

50 лет транзистору

М. Валентинова

Король жив,
да здравствует король!

Декабрь 1947 года. Трое ученых фирмы Bell Laboratories Джон Бартон, Вальтер Брайтен и Вильям Шокли, усиленно трудившиеся над проблемой замены вакуумной лампы, обнаруживают эффект изменения проводимости полупроводникового материала под воздействием протекающего электрического тока. Месяцем позже Шокли описывает германиевый плоскостной транзистор. Затем появляются германиевые и кремниевые слабые приборы и, наконец, кремниевый МОП-транзистор, ставший основой современной микроэлектронной промышленности. Так то, что вначале рассматривалось как простая замена электровакuumных приборов, изменило окружающий мир, став для человечества столь же значительным явлением, как и изобретение колеса.

По утверждению бывшего президента фирмы Bell Laboratories Яна Росса, идея замены вакуумных ламп в становившейся все более громоздкой телефонной аппаратуре принадлежит тогдашнему руководителю исследовательских работ фирмы Мервину Келли. С этой целью в 1945 году он сформировал исследовательскую группу по изучению полупроводниковых приборов. К чему это привело, хорошо известно.

В те годы не существовало понятия “электроника”. Близкие к ней по роду деятельности фирмы занимались радиотехникой. Руководители одной из них — Motorola — мгновенно оценили важность открытия, сделанного учеными Bell Labs, и уже в 1951 году организовали группу, перед которой была поставлена задача создать транзистор, пригодный для освоения в производстве. Однако первый транзистор выпустила фирма Shockley Transistor. Произошло это в 1955 году, а двумя годами позже группа инженеров во главе с Робертом Нойсом и Гордоном Муром покинула эту фирму и организовала компанию Fairchild Semiconductor. Отпочковавшиеся от нее корпорации National Semiconductor, Intel и Advanced Micro Devices через несколько лет стали основой современной Кремниевой долины США. Многие широко известные ныне микроэлектронные фирмы можно считать вторым, третьим и четвертым поколениями компании Fairchild.

Несмотря на ошеломляющие результаты, ученые Bell Labs, получившие в 1956 году Нобелевскую премию, не смогли предвидеть, что благодаря ма-

лым размерам и малой рассеиваемой мощности созданное ими устройство даст жизнь новой отрасли промышленности — микроэлектронике. Начало ей было положено в 1958 году, когда ученый Джек Килби, пришедший работать на фирму Texas Instruments в год приобретения ею у AT&T лицензии на транзистор (1952), запатентовал первую интегральную схему. За десятилетие, прошедшее с открытия транзисторного эффекта до создания первой интегральной схемы, появилось шесть совершенно разных типов транзисторов, произошел переход от германиевых к кремниевым приборам. Но и тогда ученый мир еще не до конца понимал, какие перспективы открывает перед человечеством возможность изготавливать сложные устройства малых размеров.

Не появившись транзистор, радиоэлектронная промышленность выпускала бы только телевизоры и радиоприемники. Цифровые вычислительные устройства оставались бы очень дорогими, громоздкими, с низкими быстродействием и надежностью. Ни о какой революции в области цифровой технологии не было бы и речи. Располагая вакуумными лампами стоимостью 1 долл. каждая, никогда бы не удалось создать CD-плеер, где требуется огромное число компонентов.

Что ждет микроэлектронику в будущем? На этот вопрос никто не решится дать однозначный ответ. В 1965 году Гордон Мур в своей знаменитой речи предсказал, что число транзисторов в интегральной схеме памяти будет удваиваться каждые два года. Согласно “закону Мура”, к 2000 году на кристалле будет размещаться до

100 млн. транзисторов, а производительность микропроцессорных устройств достигнет 10^{12} команд/с. Последняя схема микропроцессора Pentium II фирмы Intel содержит 7,5 млн. транзисторов. Но до 2000 года еще есть время... Сегодня многие эксперты говорят о том, что закон Мура требует корректировки из-за значительного увеличения затрат (до 2 млрд. долл.) на освоение производства новых полупроводниковых приборов на пластинах следующего поколения. Некоторые утверждают, что с ним уже вступают в противоречие и законы физики. Тем не менее полупроводниковая промышленность продолжает успешно развиваться и строить планы на будущее. Об этом убедительно свидетельствует опубликованный в конце 1997 года скорректированный вариант Программы развития национальной полупроводниковой промышленности США (National Technology Roadmap for Semiconductors). Согласно этому документу, темпы внедрения инноваций оказались более высокими, чем предполагалось в 1994 году, когда был опубликован первый вариант Программы. Цикл освоения выпуска новых изделий такими ведущими фирмами, как Intel, сейчас составляет два года, а не три, как раньше. Это значит, что следующее поколение ИС с 0,18-мкм топологическими элементами появится в 1999 году, а не в начале XXI века, как планировалось ранее. В результате к 2021 году минимальный топологический размер ИС будет равен 0,05 мкм (табл.), т.е. на одно поколение опередит предыдущий прогноз (0,1 мкм).

