

А. И. ИЛЬЕНКОВ, М. П. ЦАПЕНКО
(Новосибирск)

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ

Кратко характеризуется состояние микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры; рассматриваются некоторые существующие микроминиатюрные элементы. Обсуждаются специфические элементы измерительной техники и возможные достоинства микроминиатюризации измерительной аппаратуры. Обращается внимание на необходимость развертывания исследований по созданию в микроминиатюрном исполнении наиболее важных для измерительной техники элементов и измерительной аппаратуры в целом.

В последнее время вопрос микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры стал одним из самых злободневных вопросов электроники. Основной причиной, послужившей толчком к микроминиатюризации, явилась необходимость уменьшения размеров и веса аппаратуры. Эти требования наиболее остро встали при создании электронных вычислительных машин (ЭВМ), содержащих большое количество идентичных элементов. Именно в этой области впервые возникла настоятельная необходимость в резком уменьшении габаритов, веса и потребляемой мощности. Достаточно вспомнить, что первые образцы ЭВМ занимали сравнительно большие помещения, а потребляемая ими мощность составляла десятки и сотни киловатт. Интенсивные поиски новых принципов построения электронных схем привели к появлению нового направления в электронике — микроэлектроники.

Термин «микроминиатюризация» весьма широк по своему содержанию, и необходимость в установлении каких-то условных границ его применения вполне очевидна. Наиболее удобным критерием для определения этих границ является плотность упаковки, т. е. число элементов, размещаемых в единице объема. Общепринятой граничной величины плотности упаковки, которая определяла бы применимость термина, еще нет; разные авторы приводят величины, сравнительно близкие друг к другу. Можно считать, что к микроминиатюрным относятся схемы с плотностью упаковки, превышающей 3—5 элементов/см³. Сравнение возможных плотностей упаковки при различных методах конструирования электронной аппаратуры дано в таблице [1].

Указанные плотности упаковки являются ориентировочными, причем принимается, как обычно, что элемент занимает объем в виде куба (объем, занимаемый его выводами, контактами и т. п., не учитывается). Исходя из изложенного выше, следует считать, что микроминиатюрные схемы можно создавать тремя последними методами конструирования (см. таблицу). Критерием перспективных возможностей микромини-

тюризации может служить человеческий мозг, являющийся образцом сложного устройства, в котором плотность упаковки достигает 10^7 элементов/см³. Ни один метод микроминиатюризации, даже из числа еще только исследуемых в настоящее время, пока не может обеспечить плотность упаковки, достигнутую живой природой в процессе эволюции.

В настоящее время к числу задач, решаемых при микроминиатюризации, можно отнести также повышение надежности, снижение стои-

Вариант исполнения схемы	Число деталей в 1 см ³
Обычные лампы и детали	0,05
Миниатюрные лампы и обычные детали	0,2
Сверхминиатюрные лампы и миниатюрные детали	0,4
Полупроводниковые приборы и сверхминиатюрные детали	1,2
Микромодули	20,0
Тонкопленочные схемы	100,0
Интегральные схемы, функциональные блоки	1200,0

мости изготовления аппаратуры, уменьшение потребляемой мощности и увеличение функциональных возможностей, которые могут быть реализованы в данном объеме электронной аппаратуры.

Интенсивные поиски новых методов микроминиатюризации и новых принципов построения электронных схем, предпринятые в ряде стран, увенчались столь большими успехами, что теперь можно говорить о применении микроэлектронных схем не только в ЭВМ, но и в промышленной аппаратуре. В связи с этим несомненный интерес представляет оценка перспектив распространения достижений микроэлектроники и в

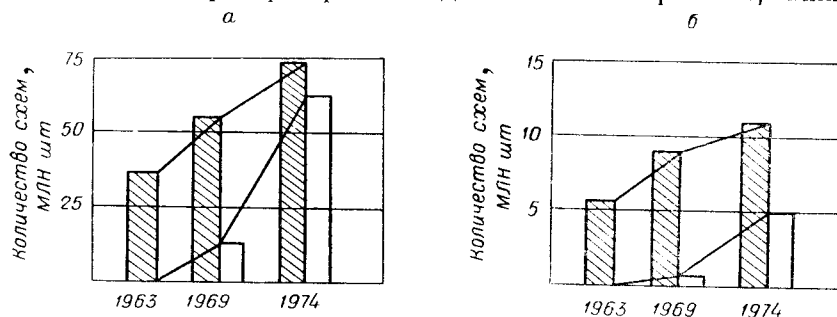


Рис. 1. Перспективы применения микроэлектронных схем: заштрихованная часть — принципиально возможный объем применения микроэлектроники, незаштрихованная — ее прогнозируемое внедрение; а — в электронных вычислительных машинах, б — в измерительной аппаратуре.

