

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ¹

Ф.Г. СТАРОС

Начало развития микроэлементной базы. Микроэлектроника развивается настолько быстро, что конкретные примеры недавних технических решений могут вызывать у специалистов и даже у неспециалистов улыбку или, что хуже, чувство жалости. Ведь достаточно двух-трех лет, чтобы «новое», «прогрессивное», «умнейшее» стало «устаревшим», «отсталым», «примитивным». Даже при сокращенном цикле внедрения каждого ряда элементов в производство разработки на их базе к началу производства кажутся уже морально устаревшими, хотя по своему техническому уровню они значительно выше предыдущих. Эта дилемма объясняется, как нам кажется, простой истиной: микроэлектроника является главным действующим оружием в бурной кибернетической революции. Значит, следует критически изучать прошлое развития микроэлектроники, чтобы лучше вести настоящее и правильно направлять будущее.

Тонны тормозят прогресс. Люди создают вычислительные машины, тоннаж которых из года в год растет вместе с потребляемой мощностью. Соревнуясь в наращивании километража соединительных проводов, создатели продолжают улучшать свои машины, повышая их производительность, улучшая их структуру. Однако внушительные физические размеры тормозят распространение машин даже для вычислительных целей, а использование их для управления практически исключается. Но кибернетическая революция требует именно автоматизации процессов управления, и для этого нужны компактные вычислительные машины - килограммы вместо тонн. Как же их сделать компактными? Казалось бы, просто - или

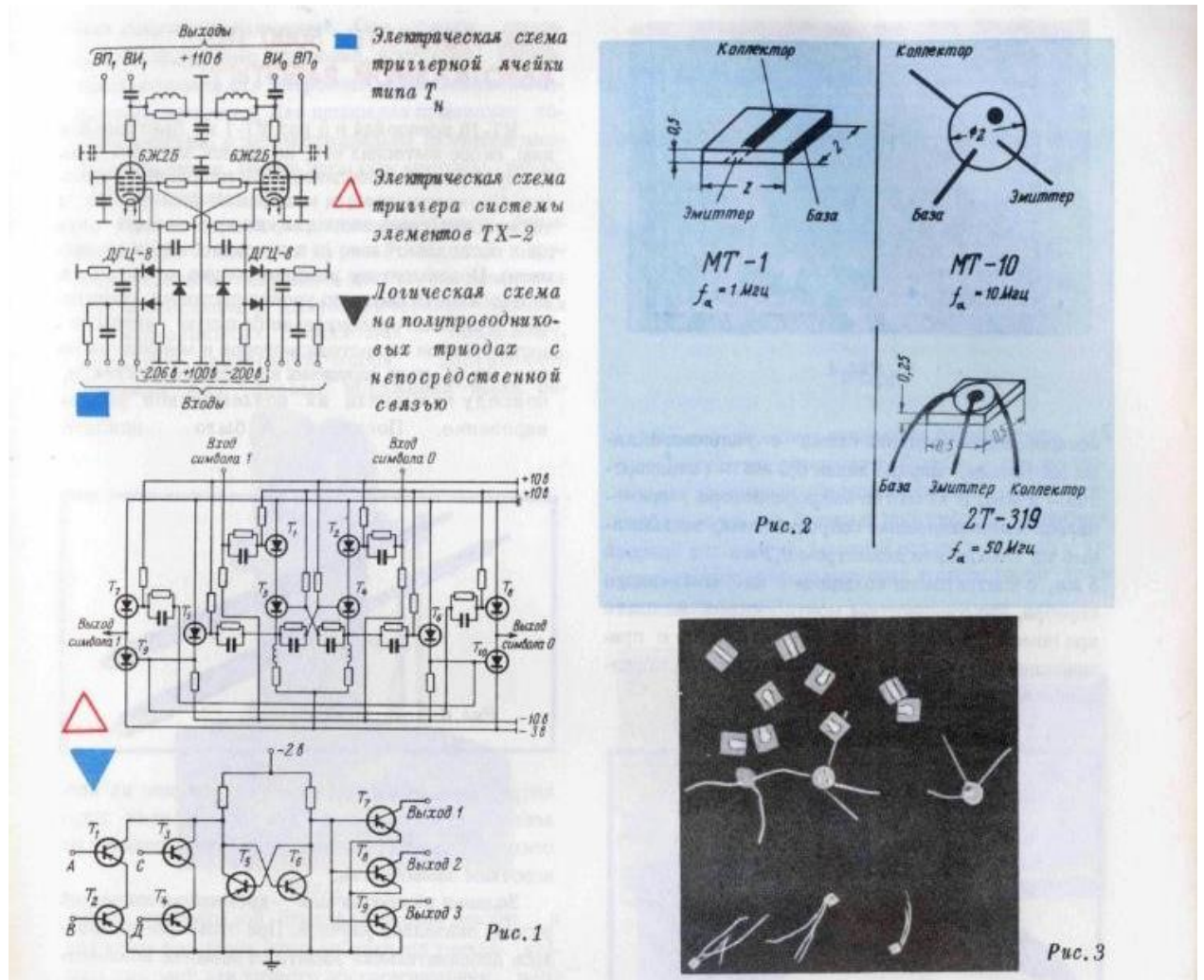
¹ Публикуемая статья является первой из серии статей, посвященных микроэлектронике в вычислительной технике — ее прошлому, настоящему и будущему.