Основные задачи, поставленные Программой развития национальной полупроводниковой промышленности США до 2012 года

Параметры	1997 г.	1999 г.	2001 г.	2003 г.	2006 г.	2009 г.	2012 г.
Технологические							
полушаг элементов ДОЗУ, мкм	0,25	0,18	0,15	0,13	0,10	0,07	0,05
длина затвора в схеме микропроцессора, мкм	0,20	0,14	0,12	0,10	0,07	0,05	0,035
Емкость схем ДОЗУ, бит							
опытных образцов	256М	1Г	—	4Г	16Г	64Г	256Г
выпускаемых промышленностью ИС	64М	256М	1Г	1Г	4Г	16Г	64Г
Плотность транзисторов логических ИС, 10⁶·см⁻²							
микропроцессоры	3,7	6,2	10,0	18,0	39,0	84,0	180,0
специализированные ИС	8	14	16	24	40	64	100
Площадь кристалла, мм²							
ДОЗУ	280	400	445	560	790	1120	1580
микропроцессоры	300	340	385	430	520	620	750
Частота, МГц							
транзисторов в схеме	750	1250	2100	3500	6000	10000	13000
соединительных линий	750	1200	1400	1600	2000	2500	3000
Напряжение, В	1,8—2,5	1,5—1,8	1,2—1,5	1,2—1,5	0,9—1,2	0,6—0,9	0,5—0,6
Число выводов корпуса (штырьковые/шариковые)							
микропроцессоры/микроконтроллеры	600	810	900	1100	1500	2000	2700
специализированные схемы	1100	1500	1800	2200	3000	4100	5500
Диаметр пластины, мм	200	300	300	300	300	450	450

Впервые в скорректированном варианте Программы наряду со схемами ДОЗУ “движущей силой” развития микроэлектроники в последующие 14 лет названы ИС микропроцессоров. Теперь, основываясь на мнении ведущих американских поставщиков ИС, консорциума Sematech и промышленных обозревателей, Программа рассматривает микропроцессоры и ДОЗУ как два класса устройств, способствующих совершенствованию различных, но одинаково важных направлений полупроводниковой технологии: первые — росту производительности ИС с минимальными размерами элементов транзисторов, вторые — увеличению плотности упаковки элементов на кристалле. Теперь закон Мура справедлив для схем как ДОЗУ, так и микропроцессоров. Программа прогнозирует развитие будущих поколений ИС по достигаемой ширине изолированных линий (длине затвора транзисторов) для микропроцессоров и по ширине плотно упакованных линий (полушаг элементов) для ДОЗУ.

Согласно Программе, в 1997—2012 годах получат развитие следующие тенденции:

- площадь кристалла со схемой ДОЗУ будет увеличиваться и к 2012 году окажется намного больше, чем у схемы микропроцессора. Чтобы сохранить конкурентоспособность своих изделий, изготовителям ДОЗУ в течение трех лет после выпуска нового поколения схем памяти придется уменьшить площадь кристалла со схемой на 50%, а еще через три года — на 35%;
- к 2009 году полупроводниковая

промышленность вновь будет вынуждена перейти к обработке пластин большого диаметра (450 мм);

- размер экспонируемого в процессе литографии поля будет непрерывно увеличиваться и составит 25x52 мм;

- разрыв между быстрейшим отдельными элементами схемы и передающих линий будет расти по мере увеличения времени задержки сигнала в межсоединениях: если рабочая частота транзисторов в схеме в 2012 году достигнет 10 ГГц, то частота сигнала в токопроводящих линиях не превысит 3 ГГц;

- рост потребности в работающих от батареи ручных устройствах приведет к созданию схем на напряжение питания 0,5—0,6 В (сейчас 1,8—2,5 В);