области промышленной радиотехнической аппаратуры*. На рис. 1 приведены две диаграммы, характеризующие перспективы применения микроэлектронных схем в ЭВМ и измерительных приборах. Как видно из рис. 1, в 1963 году микроэлектронные схемы еще не применялись в измерительных приборах. В 1969 году ожидается появление небольшой части измерительных приборов, основанных на использовании микроэлектроники. Характерно, что в 1974 году примерно 40% потенциа-

* IEEE Spectrum, 1964, № 6, p. 63—101.

ных возможностей микроминиатюризации измерительной аппаратуры будет реализовано. Естественно, что прогнозировать вперед на десяток лет такую быстроразвивающуюся область, как микроэлектроника, очень трудно. Тем не менее, считать величину 40% явно завышенной пока веских оснований нет.

К числу основных направлений развития микроминиатюризации следует отнести модульное и микромодульное конструирование с использованием печатного или сварного монтажа, твердые схемы и функциональные блоки. Модульное исполнение узлов аппаратуры осуществляется путем рационального конструирования с использованием обычных радиодеталей. Микромодули собираются из деталей унифицированной геометрии. Твердые схемы, в свою очередь, можно подразделить на тонкопленочные, интегральные и гибридные. В тонкопленочных схемах все пассивные элементы и соединения между ними получают на изоляционной подложке методами напыления, осаждения и т. п. В интегральных схемах активные и пассивные элементы, а также соединения создают в полупроводниковом материале или диффузией или методами эпитаксиальной технологии. Гибридные схемы представляют собой сочетание тонкопленочных схем либо с миниатюрными полупроводниковыми приборами, либо с интегральными схемами. Работа функциональных блоков основана на использовании физических свойств твердых тел, связанных с явлениями, протекающими внутри молекул вещества или между ними. Исследование и разработка функциональных блоков находится еще только в начальной стадии.

Следует отметить, что приведенное разграничение твердых схем является весьма условным. Например, в тонкопленочных схемах могут применяться уже реально существующие тонкопленочные диоды и триоды, а в интегральных схемах иногда используются принципы функциональных блоков.

Методы микроминиатюризации измерительной аппаратуры

Все упомянутые выше методы в принципе можно использовать для микроминиатюризации электронной измерительной аппаратуры. Однако нельзя забывать, что производство измерительной аппаратуры имеет свои специфические особенности, которые надо учитывать при выборе наиболее подходящего метода.

Перечислим эти специфические особенности. Во-первых, измерительную аппаратуру невозможно создать без некоторых специальных элементов (датчиков, образцовых мер и т. п.), которые еще недостаточно разработаны в микроминиатюрных вариантах. Во-вторых, особое значение имеют хорошие метрологические характеристики измерительной аппаратуры, еще требующие серьезного исследования в случае микроминиатюризации последней. В-третьих, для достижения необходимых характеристик весьма часто приходится прибегать к настройке аппаратуры во время ее изготовления путем изменения параметров некоторых элементов. Естественно, что изменение параметров микроминиатюрных элементов требует большего времени, а иногда и вообще невозможно. В-четвертых, номенклатура измерительных приборов и систем необычайно широка, что затрудняет, а порой и исключает возможность унификации узлов и блоков аппаратуры.

Перейдем теперь к анализу возможностей использования в измерительной технике упомянутых ранее методов микроминиатюризации, учитывая перечисленные специфические особенности.

Модульное конструирование с использованием обычных радиодеталей и печатного монтажа пока еще наиболее часто применяется в измерительной аппаратуре. Модули могут выполняться в нескольких конструктивных вариантах. Наиболее простая конструкция представляет собой плату с печатным монтажом, вдоль поверхности которой располагаются элементы схемы. Однако при этом между элементами остается относительно много неиспользуемого пространства. В другой конструкции элементы схемы помещаются в углублениях или прорезях, сделанных в плате с печатным монтажом. Небольшое повышение плотности упаковки в этом случае достигается за счет замещения части объема платы, несущей печатный монтаж, объемом элементов схемы. Встречаются и «трехразмерные» конструкции модулей, в которых элементы схемы располагаются почти вплотную друг к другу боковыми сторонами. Выводы элементов, расположенные большей частью на торцах, соединяются с платами, на которые нанесен соответствующий печатный монтаж. Таким образом, в этих модулях элементы схемы располагаются весьма компактно между двумя платами.

