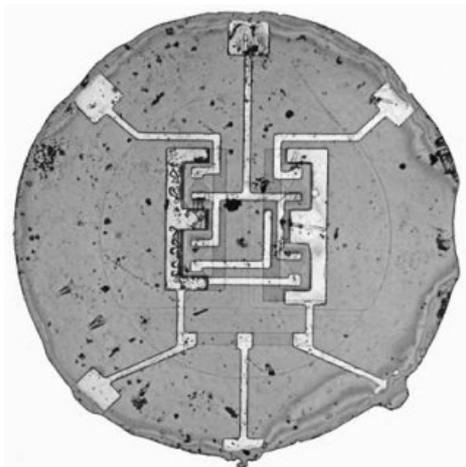


Рис. 1.1.3. Кристалл первой «современной» микросхемы (триггер с 4 транзисторами и 5 резисторами), Fairchild, 1960 год.

СПРАВКА

Роберт Нойс — американский инженер и физик, один из представителей «вероломной восьмерки», основавшей одну из первых компаний по производству кремниевых полупроводников — Fairchild Semiconductor. Работая в Fairchild Semiconductor, Нойс, практически одновременно с Джеком Килби из Texas Instruments, изобрел интегральную микросхему.

В 1958 году Джэй Лэст и Роберт Нойс построили один из первых фотоповторителей, позволявших на одну пластину проецировать множество копий маски. В 1961 году выпущены первые промышленные фотоповторители с уменьшением изображения, благодаря чему маску можно сделать в 5–10 раз больше, что упрощало процесс ее подготовки. Сами маски изготавливались переносом выполненных на прозрачной плёнке чертежей на лист рубилита, в рубиновом слое которого координатограф полуручным способом гравировал оттиск. Изначально кристаллы микросхем изготавливались из пластин диаметром всего $13\frac{1}{2}$ мм, введённых в 1960 г. Право называться первой коммерческой оспаривают фирмы Fairchild и Texas Instruments.

Параллельно биполярным транзисторам развивались и другие полупроводниковые элементы – полевые транзисторы, впервые созданные в 1955 году. В 1959 г. Джон Аталла и Дэвон Канг из Bell Labs изготовили полевой транзистор с изолированным затвором (рис. 1.1.4). В результате получился всем сегодня известный «бутерброд» металл-оксид-полупроводник (МОП): металлический (Al) затвор, подзатворный оксид (SiO₂) и канал-полупроводник (Si). Хотя первые два элемента уже давно

делаются из других материалов, мы всё ещё называем этот элемент МОП-транзисторами или МДП-транзисторами. Изначально использовались p -канальные полевые транзисторы (в большинстве из них канал между истоком и стоком открыт при отрицательном напряжении на затворе относительно истока), которые в то время получались медленнее биполярных; производили их просто потому, что они получались дешевле. Более быстрые n -канальные (канал открыт при положительном напряжении на затворе) появились только в 1964 году.

В 1960 г. в Bell Labs изобрели ещё один нужный для массового производства процесс — эпитаксиальное осаждение тонкого слоя на кристаллической подложке, попутно обнаружив, что малая толщина базы ускоряет биполярный транзистор.

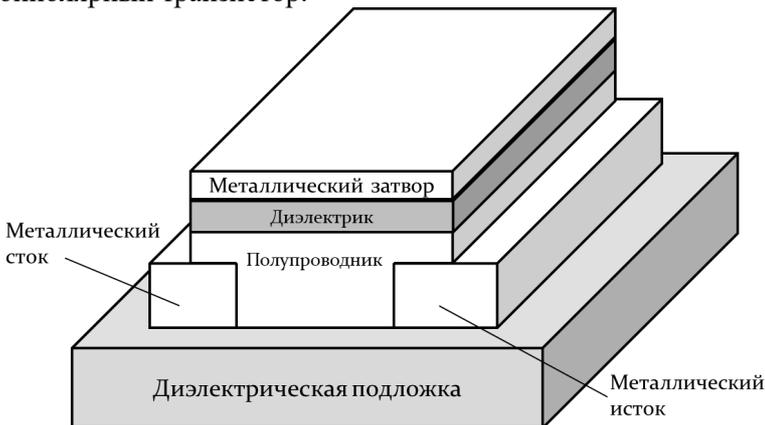


Рис. 1.1.4. Схема МДП транзистора с изолированным затвором, 1959 год.