- среднегодовые темпы снижения удельной стоимости в пересчете на единицу информации (бит) схем ДОЗУ составят 29%. В результате средняя продажная цена каждого нового поколения ДОЗУ будет возрастать всего на 41%. Чтобы сохранить конкурентоспособность, удельная стоимость каждого нового поколения схем микропроцессоров в пересчете на отдельный транзистор должна снижаться в среднем на 24% в год, а схем одного поколения — на 45%;

- стоимость испытаний первых опытных ИС сохранится на уровне 3 тыс. долл. на вывод для логических схем, к стоимости которых предъявляются высокие требования, и 10 тыс. долл. на вывод для специализированных схем ASIC-типа с высокими характеристиками.

В скорректированной Программе определены шесть основных проб-

лем, которые потребуются решить для достижения поставленных целей: пропорциональное уменьшение размеров элементов схемы; совершенствование методов литографии с использованием источника на длинах волн 100 нм и менее; разработка новых полупроводниковых материалов и структур; обеспечение работы элементов в схеме и вне ее в гигагерцовом диапазоне; совершенствование методов метрологии и тестирования; усиление внимания к НИОКР, сложность которых непрерывно растет.

По мнению экспертов SIA, переход к 0,18-мкм технологии уже в 1999 году стал возможным благодаря совершенствованию средств оптической литографии и применению в качестве источника излучения эксимерных лазеров на длину волны 248 нм. В варианте Программы 1995 года утверждалось, что для формирования линий такой ширины потребуются лазер на фториде аргона на длину волны 193 нм. Сообщение о создании первой системы литографии на базе такого лазера фирмой Integrated Solutions Lithography (ISI) появилось только во второй половине 1997 года. Для дальнейшего уменьшения размеров топологических элементов схем необходимо решить чрезвычайно важную и сложную задачу перехода к новым методам литографии, на долю которых сегодня приходится около 35% затрат на производство ИС.

С 50-х годов и до сих пор для изготовления ИС применяется в основном оптическая литография. Эта ситуация сохранится до начала следую-

щего столетия, когда будет освоено производство ИС по 0,13-мкм технологии. Но для производства схем с меньшими топологическими нормами придется отказаться от оптических методов экспонирования, что потребует коренного изменения технологии, а также разработки новых средств экспонирования, резистов, шаблонов и методов метрологии. По оценкам экспертов, эти работы займут не менее восьми-десяти лет и будут стоить около 1 млрд. долл. Какой же метод литографии обеспечит достижение поставленных целей? Сейчас существуют пять основных претендентов на звание литографической технологии следующего поколения:

- рентгенолитография с микроазотом, разрабатываемая фирмой IBM при поддержке Управления перспективных разработок МО США (DARPA);

- проекционная электронно-лучевая, продвигаемая фирмой Lucent Technologies также при поддержке DARPA;

- экстремальная УФ (EUV), над которой работает фирма Intel совместно с национальными Сандийской, Ливерморской и Берклийской лабораториями. Для изучения этого метода они создали Виртуальную национальную лабораторию (Virtual National Lab). Интерес к данной технологии проявляют также фирмы Advanced Micro Devices и Motorola;

- электронно-лучевая с непосредственным формированием рисунка, включающая несколько различных методов. Исследования в этой области активно ведут фирма Etac Systems и Корнельский университет;

- проекционная ионная, разрабатываемая европейскими фирмами, в том числе Siemens.

Хотя сторонники каждой технологии утверждают, что предлагаемое ими решение самое перспективное, все предложения пока еще слабо изучены. Выбор затрудняется и крайне жесткими сроками создания промышленного оборудования: оно должно появиться к 2003 году. Фирма IBM ведет работы в области рентгенолитографии с начала 80-х годов. Во второй половине 89-го она приступила к отработке этой технологии на специально построенном предприятии. Фирма использует кольцевой синхротрон как для исследовательских работ, так и в опытно-производстве ИС на предприятии в Фишхилле для нанесения рисунков критических

элементов шириной до 0,1 мкм с точностью 0,02 мкм. По утверждению ее специалистов, в лаборатории изготовлены функционирующие устройства с линиями шириной 0,08 мкм (80 нм).