сократить количество деталей, или уменьшить их размеры. Уменьшить количество логических ячеек можно только ценой значительного уменьшения эффективности машины, что подтвердилось дальнейшими разработками. Остается искать пути микроминиатюризации всех деталей, а также упрощения схем логических и запоминающих ячеек, которые составляют большую часть машины. Уменьшить габариты всех деталей в сотню или тысячу раз, а с ними и несущие конструкции—значит во столько же раз уменьшить машину. Но если потребляемую мощность оставить прежней, то получится не вычислительная машина, а печка. Встал вопрос: можно ли в принципе уменьшить энергетический уровень работы логических и запоминающих ячеек и если да, то как. Эти размышления положили начало развитию такого направления микроэлектроники, как микросхемотехника.

Ватты в милливатты. На рис.1 наглядно представлено, как развитие микросхемотехники отразилось на эволюции схемы логического регистра. На верхнем рисунке — классическая ламповая схема, в середине — схема, которая в то время называлась транзисторной, но по существу являлась транзисторным вариантом ламповой схемы. Она, как видно, потребляет мощность на порядок меньшую, чем ламповая схема. А схему, размещенную внизу, можно назвать микроэлектронной, так как у нее потребляемая мощность и номенклатура деталей сведены к минимуму. Она основана на использовании важной особенности транзисторной характеристики в области насыщения, где коллекторное напряжение составляет около 50 мв и значительно ниже базового напряжения закрытого триода. Уровень потребляемой мощности уже в 1000 раз ниже, чем у ламповых схем, и, если сделать плотность компоновки этих ячеек в 1000 раз больше, чем у ламповых, интенсивность нагрева аппаратуры была бы одинакова. Но как достичь такой плотности?

Грамы - в миллиграммы, тонны – в килограммы. Малая номенклатура деталей микроэлектронной схемы упростила проблему микроминиатюризации - надо создавать микротранзисторы, микрорезисторы и разрабатывать способ плотного соединения. Задача создания микротранзистора была решена применением одного из основных принципов микроэлектроники – «интегрализации средств защиты». Объем монокристалла в

транзисторе в несколько тысяч раз меньше, чем общий объем его корпуса. Нужно создать транзистор с той минимальной индивидуальной защитой,



которая необходима для дальнейших операций с ним, а оставшуюся защиту обеспечить на последующих уровнях сборки. Так родились бескорпусные микротранзисторы. Некоторые представители этого типа показаны на рис. 2 и 3. Интересно отметить, что в первом из них была заложена прогрессивная идея беспроводного монтажа — не совсем «перевернутый кристалл» - но, увы, коллектор и эмиттер у германиевых транзисторов выходили с противоположных сторон.

За несколько лет «до нашей эры». Разработка микротранзисторов МТ-1 и МТ-10 (по сегодняшним нормам примитивных) позволила, однако, создать функционально полный ряд микросхем, разработать и изготовить

миниатюрные машины на них за несколько лет до эры гибридных полупроводниковых интегральных схем.