В 1951 году Жан Эрни, используя легирование золотом и эпитаксиальное осаждение, получил кремниевый биполярный транзистор, работающий быстрее германиевых.

1960-е годы характеризуются бурным развитием микроэлектроники. Одним из главных стимулов для создания на их основе компьютеров послужила лунная гонка. До того момента первые чипы были относительно медленными и в несколько раз дороже аналогичного набора дискретных элементов. Но для применения их в авиационной и космической промышленности миниатюрность и энергоэффективность оказались важнее недостатков, хотя микросхемы тогда содержали всего лишь несколько компонентов. Уже в 1961 г. коллега Килби Харви Крэгон сделал демонстрационный “Молекулярный электронный компьютер” для ВВС США, в котором 587 микросхем производства TI заменяли 8500 отдельных деталей. В этом же году в простых компьютерах стали использоваться чипы.

В 1963 г. вышли первые ТТЛ-чипы (транзисторно-транзисторная логика, самая популярная до конца 70-х). В том же году Фрэнк Уанласс из Fairchild

показал, что симметричное спаривание р- и п-канальных МОП-транзисторов уменьшает потребление энергии при простое (когда транзисторы не переключаются) в миллион раз, назвав этот вид логики «комплементарная (структура) МОП» (КМОП). Впервые изготовленная через 2 года, она сразу стала использоваться в авиации и космосе, но быстро добралась и до коммерческих устройств. Из-за использования медленных р-МОП-транзисторов на рекорды скорости поначалу такая логика не претендовала.

Когда массовое производство ИС стало исчисляться уже миллионами, оказалось, что с применением пластин большего диаметра себестоимость чипов падает, а массовость растёт. В результате в 1964 году были введены 25 мм пластины, а через 2 года — 38 мм. В последующие годы увеличение диаметра пластин продолжилось: в 1970 г. внедрены пластины на 57 мм, в 1973 — на 76, в 1975 — на 100, в 1979 — на 125 мм, в 1981 г. — 150 мм, в 1985 — 200 (до сих пор используемые на не самых крутых производства) и в 1996 — 300. В результате количество производимых ИС увеличивалось, а их себестоимость уменьшалась. В дальнейшем планировалось перейти на пластины 450 мм, однако этот процесс сильно затянулся из-за чрезвычайной дороговизны оборудования, покупку которого в настоящее время могут потянуть лишь 5-6 компаний в мире.

Кроме того, уменьшались и размеры транзисторов. В 1970 году при уменьшении всех частей транзисторов в 5 раз помимо очевидного уменьшения площади была обнаружена почти линейная зависимость основных параметров — скорости и потребления. Однако уменьшать интегральные МОП-транзисторы оказалось труднее, чем биполярные, из-за производственных сложностей и падения надёжности. Но в течение 1963–1966 годов специалисты из американских, европейских и японских компаний (в сотрудничестве и конкуренции) исследовали и решили большую часть вопросов надёжности МОП-схем. После этого выяснилось, что биполярные транзисторы с уменьшением своих размеров не масштабируют свои параметры также хорошо, как полевые. Это, по сути, поставило окончательный крест на использовании биполярных транзисторов для цифровых устройств, всё ещё применявшихся в самых быстрых логических чипах типа ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика). В результате в 1980-е годы все цифровые устройства стали создавать на МОП-ИС.

В течение 1960-х годов улучшения литографии позволяло увеличивать число транзисторов экспоненциальными темпами. Впервые это заметил химик Гордон Мур, работавший тогда директором по НИОКР в Fairchild. В 1965 г. он написал внутренний доклад «Будущее интегральной электроники» с графиком, соединяющим 5 точек и связывающим число компонентов ИС и их минимальную цену для периода 1959–1964, и предсказанием развития на следующие 10 лет. Оно основывалось на том, что

число компонентов на чипе будет продолжать удваиваться каждый год. Чуть позже отредактированная версия появилась в виде статьи в журнале Electronics 19 апреля 1965 года.