Системы рентгенолитографии с последовательным шаговым экспонированием создает фирма Suss Advanced Lithography, выпустившая за 10 лет 14 таких систем и приступившая к созданию системы четвертого поколения, а также фирмы Canon и SVG Lithography Systems, выпустившие по крайней мере по одной установке. Сегодня парк систем рентгенолитографии насчитывает около 20 единиц оборудования. Ведущие поставщики синхротронов для таких систем — фирмы Oxford Instruments (Великобритания) и Sumitomo (Япония). Многие японские компании, в том числе Mitsubishi, NEC и Toshiba, внимательно присматриваются к этой технологии, считая ее весьма результативной и относительно простой для освоения в полупроводниковом производстве. В ее пользу говорят такие факты, как хорошо развитая инфраструктура (работы ведутся уже более десяти лет), а также наличие нужного оборудования и материалов. Для процесса рентгенолитографии пригодны существующие оптические резисты на длину волны 248 нм. Шаблоны для рентгенолитографии выпускают фирмы IBM и NTT, собственные шаблоны изготавливает и фирма Mitsubishi. Таким образом, это уже достаточно хорошо отработанная и известная технология. А сроки достижения желаемых результатов с помощью новой технологии всегда очень длительны. Однако система рентгенолитографии весьма громоздка. Для успешной реализации метода требуется вакуум 10^{-10} Тор и два гигантских сверхпроводящих магнита массой в несколько тонн, для охлаждения которых нужен жидкий гелий, а для питания — источник высокой мощности.

По сравнению с системой рентгенолитографии установка проекционной электронно-лучевой литографии Scalpel фирмы Lucent Technologies кажется весьма миниатюрной. Разработка систем электронно-лучевой литографии ведется на фирме Bell Labs с 1989 года, а работы по созданию современной системы Scalpel начались в 1995-м. В установке используется сфокусированный пучок высокоэнергетических электронов, который сканирует шаблон в масштабе 4:1. Эта

технология и используемая оптика знакомы любому “пользователю” электронного микроскопа. Установка не требует никаких уникальных устройств питания, поддержки нужных температур и вакуума или магнитных полей. Система располагается в лаборатории предприятия компании в Муррей Хилл. Основной недостаток системы — необходимость применения шаблонов рассеивающего типа взамен традиционных. Изготавливать, а также очищать и исправлять такие шаблоны достаточно трудно. Тем не менее уже сейчас компания Mems North Carolina, специализирующаяся в области микромашиной обработки, готова ежегодно поставлять до 30 тыс. таких шаблонов с нитридной мембраной. Позитивные и негативные резисты для этого вида литографии разработаны фирмой Olin Microelectronic Materials.

На установке Scalpel уже сформированы линии шириной 0,08 мкм. Это побудило руководство фирмы Lucent начать переговоры о совместной разработке следующего поколения системы Scalpel с более высокой производительностью как с поставщиками технологического оборудования, так и с изготовителями ИС. В конце 1996 года фирма заключила соглашение с Integrated Solutions о разработке и поставке технологической системы Scalpel следующего поколения для производства ИС с элементами субмикронных размеров на пластинах диаметром 200 мм. В середине 1997 года Lucent заключила договор с Photronics на исследование промышленных проблем, связанных с шаблонами, используемыми по программе Scalpel. Возможно, аналогичный договор заключен и с компанией Du Pont Photomasks. В конце 1997 года фирма начала переговоры с 10 фирмами о совместной разработке сканирующей системы электронно-лучевой литографии, работающей по принципу системы Scalpel. Цель работы — создать к 2003 году высокопроизводительную установку 0,13-мкм литографии, способную обрабатывать не менее 50 пластин диаметром 300 мм в час. Одновременно фирма расширяет группу, работающую в этом направлении. В конце 1997 года в ее состав входили 30 человек, в 98-м их будет 50. В конечном итоге над проектом будет работать 75 человек.

В Японии интерес к электронно-лучевой литографии в основном проявляет NEC. Фирма еще не сделала окончательный выбор, но тем не менее сообщила о создании с помощью данной технологии функционирующего МОП-транзистора с эффективной длиной поликремниевого затвора всего 0,014 мкм (14 нм). Примечательно, что NEC сама разработала резист, применявшийся при изготовлении транзистора. Появление такого прибора — первый шаг на пути создания схем памяти емкостью 10^{12} бит.