Модульное конструирование не обеспечивает достаточно высокой плотности упаковки (см. таблицу), и поэтому оно не является перспективным для промышленного изготовления измерительной аппаратуры.

Микромодули собираются из миниатюрных элементов с идентичной геометрией. Эти элементы располагаются на квадратных или круглых керамических (иногда стеклянных) пластинках. Размеры пластинок и расположение мест для присоединения внешнего монтажа совершенно идентичны для различных элементов. На таких пластинках можно помещать сопротивления, емкости, трансформаторы, дроссели, полупроводниковые приборы и др. При сборке микромодулей из таких элементов последние укладываются стопкой в соответствующей последовательности, затем выполняется монтаж между элементами и герметизация микромодуля в целом. Таким образом, микромодуль представляет собой каскад электронной аппаратуры со всеми необходимыми элементами схемы. Для изготовления микромодулей такой конструкции, как правило, требуется специальное оборудование.

Применение микромодулей позволяет примерно на порядок повысить плотность упаковки элементов (см. таблицу), которая все же остается относительно низкой. Микромодули можно использовать как для промышленного изготовления измерительной аппаратуры, так и для создания лабораторных макетов. Номенклатура серийно выпускаемых микромодулей не очень широка, поэтому зачастую возникают затруднения в подборе микромодулей, обладающих необходимыми функциональными характеристиками. Применение микромодулей, по-видимому, следует считать промежуточным этапом микроминиатюризации измерительной аппаратуры. Однако среди современных направлений микроминиатюризации микромодульное конструирование пока остается наиболее подготовленным для промышленного внедрения.

Максимальная степень микроминиатюризации в настоящее время достигается благодаря применению твердых схем (см. таблицу). При оценке перспектив использования твердых схем в измерительной аппаратуре необходимо учитывать их конструктивно-технологические особенности. Рассмотрим несколько подробнее тонкопленочные и интегральные схемы.

Пассивные элементы тонкопленочных схем могут изготавливаться методами вакуумного напыления, электрохимического осаждения, катодного распыления и др., а известные в настоящее время тонкопленочные активные элементы — методом вакуумного напыления. Это открывает

заманчивые перспективы создания полностью тонкопленочных схем в течение одного цикла вакуумного напыления. Смена масок и испаряемых материалов может осуществляться без нарушения вакуума. Для промышленного изготовления тонкопленочных схем наиболее подходящими являются, по-видимому, вакуумные установки конвейерного типа, в зонах которых можно размещать разные маски и испарители с соответствующими материалами.

Для изготовления тонкопленочных схем, выполняющих различные функции, необходима лишь смена масок, а материалы, технологические операции и оборудование остаются практически одними и теми же. Эта специфика тонкопленочных схем является весьма привлекательной для создания микроминиатюрной измерительной аппаратуры, если учитывать широкую номенклатуру измерительных приборов.

По своей геометрии тонкопленочные схемы напоминают схемы с печатным монтажом, в частности, по расположению соединений между элементами. Следовательно, все основные приемы конструирования схем с печатным монтажом могут быть перенесены и на тонкопленочные схемы. Кроме того, лабораторное макетирование с использованием отдельных элементов и печатного монтажа позволяет максимально приблизиться к условиям работы будущей тонкопленочной схемы, главным образом, в отношении расположения элементов и взаимных связей между ними.

Следует отметить еще одну особенность тонкопленочных схем, а именно возможность подгонки параметров элементов до необходимых значений за счет изменения их геометрических размеров путем удаления части элемента электролитическим травлением, испарением с помощью электронного или лазерного луча, механическим соскабливанием и др. Таким образом, имеется реальная возможность настройки тонкопленочных схем после их изготовления.

Для получения интегральных схем обычно используется планарная технология, часто применяемая при производстве полупроводниковых приборов. Планарная технология обеспечивает создание приборов, у которых все выводы расположены на одной стороне полупроводниковой пластины. Это достигается введением легирующих примесей лишь через одну поверхность кристалла. Использование оксидных масок позволяет осуществлять диффузию примесей только в избранных местах поверхности полупроводниковой пластины, с которых предварительно удаляется слой окисла. Применяется также метод эпитаксиального роста, при котором на низкоомной подложке наращивается высокоомный монокристаллический слой, повторяющий структуру подложки.