В 1975 г. на ежегодной встрече Международной Организации Инженеров-Электронщиков (IEEE) Мур (уже как президент и исполнительный директор Intel) указал, что увеличение диаметра пластин, успехи в технологических процессах и “поумнение схем и устройств” позволило продолжиться прогнозу (рис. 1.1.5). Впрочем, Мур скорректировал свою закономерность до удвоения каждые 2 года, добавив в последние данные большую долю микропроцессоров как наиболее сложных логических (т. е. нерегулярных) схем. Предсказание оказалось самоподдерживающимся: теперь Гордон Мур уже не наносит на свой график очередные достижения, зато многочисленные фирмы (и, конечно, сама Intel) до сих пор стараются идти в ногу с прогрессией. Титул закона ей дал известный информатик Карвер Мид в 1980 г. Ещё раз публично проверяя своё предсказание в 1995 году, Мур сделал вывод, что оно «не скоро остановится».

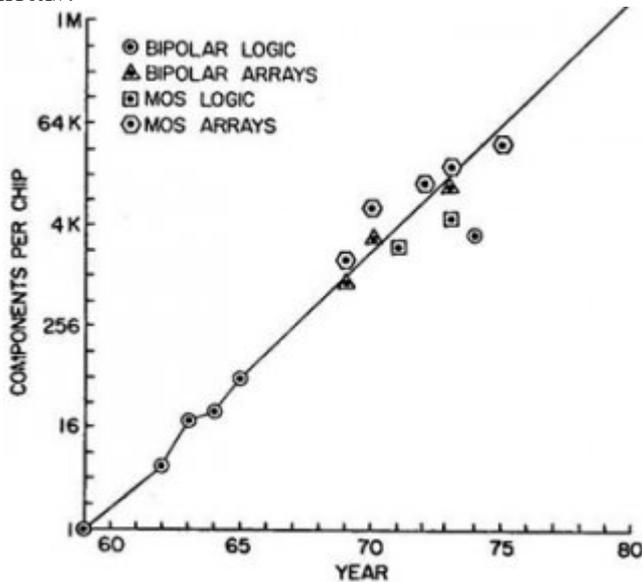


Рис. 1.1.5. Закон Мура, 1975 год

В 1968 году произошел настолько важный прорыв, что за следующие 35 лет ничего подобного с транзистором не случилось: Роберт Кервин, Доналд Кляйн и Джон Сэрэс из Bell Labs заменили материал затвора с алюминия на поликремний (поликристаллическая форма кремния, сильно легированная проводящими примесями). Не смотря на то, что его сопротивление больше, чем у металла (и потому контакт к затвору по-прежнему металлический),

осаждение и выборочное вытравливание кремния для затвора позволило использовать его в качестве маски для формирования истока и стока, идеально подогнанных к его краям, поэтому поликремневый затвор называется самосовмещённым (self-aligned). В результате резко снизился разброс характеристик, вызванный неидеальным наложением масок при литографическом формировании истока и стока. Меньший разброс улучшает надёжность работы, а расположенные тесней части транзистора увеличивают скорость и плотность размещения самих транзисторов. Кроме того, выяснилось, что оказалось, что поликремневый затвор ускоряет доступ в 3–5 раз и уполовинивает площадь по сравнению с обычным МОП-чипом. Первой коммерческой ИС с поликремневыми затворами стала Fairchild 3708 (рис. 1.1.6).

В 1968 году восьмёрке «молодых и дерзких» стало тесно в Fairchild, и они покинули её. За 20 лет перебежчики из Fairchild основали 65 разных компаний, хотя далеко не все оказались известными.

В 1968 г. трое специалистов, ранее работавших в фирме «Fairchild Semiconductor», – Роберт Нойс, Гордон Мур и Эндрю Гроув – основали в Кремниевой долине (шт. Калифорния) фирму «Intel», на которой в 1971 г. был разработан и выпущен в продажу первый микропроцессор – микросхема Intel-4004, содержащая 2250 *p*-канальных МОП-транзисторов. Процессор был разработан Мартином Хоффом и Масатоси Шимой. В том же году фирма «Intel» выпустила микросхему динамического ОЗУ объемом 1 Кбит.

В 1969 году 5 «fairchildren» («прекрасных детей») основали фирму AMD, которая до сих пор является одним из главных конкурентов Intel в производстве микропроцессоров.