На рис. 4 представлены типовые плоские микросхемы. В них были осуществлены оригинальные решения: эпоксидно-гетинаксовая дешевая основа со стандартной сеткой отверстий, двусторонняя посеребрённая печатная схема с гальваническими пистонами, ширина линии 0,5 мм (стандартная — 2 мм). В качестве микрорезистора применялись композиционные сопротивления, выполненные на стеклоните диаметром 0,2 мм и длиной 3 мм, с контактными кольцами из вожжённого серебра. Микрорезисторы монтировались на плате при помощи серебряной пасты (контактола) с применением специально сконструированного шприцкарандаша (рис. 5, а).

Выдавливая из шприца на контактные площадки капельки пасты объемом в $0,05 \text{ мм}^3$, оператор точно и быстро вставлял ниточное сопротивление в капельки и сверху добавлял вторую капельку (рис. 5, б). Такое своеобразное резервирование контакта дало надежность, значительно превышающую надежность паяных контактов.

Как получить 5000 лет безотказной работы? МТ-10, превзойдя в 5 раз МТ-1 по быстрдействию, скоро вытеснил его, но повлек за собой проблему надежного соединения 50-микронных выводов. На помощь пришли микропаяльники (рис. 6), а также идея применения для каждого вывода

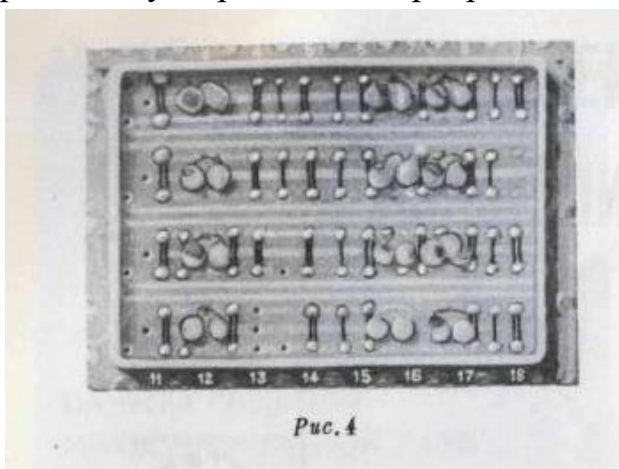


Рис. 4

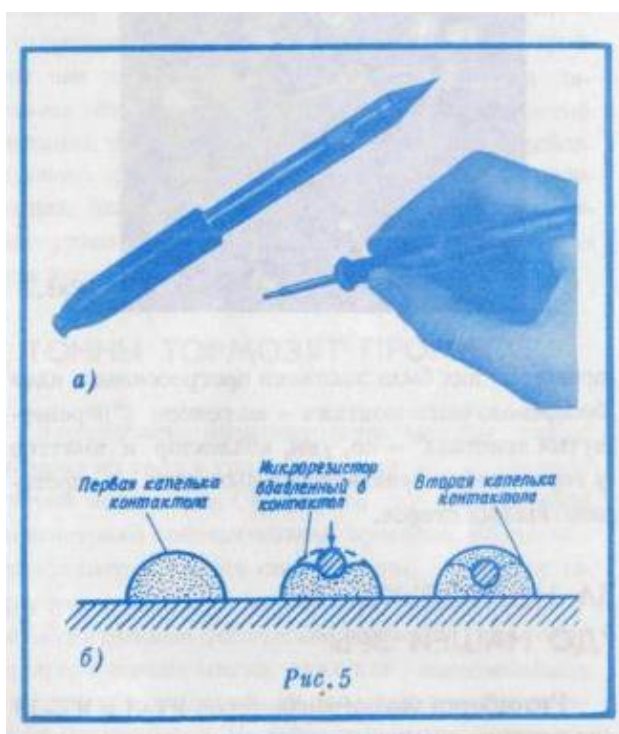
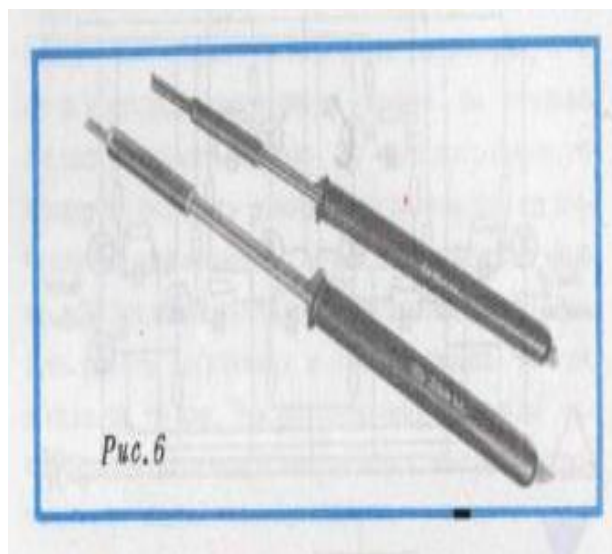