Если Lucent Technologies только приступила к переговорам, Intel, Advanced Micro Devices и Motorola уже организовали консорциум Extreme Ultra Violet Limited Liability Co. (EUV LLC), который совместно с Виртуальной национальной лабораторией Министерства энергетики США развернет научно-исследовательские работы в области экстремальной УФ (ЭУФ)-литографии. Цель работ — создание установки по производству схем для вычислительной техники с линиями шириной до 0,1 мкм, на что до конца столетия частнопромышленные фирмы планируют затратить 250 млн. долл. Это самые крупные инвестиции частнопромышленного сектора в исследовательский проект Министерства энергетики. Освоить новую технологию планируют в 2007—2010 годах.

Технология проекционной ЭУФ-литографии, использующая рентгеновское излучение на длинах волн 1300—1400 ангстрем, похожа на конкурирующую рентгенолитографию и ранее называлась “мягкой” рентгенолитографией. Исследования в этой области начаты в середине 80-х годов в уже упоминавшихся трех лабораториях Министерства энергетики с использованием результатов работ, проводившихся по программе СОИ. Как утверждает Ричард Стулен, руководитель программы ЭУФ-литографии в Сандийской национальной лаборатории, созданный при выполнении программы СОИ лазерный плазменный источник излучения обязан своим появлением фундаментальным исследованиям в области материаловедения. На конечном этапе большая часть исследований проходила в рамках программы передачи военной технологии в гражданский сектор, что и позволило объединить усилия Виртуальной национальной лаборатории и

промышленных партнеров. Министерство энергетики финансировало научные исследования по ЭУФ-литографии, а промышленность — опытно-конструкторские работы в этой области. Образованный Intel консорциум должен способствовать внедрению новой технологии в производство в начале следующего столетия.

Одно из достоинств ЭУФ-литографии — уменьшение формируемого рисунка, что значительно облегчает изготовление рисунка шаблона. Однако для ее успешного применения необходимо создать совершенно новые резисты, представляющие собой очень сложные химические соединения. К тому же пока нет и лазера, способного излучать на длине волны ЭУФ — 157 нм. Интерес к работам консорциума EUV LLC по созданию нового резиста уже проявила фирма ЗМ, до сих пор не участвовавшая в таких исследованиях. Вероятно, в этих работах примут участие и такие крупные химические корпорации, как Kodak и Fuji, имеющие богатый опыт разработки фотополимеров.

Другая серьезная проблема, без решения которой невозможно выполнение поставленных Программой Roadmap задач, — *замена алюминиевой металлизации медной*. Удельная проводимость меди выше, чем у алюминия. Этот материал меньше подвержен электромиграции и усталости, вызванной механическими напряжениями. Объединение его с диэлектрическим материалом с низкой диэлектрической постоянной позволит уменьшить число уровней металлизации и потребляемую мощность, а также увеличить частоту передаваемого сигнала. Правда, в отличие от алюминиевых сквозных соединительных линий медные должны иметь тонкую “обшивку” из барьерного металла, предотвращающего коррозию кремниевой подложки. Тем не менее, по данным фирмы IBM, сообщившей на ежегодной международной конференции по электронным приборам IEDM—1997 о двойном дамасском процессе обработки промежуточного медного покрытия, переход к этому материалу на 20% снизит издержки производства. IBM планирует использовать медные межсоединения в намеченных к выпуску в середине 1998 года процессорах для главных компьютеров и серверов старших моделей. На выставке ISSCC в феврале

1998 года фирма намерена представить схему микропроцессора серии PowerPC, выполненную с шестиуровневой медной металлизацией. Работы по освоению такой системы металлизации IBM ведет уже 10 лет.

Исследования в этой области активно проводит и фирма Texas Instruments, где благодаря применению медных межсоединений и новому диэлектрическому материалу с низкой диэлектрической постоянной удалось на 40% увеличить быстродействие схемы ЦОС-процессора. Интерес к медной металлизации проявляют также фирмы Motorola, VLSI Technology, NEC. Однако для широкого внедрения технологии необходимо активное участие в этом процессе поставщиков оборудования, специалистов в области автоматизированного проектирования и корпусирования. Потребуется также создать необходимую инфраструктуру, работа над которой уже успешно ведется. Так, оборудование для двойного дамасского процесса для IBM, по-видимому, поставляет фирма Novellus. На конференции Semicon Japan фирма Applied Materials представила модуль химического осаждения из газовой фазы для нанесения барьерного материала и медной затравки. Позднее она планирует выпустить установку электроосаждения для выращивания медных межсоединений с помощью двойного “дамасского” процесса. По утверждению специалистов фирмы, существующее оборудование распыления и вакуумного осаждения из газовой фазы может быть модифицировано для работы с медью. Поэтому сейчас основные работы сосредоточены на получении нужного диэлектрика и металлического сплава барьерного покрытия.