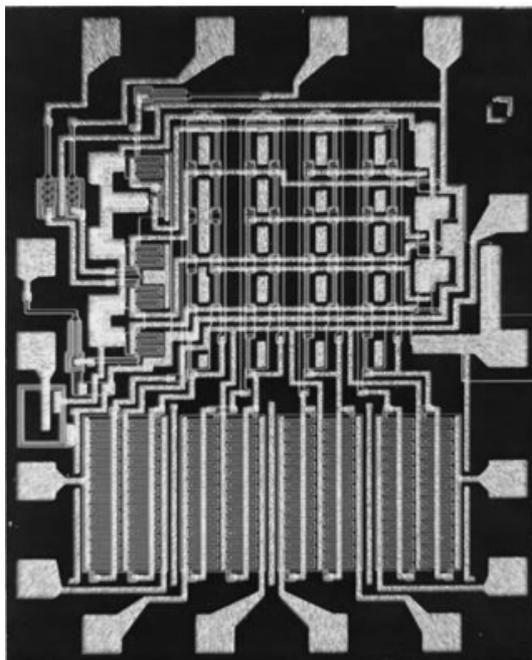


Рис. 1.1.6. Fairchild 3708 — первая коммерческая ИС с поликремниевыми затворами, Fairchild, 1968 год

В 1973 году фирма Perkin Elmer (теперь это SVG Lithography) представила проекционный принтер — первый пример массовой фотолитографии. До этого все микросхемы делались контактным способом, когда маска буквально впечатывалась в пластину и только после этого облучалась. Это порождало большое число осколков и пыли, выбиваемых с поверхности и загрязнявших пластину. Теперь же применяя новый принтер с положительным фоторезистом, удалось добиться революционного прорыва в выходе годных: плотность дефектов на единицу площади резко уменьшилась, т. к. физический контакт маски с пластиной теперь отсутствовал. Сама маска теперь представляла собой кварцевую пластину с хромовым слоем, содержащим нужный рисунок. Совершенствование оборудования подстегнуло всемирную борьбу за микроны (а позже — и нанометры).

1970-е годы ознаменовались в первую очередь взлётом микропроцессоров: за 10 лет они из 4-битных стали 32-битными, и для многих применений этого хватает до сих пор. Кроме того, совершенствовались микросхемы памяти. Именно в эти годы была открыта динамическая ОЗУ (ДОЗУ, DRAM), которая стала не только ёмче и надёжней, но и дешевле памяти на магнитных кольцах.

Наверное, одно из самых больших событий в мировой микроэлектронике произошло в 1980 г., когда IBM, рассматривая ЦП Motorola и Intel, выбрала i8088 для выходящего через год IBM PC. Возможно, конкурент — 32-битный

MC68000 — был слишком дорог (имея около 70 000 транзисторов против 29 300) или не был приспособлен для относительно дешёвых систем (имея 16-битную шину данных). Intel же к тому времени переделала 16-битный i8086 для 8-битных чипсетов в виде i8088. В 1982 г. Motorola также выпустила урезанную версию с 8-битной шиной (MC68008), но было уже поздно.

Однако ажиотажный успех первых PC (неожиданный даже для самой IBM, где к проекту относились с сомнением и считали его экспериментальным) поставил всё на свои места: в Intel поняли, что миру будет нужно много «персональных процессоров», причём с регулярной сменой поколений. Непрофильные микросхемы постепенно отходили в сторону, уступая место процессорам x86.

Ещё до успеха PC Intel успела продать несколько лицензий на производство аналогов i8086 другим компаниям; AMD свою получила уже в 1982 году, по распространённому заблуждению — из-за политики IBM иметь нескольких поставщиков каждого важного компонента, чему Intel якобы вынужденно подчинилась. Так или иначе, потребовалось быстро обойти собственноручно созданных конкурентов, для чего выбрали улучшение не только микроархитектур ЦП, но и технологических процессов для их выпуска. Для Intel это не менее важно до сих пор, хотя большинство компаний (включая главного конкурента) давно перешли на модель «fabless + foundry», т.е. бесфабричного разработчика и контрактного завода-производителя.

В 1990-е годы размеры транзисторов в ИС уменьшились настолько, что возник ряд проблем, в первую очередь, связанных с ограничениями фотолитографии. Их решение потребовало значительного удорожания оборудования. Кроме того, из-за повышения тактовых частот, на которых работали ИС, и увеличения числа транзисторов существенно выросло тепловыделение ИС. Эта проблема была частично решена в 1997 году фирмой IBM, которая придумала, как можно заменить алюминиевые проводники на медные, что потребовало существенных изменений в технологии. Кроме того, проводились исследования, направленные на уменьшение токов утечки. Для ее решения в 1998 году IBM анонсировала технологию кремния на изоляторе (КНИ, silicon on insulator, SOI). Ее особенностью является то, что на кремниевой пластине формируется слой оксида кремния (изолятора), а поверх него — тонкий слой кремния. Использование этой технологии позволяет существенно снизить тепловыделение, хотя и удорожает производство ИС. Однако конкуренты IBM, в первую очередь, фирма Intel, не спешила использовать эту технологию из-за ее дороговизны.