Рис. 5

двух паек последовательно (и в пространстве, и во времени). Поэлементное резервирование пайки подняло надежность почти до уровня пастовых соединений. Учитывая сравнительно большую интенсивность отказов микротранзисторов и микрорезисторов из-за нарушения внутреннего контакта, повсюду применяли их поэлементное резервирование. Поскольку было принято напряжение питания 1,5—3 в и напряжение на коллекторе не превышало 1 в (на порядок ниже допустимого), практически не наблюдалось отказов по коротким замыканиям.

Заливка из прозрачной кремнийорганической резины оказалась удачной. При этом обеспечивалась дополнительная защита от внешних воздействий; все микроэлементы легко амортизировались, были видны все технологи-



ческие отклонения, обеспечивались полная ремонтоспособность и 100%-й выход годных даже после «суровых испытаний». Это позволило получить (после отработки технологических процессов) сложные 24-транзисторные микросхемы с рекордной надежностью: 50 млн. ч на отказ для одной микросхемы или 600 млн. ч на отказ для одной логической ячейки НЕ-ИЛИ при критических условиях испытаний.

Однако эти схемы еще нельзя было считать интегральными, хотя над проблемой их создания разработчики бились уже давно.

Светлая мечта микроэлектроники. Разработчики хотели создать технологию получения многослойных гибридных интегральных микросхем одной последовательностью однородных вакуумных напылений. Они создали специальные вакуумные установки, в которых размещали подложки для микросхем и источники испаряемого вещества. Для испарения применяли токовый нагрев, а затем специально созданные электронные пушки. Позже напыляли методом катодного распыления.

Одна из первых установок вакуумного напыления 1959 г. показана на рис. 7. На этой и других установках получались достаточно качественные резистивные и диэлектрические пленки на полированных ситалловых подложках. Проблема прилегания масок достаточной толщины без теневых искажений была решена разработкой биметаллических масок: к толстому несущему слою добавлялся тонкий консольный слой для точного воспроизведения геометрии рисунков. Немаловажным оказался накопленный опыт по точному совмещению последовательности рисунков. Проблема совмещения продолжает быть актуальной и в самых современных процессах микроэлектроники.

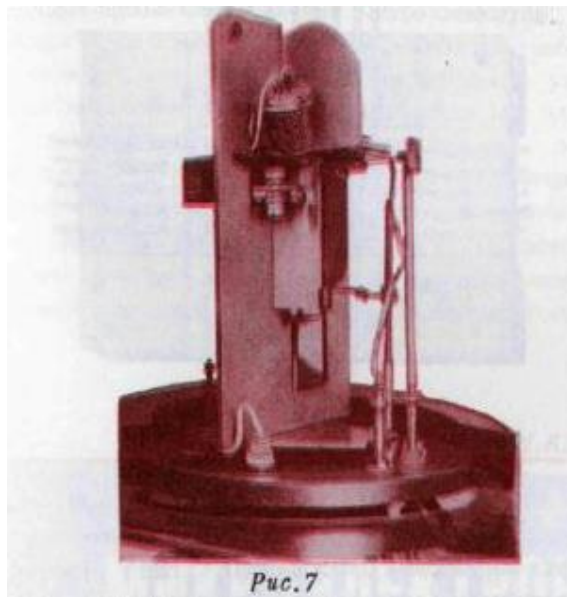


Рис. 7

Сложнее, чем казалось. Об оптимизме раннего периода развития тонкопленочной технологии свидетельствует 14-слойная (!) пассивная схема (рис.8), разработанная для гибридных схем. В дальнейшем 14 слоев с емкостями переработали в 5 слоев без емкостей и потом в 3 слоя, которые наконец-то дали надежные результаты в производстве и в эксплуатации.