Таковы основные направления развития полупроводниковой техники в будущем. Как бы дальше ни развивались события, справедливыми останутся слова председателя совета директоров фирмы Intel Гордона Мура: “Эта промышленность формировалась теми, кто покорял будущее, а не теми, кто задерживался в прошлом”. А началось это 50 лет назад, в декабре 1947 года.

Electronic Business, Dec., 1997
Electronic News, Dec. 15, 1997
<http://www.semi.org/Channel/current/Channel.html>
<http://techweb.cmp.com/eet/news/97/972.html>
Electronic News, Oct. 13, 1997

Полвека отечественной транзисторной электронике

В сороковые годы в СССР так же, как и в США активно проводились исследования в области полупроводниковых устройств усиления сигнала (С.Г.Калашников, Н.А.Пенин — ЦНИИ-108 МО). К сожалению, наблюдавшийся ими эффект не получил должного объяснения и открытие не состоялось. Первый в нашей стране образец точечного германиевого транзистора создан в 1949 году. В 1953 году изготовлен первый в Союзе опытный образец плоскостного (сплавного) германиевого транзистора. В том же году в Москве открывается специализированный отраслевой НИИ полупроводниковой электроники, который сейчас носит название “Пульсар”. Первые плоскостные транзисторы, ставшие основой серийных приборов типа П1, П2, П3 и их дальнейших модификаций (П6, П13—П16), были изготовлены в НИИ “Пульсар” (тогда НИИ-35), в лаборатории А.В.Красилова. Работы этой лаборатории создали базу для дальнейшего развития транзисторной технологии в институте.

Транзисторное направление интенсивно развивалось и в лаборатории С.Г.Калашникова в ЦНИИ-108 МО. Оба института активно сотрудничали, в частности в решении проблемы повышения выходной мощности и рабочих частот транзисторов. В результате родилась идея нового технологического процесса “сплавления-диффузии”, и на ее основе были изготовлены германиевые транзисторы с выходной мощностью 10—15 Вт на низких частотах и маломощные приборы на частоты до 100—120 МГц (а впоследствии и до 400 МГц — серийные транзисторы П401—П403 и П410, П411 соответственно).

В 1957 году в старом помещении физического факультета МГУ обосновался только что созданный Институт радиотехники и электроники АН СССР. С переходом туда С.Г.Калашникова и большинства его коллег работы по полупроводниковой тематике в ЦНИИ-108 были свернуты. “Пульсар” остался практически единственной (не считая ОКБ завода «Светлана» в Ленинграде) организацией, ведущей

НИОКР в области транзисторной электроники.

До начала 60-х годов усилия разработчиков института в основном были сосредоточены на германиевых транзисторах. Возможность исследования и изучения нового электронного прибора получили десятки специалистов-энтузиастов, но результаты были малообнадешивающими. Причина этого — попытка рассматривать транзистор как аналог электровакуумного триода. Потерпев неудачу, ученые увлеклись теорией “дуального” подхода к проектированию усилительных транзисторных каскадов, считая, что переход от четырехполюсника проводимостей к четырехполюснику сопротивлений решит все проблемы. Но и этот путь не принес успеха. Вскоре стало ясно, что основная причина ненадежности и нестабильности транзисторных схем — включение прибора по схеме, приводящей к появлению “плавающего” потенциала базы. Серьезные опасения внушали и температурные характеристики транзистора: в некоторых случаях увеличение температуры окружающей среды до 40—50°С приводило к полной потере усилительных свойств. Вот почему в начале транзисторной эпохи многие ведущие конструкторы радиоаппаратуры категорически утверждали, что транзистор никогда не станет компонентной основой серьезного электронного оборудования и что он перспективен для применения разве что в слуховых аппаратах. Однако энтузиасты, в первую очередь школы А.А.Куликовского (ВВИА им. Жуковского) и И.П.Степаненко (МИФИ), продолжали изучать возможности транзистора.