Сопrotивления в интегральных схемах обычно получают путем диффузии соответствующих легирующих примесей на определенных участках полупроводниковой пластины. Величина сопротивления определяется размерами этого участка и концентрацией примесей. Для получения емкостей пользуются двумя методами. Во-первых, используется емкость $p-n$ перехода, на который подано напряжение в обратном направлении. Недостатком этого метода является зависимость величины емкости от приложенного напряжения. Во-вторых, в качестве диэлектрика используется слой окиси полупроводника, например, двуокиси кремния, на который через маску напыляется слой металла, являющийся одним из электродов конденсатора. Вторым электродом служит материал подложки. Активные элементы интегральных схем (диоды и триоды) имеют планарную конструкцию. Соединения между элементами получают либо в объеме полупроводниковой пластины путем диф-

фузии, либо на ее поверхности с помощью напыления металла на слой оксида.

Интегральные схемы по сравнению с тонкопленочными имеют больше паразитных связей, устранение которых связано со значительными трудностями и даже не всегда возможно. Для уменьшения паразитных связей интегральные схемы конструируют так, чтобы между элементами образовывались *p-n* переходы, причем эти переходы во время работы схемы должны находиться под напряжением, которое запирает их. Это в значительной степени усложняет проектирование интегральных схем.

Для изготовления интегральных схем требуется более разнообразное оборудование (печи для диффузии, вакуумные установки для напыления, электрохимические ванны для травления и т. п.). Подгонка параметров элементов в интегральных схемах очень сложна и во многих случаях практически нецелесообразна. Однако в этих схемах достигается значительно большая плотность упаковки и, как предполагают, большая надежность.

В качестве примеров практического использования интегральных и тонкопленочных схем можно привести микроминиатюрную ЭВМ Univac 1824 (рис. 2), разработанную американской фирмой Sperry Rand [2], и тонкопленочный сканирующий генератор [3], в котором на площади менее 1 см^2 расположено 30 каскадов (60 триодов, 60 сопротивлений и по 30 диодов и конденсаторов).

Обобщая сказанное выше и учитывая специфические особенности электроизмерительной аппаратуры, можно сделать следующее предположение. Модульное конструирование с использованием обычных элементов и печатного монтажа будет применяться в основном при макетировании новых измерительных устройств в лабораторных условиях.

Микромодульное конструирование, хотя и является промежуточным этапом микроминиатюризации измерительной аппаратуры, в течение нескольких ближайших лет будет основным методом создания измерительных устройств в промышленных условиях. Дальнейшая микроминиатюризация измерительной аппаратуры будет развиваться на базе использования твердых схем. Из числа твердых схем наиболее подходящими следует считать полностью тонкопленочные схемы, т. е. схемы, в которых все элементы, как активные, так и пассивные, включая соединения между ними, создаются в тонкопленочной форме. Предпочтение, отдаваемое тонкопленочным схемам, обусловлено их конструктивно-технологическими особенностями, в наибольшей мере соответствующими специфике изготовления и эксплуатации измерительной аппаратуры. Поэтому в дальнейшем изложении мы остановим свое внимание главным образом на микроминиатюрных элементах и схемах в тонкопленочном исполнении.

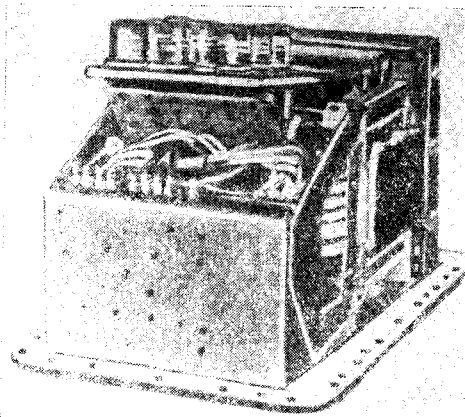


Рис. 2. Микроминиатюрная ЭВМ Univac 1824:

в машине используются только интегральные схемы, а в запоминающем устройстве — тонкие пленки; вес машины менее 20 кг, размеры — примерно $39 \times 24 \times 21$ см, потребляемая мощность 140 вт.

бенностями, в наибольшей мере соответствующими специфике изготовления и эксплуатации измерительной аппаратуры. Поэтому в дальнейшем изложении мы остановим свое внимание главным образом на микроминиатюрных элементах и схемах в тонкопленочном исполнении.

Следует оговорить, что в настоящей статье мы не рассматриваем подробно вопросы технологии изготовления тонкопленочных схем, поскольку они описаны в литературе, например [4].

Основные характеристики микроминиатюрных элементов

Рассмотрим кратко характеристики некоторых микроминиатюрных элементов в основном в тонкопленочном исполнении, которые могут найти применение в измерительной аппаратуре.