Поиск тонкопленочных транзисторов увенчался успехом в том смысле, что были получены тонкопленочные триоды с пентодной характеристикой (рис. 9).

Однако широкому внедрению их помешали два фактора: затяжной характер борьбы с релаксационными явлениями — одной из главных причин нестабильности — и быстрый

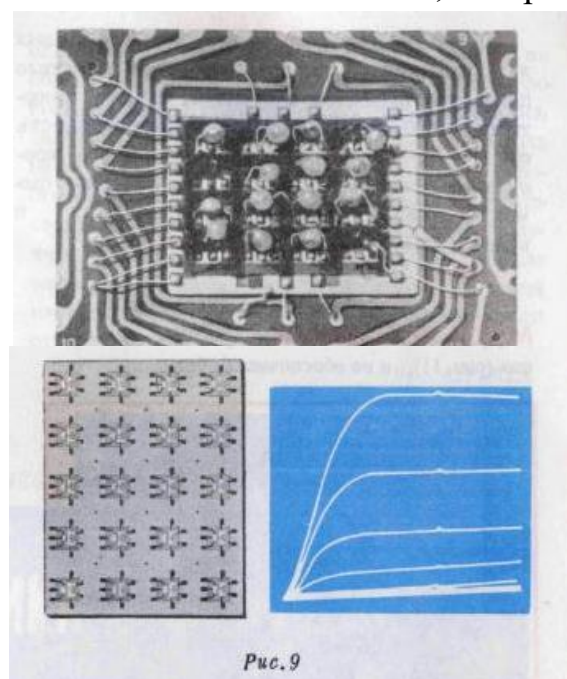
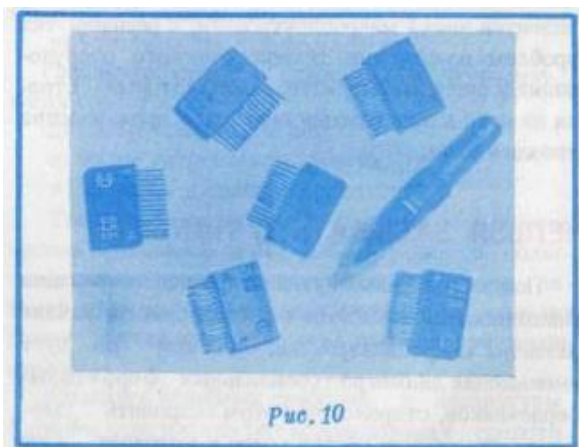


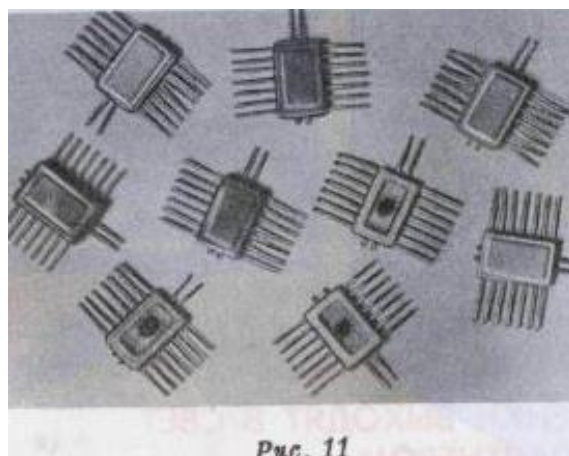
Рис. 9

прогресс в транзисторной технологии, который оставил скромную характеристику тонкопленочных транзисторов далеко позади.