В ходе исследований отрабатывалась схемотехника транзисторных устройств, решались вопросы схемотехнической компенсации температурного дрейфа характеристик, выявлялись недопустимые режимы пользования, делались первые шаги по макетированию конкретной электронной аппаратуры, например самолетного радиовысотомера. В ЦНИИ-108 был создан первый в стране образец спецаппаратуры на транзисторах (П.С.Плешаков, А.Г.Раппопорт и др.), выпускавшихся уже заводом “Свет-

лана”. Широким фронтом шли работы по созданию аппаратуры на транзисторах и в КБ-1. К 1959 году необходимость создания промышленности по крупносерийному выпуску полупроводниковых приборов уже не вызывала сомнений. Первый шаг в этом направлении — спешное преобразование ряда спичечных, макаронных, швейных фабрик, техникумов и ателье бытового обслуживания в полупроводниковые предприятия. Однако действительно серьезная работа по развертыванию отечественной полупроводниковой промышленности началась в 1961 году, когда был создан Госкомитет по электронной технике во главе с А.И.Шокиным. Эту задачу удалось выполнить менее чем за пять лет, несмотря на инертность совнархозов, эмбарго на многие виды оборудования, недостаток средств и непригодность передаваемых ГКЭТ помещений для основного производства.

Все эти годы не прекращались интенсивные работы в области полупроводниковой электроники. В 1958 году научный коллектив “Пульсара” в составе В.А.Стружинского, Ю.П.Докучаева и Г.Э.Корнильева разработал так называемые конверсионные германиевые транзисторы с выходной мощностью 5 Вт на частотах 30—50 МГц. В то время это был рекордный результат на мировом уровне. В начале 60-х годов коллектив стал развивать идеи “элионики” — использования в одной рабочей камере электронных и ионных пучков для изготовления полупроводниковых приборов.

В 1956—1963 годах начинаются исследовательские работы в области кремниевых сплавных, диффузионных и планарных транзисторов. Их результатом стало создание маломощных приборов на частоту порядка 300 МГц и транзисторов с выходной мощностью 20 Вт на частоте около 10 МГц. В ходе дальнейших работ были достигнуты частоты порядка 10—12 ГГц (1980 год) и выходные мощности до 2—5 Вт на частотах 7—10 ГГц.

В НИИ “Пульсар” разработаны и первые в стране электронные наручные часы, сначала камертонные на одном микроминиатюрном транзисторе

(ГТ-109), а затем на интегральных схемах с ЖК- и СИД-индикаторами. В институте изготовлена и первая отечественная планарная “твердая схема” на 20 элементов (ИС—100). Здесь же в 1965—1966 годах запущен первый в стране экспериментальный цех по производству планарных ИС. В 1966 году за создание технологии и оборудования, обеспечивших серийный выпуск полупроводниковых приборов, коллектив специалистов отрасли был удостоен Ленинской премии. Тогда же началось интенсивное строительство Зеленограда, который называют отечественной Кремниевой долиной.

К тому времени в ходе разработки кремниевых многоэмиттерных мощных высокочастотных транзисторов

(2Т904, аналог американского 2N3375) были сформулированы требования к прецизионному оптико-механическому оборудованию, необходимому для развития не только техники СВЧ-транзисторов, но и микроэлектроники в целом. Отсутствие такого оборудования мешало нам двигаться вперед, а потому оно, естественно, попадало под торговое эмбарго западных стран. Отечественные же специалисты (ГОИ, ЛОМО) под любыми предложениями отказывались от разработки нужных систем, в частности фотостампов и установок совмещения. Коллектив “Пульсара” приложил немало усилий, чтобы привлечь к этим работам широко известную фирму “Карл Цейс Йена” (ГДР). В результате создаваемая бук-

вально на пустом месте отечественная полупроводниковая промышленность к 1973 году получила остро необходимые ей автоматические координатографы, установки совмещения и экспонирования, координатометры и микроскопы марок “НУ” и “Интерфако”. И сейчас почти половину парка оптико-механического оборудования нашей электронной промышленности составляет продукция фирмы “Карл Цейс Йена”. К сожалению, сегодня такой фирмы больше не существует, в немалой степени и из-за того, что мы отказались оплатить выполненный заказ на установки последовательного шагового экспонирования. Но это, как говорил Р. Киплинг, “уже совсем другая история”.