В 2000-е годы появились технологические процессы с проектными нормами 90 и 65 нанометров, что было меньше, чем длина волны, используемая для операции фотолитографии. Если для 90 нм техпроцесса еще можно было использовать вычислительную литографию (основными из них

являются использование фазосдвигающих масок (PSM) и оптическая коррекция близости (OPC)), то для 65 нм техпроцесса ее стало уже не хватать. Решением возникших проблем фотолитографии, основательно обновившим мировое чипостроение, стало множественное шаблонирование, более известное по своей простейшей реализации — двойное шаблонирование. Это семейство технологий снижает минимальный экспонируемый размер увеличением числа экспонирований. Позже появились и другие технологии. Кроме того, для этих стала применяться технология «напряженного кремния», впервые примененная IBM в 2001 году, которая позволяла увеличить быстродействие транзисторов.

Еще одной проблемой, возникшей при уменьшении размеров транзисторов, стало утончение подзатворного диэлектрика. К 90-нанометровому техпроцессу толщина затвора уменьшилась до величины от 1,2 (у Intel) до 1,9 нм (у Fujitsu; обе цифры — для п-каналов). А толщина кристаллической решётки кремния равна 0,543 нм. При такой толщине начинают существенно сказываться квантовые эффекты, в результате чего электроны начинают туннелировать сквозь изолятор, приводя к утечке тока. Дело обстояло настолько серьёзно, что для техпроцесса 65 нм уменьшились все параметры транзистора, кроме толщины затвора, т. к. если бы его сделали ещё тоньше, то ни о какой энергоэффективности не стоило бы и мечтать.

Чтобы решить эту проблему, пришлось использовать материал с более высокой диэлектрической проницаемостью k . Заменяв применявшийся с 1990-х годов оксинитрид кремния на новый оксинитрид кремния-гафния (HfSiON , $k=20-40$) толщиной в 3 нм, для процесса 45 нм удалось уменьшить утечки тока в 20–1000 раз. Однако гафниевый изолятор оказался не совместим с поликремниевым затвором, так что пришлось менять и его — на металлический. В качестве материала затвора использовали не алюминиевый, как это было в 1960-х годах, а сплав двух металлов. Его сопротивление ниже, что ускоряет переключение транзистора. Изначально было известно лишь то, что сплав отличается для р- и п-канальных транзисторов, причём Intel (которая первой всё это применила в 2007 году) держала оба состава в строгом секрете. В 2008-м году инженеры IBM (работа которых с тех пор используется в т. ч. на заводах GlobalFoundries, ранее принадлежавших AMD) сделали свою версию этой технологии, так что деталями пришлось делиться и Intel.

В 2010-е годы для снижения токов утечек фирма Intel решила вместо обычных МОП-транзисторов использовать так называемые FinFET транзисторы (полевые транзисторы с затвором-«плавником»). В настоящее время для всех ИС с проектными нормами 22 нм и меньше используются именно такие транзисторы.

Элементные базы в приборостроении:

- 1-е поколение (1895–1948) – активные элементы – электровакуумные приборы и дискретные элементы;
- 2-е поколение (1948–1961) – транзистор и печатный монтаж. Печатные платы имеют более высокую надежность, большую воспроизводимость параметров, легкость автоматизации производства и снижение себестоимости;
- 3-е поколение (1961 – конец 70-х годов) – ИС – толсто-тонкопленочные ИС, полупроводниковые ИС, микросборки;
- 4-е поколение (конец 70-х годов и до настоящего времени) – БИС и СБИС, функциональная микроэлектроника – узлы и приборы, в которых невозможно выделить элементы, эквивалентные традиционным дискретным компонентам;
- 5-е поколение – наноэлектроника.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 1

Вопрос 1	Кто создал первую интегральную микросхему
Ответы:	
1	Джек Килби
2	Гордон Мур
3	Альберт Эйнштейн
Вопрос 2	Закон Мура показывает, что:
Ответы:	
1	каждые два года количество транзисторов в ИС будет удваиваться
2	каждые 5 лет типы микросхем будут обновляться
3	размеры транзисторов будут уменьшаться каждый год