Плёнки выходят на свет с партнёром. Наконец-то налаживается промышленный выпуск ряда логических интегральных схем на основе тонкопленочной гибридной технологии (Рис. 10). Применение микротранзисторов в фольговых ячейках с ориентированными выводами упростило приварку к тонкопленочной схеме, создало амортизацию и обеспечило большую влагостойкость при использовании залитого металлического корпуса. Плотность компоновки в этих гибридных схемах была не ниже, чем у схем, выпускаемых в корпусе ТО-5.²



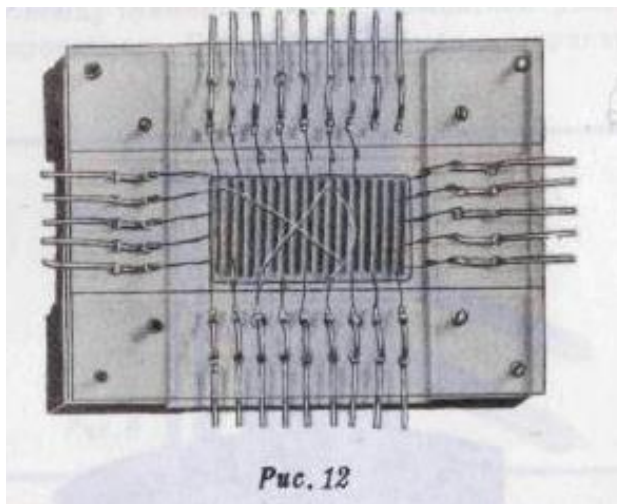
Муки рождения. Быстрый прогресс в транзисторной технике создал необходимые предпосылки для разработки чисто интегральных схем. Среди первых разработок стоит упомянуть интегральные схемы под названием Р-10, состоящие из двух транзисторов и трех резисторов на одной германиевой пластине. Первой кремниевой интегральной схемой оказалась микросхема ТС-100 из. 4-8



² Здесь, я считаю, стоит отметить три аспекта. Во-первых, этим пассажем автор закрывает тему тонкопленочной технологии, переданной, надо отметить, вместе с оборудованием в НЦ в Зеленоград. На нём, кстати, там был сделан приёмник «Эра», прототип которого Ф.Г. Старос показывал Н. С. Хрущёву в 1962 году. Но на этой технологии Ф. Г. Старосу не удалось создать следующее за УМ-2 поколение управляющих ЭВМ, несмотря на значительные усилия в 1962-1963 годах. Во-вторых, опыт, полученный «на тонких плёнках» был применён при создании элементной базы машины УМ-2, также показавшей выдающиеся для своего времени результаты по надёжности и сданной Государственной комиссии в 1964 году. И, наконец, в-третьих, видимо уже понимая тупик тонкопленочной технологии в этот период Ф. Г. Старос и И. В. Берг, обращая внимание на успехи полупроводниковой транзисторной технологии, создают лабораторию, а в 1964 году отдел полупроводниковой технологии, работа которого дала возможность разработать в 1968 году первую в стране серию МОП-интегральных схем (серия 120), а в 1970 – первые в стране оригинальные БИС и калькулятор «Электроника 2471» на них. (Прим. ред.)

транзисторов в схемах с непосредственной связью. Хотя эти схемы, размещенные в металлокерамических корпусах (рис. 11), и не обеспечивали большого процента выхода годных, а также не отличались высокой надежностью, они сыграли большую роль в развитии нашей микроэлектроники, в решении тех проблем по созданию технологического оборудования и специальных материалов, которые стояли на пути к организации серийного производства твердых схем.

Нельзя забывать о памяти. Поиски различных путей микроминиатюризации запоминающих элементов велись с самого начала развития микроэлектроники. Одни шли по пути уменьшения диаметра тороидальных ферритовых сердечников, стараясь при этом сохранить элемент механизации сборки колец в матрицах (это удалось только для предельных диаметров 2 и 1 мм). Другие



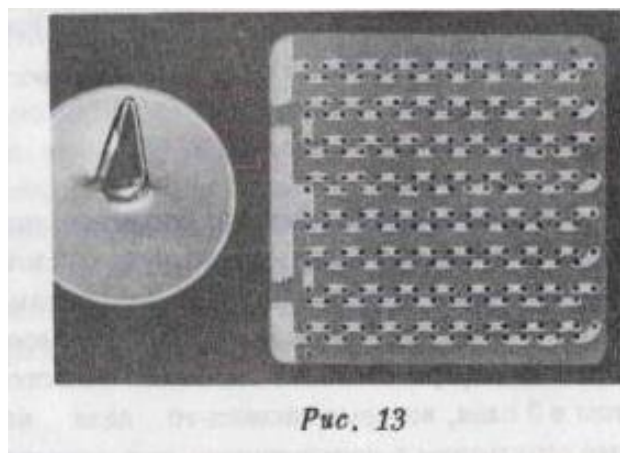
искали технологию создания плоских матриц из пятен ферромагнитного сплава, бились над проблемами однородности и повторяемости и, естественно, над задачей создания схем управления. Третьи создавали запоминающие матрицы на ферроэлектрических материалах поликристаллических и монокристаллических (рис. 12), но не смогли сделать гистерезисную петлю независимой от сигналов опроса. Иные искали криотронные элементы и работают над ними до сегодняшнего дня.