Philips объединила две дюжины дискретных приборов на одном кристалле

С помощью технологии нанесения двойных поликремниевых слоев специалистам фирмы Philips удалось объединить на одном кремниевом кристалле более 20 дискретных компонентов, в том числе элементы индуктивности, конденсаторы и резисторы. Благодаря двойной поликремниевой технологии рабочая частота схем увеличена до 23 против 10 ГГц в современных биполярных устройствах. Сейчас схемы на такие высокие частоты изготавливаются на более дорогом арсениде галлия. Фирма намерена в середине 1998 года выпустить шесть монолитных ИС: три ВЧ-усилителя и три смесителя для аналоговых и цифровых сотовых телефонов, детекторов РЛС и тюнеров систем спутникового телевидения. Применение новых схем позволит сократить число компонентов сотового телефона с 30 до шести.

Electronic News, 1997, Dec.22, p. 1

Хотя сейчас схемы флэш-памяти в основном предназначены для хранения кода (примерно 90% общего объема памяти отгружаемых схем этого типа), интерес к использованию таких устройств для хранения данных быстро растет. В первую очередь это объясняется расширением применения флэш-памяти в цифровых фотокамерах и другой бытовой технике. Вместе с тем рост спроса на схемы этого типа в основном зависит от объемов продаж ПК, рынок которых постепенно насыщается.

Интерес к схемам флэш-памяти со стороны изготовителей бытовой техники объясняется непрерывным увеличением объема памяти и снижением их стоимости. Сегодня удельная стоимость одного мегабайта такой схемы равна 4—6 долл. против 15 долл. два года назад. По мнению президента фирмы Sandisk Эли Харари, к 2001 году цена флэш-памяти упадет до 1 долл./Мбайт. Что касается объема памяти флэш-систем, то последние разработки позволили создать систему размером с почтовую марку и емкостью более 10 Мбайт.

Проявляют интерес к флэш-памяти и поставщики сотовых телефонов. Функции сотовых радиотелефонов стремительно расширяются. Обеспечивая передачу речевой, электронной почты и даже поддержку браузеров сети Internet, они все больше напоминают ручные ПК. Для выполнения этих функций требуются изделия с памятью большой емкости и низким напряжением питания. Уже сейчас напряжение питания схем флэш-памяти, как правило, равно 3 В (на фирме AMD создано устройство на 1,8 В). В ближайшие годы могут появиться и схемы на напряжение 0,9 В. В результате к 2010 году рынок схем флэш-памяти окажется сопоставимым с современным рынком ИС ДОЗУ (около 40 млрд. долл.).

<http://sumnet.com./enews/outlook98/memory.html>

Год больших перспектив для схем флэш-памяти

Дайджест

Начата программа создания ЗУ со сверхвысокой емкостью

Фирма TMS Technologies (США) по контракту с Управлением перспективных разработок Министерства обороны США (DARPA) начала трехлетнюю программу разработки технологии формирования нового поколения ЗУ со сверхвысокой плотностью записи информации. Ее цель — создание 10-Гбайт ПЗУ, плотность информации которого в 20 раз выше, чем у ПЗУ на оптических дисках. На работу планируется затратить несколько миллионов долларов. ЗУ будет изготовлено с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) и микроэлектромеханической схемы (МЭМС). Это позволит сформировать на кремниевом кристалле матрицы, содержащие несколько десятков тысяч ячеек памяти. Новая технология станет фундаментом для разработки будущих ЗУ с записью и считыванием емкостью до 10 Тбайт/см². Идея создания ЗУ с элементами, сопоставимыми по размерам с атомами, появилась около 10 лет назад в связи с изобретением СТМ. Чтобы реализовать ее, необходимо было изготовить чрезвычайно малые движущиеся детали, исполнительные механизмы, шупы и двигатели. Это стало возможным благодаря совершенствованию МЭМС-технологии. В ходе исследований фирма уже продемонстрировала возможность создания исполнительных механизмов, способных перемещать острие СТМ в трех направлениях.

Semiconductor International, 1997, v.20, N9, p.24

Ассоциация производителей электронных компонентов полагает, что европейский рынок этих изделий в 1988 году вырастет до 38,583 млрд.долл. против 35,283 млрд. в 1997-м. Наибольший рост ожидается в Великобритании (11,6%), Швеции (11%), Франции (10,6%) и Италии (9,1%).

AFX

В Европе ожидают оживления рынка электронных компонентов

Дайджест