Некоторые³ вели поиск магнитных интегральных схем, положив в основу идею многоотверстных ферритовых пластин (МФП), где отдельные ферритовые сердечники заменяются отверстиями. На одной пластине оказалось возможным разместить 256 отверстий диаметром 0,28 мм, которые

³ Удивительно, что и в этом случае автор статьи не упоминает авторов одного из блестящих инженерных решений – себя и И. В. Берга. Это решение дало вооружённым силам СССР интегральный блок оперативной памяти высокой радиационной устойчивости, освоенный девятью заводами страны и выпущившийся около 40 лет (и использовавшийся, в том числе, в боевой информационно-управляющей системе (БИУС) «Узел» - МВУ-110). Р. Лашевский, В. Хавкин, Р. Лаврентьев. Электронная память. <https://memoclub.ru/2014/09/u-istokov-integralnoy-elektroniki-2> (Прим. ред.)

получаются одной ультразвуковой прошивкой за 30 сек (рис. 13).

Последовательная прошивка отверстий проволокой на каждой пластине заменяется микропечатной схемой. При сборке накопителя набирают пакет из таких пластин и пропускают по одному проводнику в каждую серию совмещенных отверстий.



Поскольку отверстия получают прошивкой «спечённых» пластин при помощи точного инструмента, совмещение получается весьма точным. Применение МФП позволило получить запоминающие ячейки, меньшие по размеру, чем ячейки, получаемые в виде отдельных сердечников, и, как показало серийное производство, значительно более технологичные при сборке.

Всё должно быть соединено вместе. По мере увеличения степени микроминиатюризации проблема соединения микроэлементов микросхемы и микросхемы в узлы и блоки требовала новых решений. Элемент соединения уже стал рассматриваться профессионалами как элемент, не менее важный, чем всякие другие, поскольку он также стоит денег и может дать отказ. Основные силы направлялись на поиск упорядоченных групповых соединений элементов. Односторонние печатные схемы даже с утонченной линией занимали большую площадь, чем элементы. Тогда на печатных схемах разместили второй слой (на обратной стороне), а для соединения печатных проводников между схемами с двух сторон пришлось делать в каждой плате много отверстий — задача не из легких! С учетом этого серьезного недостатка параллельно велись исследования фоточувствительных эмалей. При их помощи были получены многослойные печатные схемы, где каждая медная схема наносилась сверх слоя фигурной изоляции, соединяясь с предыдущей схемой через отверстия в изоляции.⁴

⁴ Трудно понять почему автор обратился к этой теме лишь спустя десятилетие. В этот период Ленинградское Конструкторское бюро под руководством Ф. Г. Староса и И. В. Берга уже приступило к завершающей части Государственных испытаний БИУС «Узел» в г. Лиенае для подводной лодки (ПЛ) проекта 641 и развернуло работу по созданию первых отечественных больших интегральных схем и микрокалькулятора на их основе, получившего название «Электроника 2471». Но она всё равно ценна тем, что показывает, как эти выдающиеся инженеры и учёные пришли к созданию элементной базы для ЭВМ.

Наряду с этим оригинальным методом была разработана технология получения многослойных схем из отдельных тонких печатных листов с последующей склейкой, пробивкой и пистонированием.

Такова история получения ряда элементов, обходимых для создания компактных, высоконадежных вычислительных машин.

Статья поступила 26 декабря 1969 г.

УДК 621.382.8

УМ-2 – основы БИУС «Узел», находившейся на вооружении ВМФ СССР и РФ с 1972 года по начало 2000-х годов под серийным индексом МВУ-110. Ю. Маслеников. «Импортозамещение – экскурс в предысторию. <https://d-russia.ru/importozameshhenie-jekskurs-v-predystoriju.html>. (Прим. ред.)