Номинальные значения сопротивлений, чаще всего применяемых в тонкопленочных схемах, находятся в пределах от сотен омов до десятков килоомов. Эти значения воспроизводятся с погрешностью 5—10%. Индивидуальная подгонка сопротивлений путем изменения размеров пленки позволяет получать отклонение от номинального значения порядка 0,1%. Тонкопленочные сопротивления могут иметь как положительные, так и отрицательные значения температурного коэффициента сопротивления (около $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$), а их старение составляет доли процента за 1000 часов работы.

Точность воспроизведения емкости тонкопленочных конденсаторов, получаемых испарением в вакууме, составляет 15—20%, что обусловлено сложностью контроля за толщиной и диэлектрической постоянной диэлектрика в процессе его нанесения. Температурный коэффициент емкости таких конденсаторов положительный и примерно равен $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. Тонкопленочные конденсаторы имеют относительно большое последовательное сопротивление (от единиц до десятков омов).

Тонкопленочные активные элементы (диоды и триоды) пока еще находятся в стадии лабораторных исследований. Следует, однако, отметить, что тонкопленочные триоды с изолированным затвором имеют, например, входное сопротивление на постоянном токе порядка 10^6 — 10^{12} ом и малые шумы, сравнимые с шумами сопротивлений.

Основные электрические характеристики таких элементов и перспективы использования их в измерительной аппаратуре более подробно обсуждаются в других статьях этого номера журнала.

В последнее время в измерительных приборах все чаще необходимо применять устройства, выполняющие логическую обработку и хранение информации. Для осуществления этих операций можно использовать тонкие ферромагнитные пленки. Весь опыт построения таких устройств для ЭВМ может быть полностью применен и для создания измерительной аппаратуры. Кроме того, тонкие магнитные пленки могут служить чувствительным индикатором постоянных, синусоидальных и импульсных магнитных полей. Одна из основных трудностей, которую необходимо преодолеть, заключается в значительном различии магнитных свойств разных партий изготавливаемых пленок. Свойства тонких ферромагнитных пленок, а также их применение в запоминающих и логических устройствах достаточно подробно описаны в литературе, например, в [5, 6].

На основе известного явления сверхпроводимости при низких температурах можно создавать тонкопленочные приборы, характеристики которых являются привлекательными для использования в измерительной аппаратуре.

К числу таких приборов относится криотрон [7], являющийся полупроводниковым переключателем, переходящим из сверхпроводящего состояния в обычное под воздействием магнитного поля, возникающего при протекании управляющего тока. Сопротивление криотрона изменяется от почти нулевого значения до 10^{-3} — 10^{-1} ом, поэтому влияние ем-

костей очень мало и переходный процесс определяется в основном величиной L/R . Индуктивность составляет 10^{-12} — 10^{-10} гн. Выходное напряжение зачастую бывает менее милливольт при сравнительно большом управляющем токе 0,5—1,0 а. Однако усиление таких малых напряжений облегчается тем, что криотрону присущи очень малые шумы.

Интересными характеристиками обладает криосар [8], являющийся полупроводниковым прибором, в котором используется низкотемпературный лавинный пробой, обусловленный ударной ионизацией примесей. Вольт-амперная характеристика криосара имеет резко выраженный участок насыщения. При изменении напряжения от 0,3 до 0,5 в величина тока изменяется на 7 порядков (от 10^{-8} до 10^{-1} а). Криосары из компенсированного германия имеют область отрицательного сопротивления. Они могут переключаться импульсами длительностью $2 \cdot 10^{-9}$ сек; время переключения их меньше 100 нсек.

Криогенные приборы с тремя электродами [9], один из которых является управляющим, получили название криосисторов. Криосисторы имеют вольт-амперную характеристику N -типа. Длительность нарастания тока составляет десятки наносекунд, а спада — единицы наносекунд. Амплитуда переключающих импульсов зависит от конструкции криосистора и изменяется в пределах 2—10 в. На основе криогенных элементов можно создавать схемы переключателей, усилителей импульсов, триггеров, мультивибраторов, а также различные логические схемы. Тонкопленочные криогенные элементы занимают площадь менее 1 мм².

Ведутся исследования микроминиатюрных элементов в виде фотопроводящих и электролюминесцентных пленок соответственно из сернистого кадмия и сернистого цинка. Использование комбинации электролюминесцентного слоя фосфора с фотопроводящим слоем дает возможность получить при подаче оптического сигнала эффект блокировки излучения, исходящего от фосфора. Блокировка излучения продолжается до тех пор, пока оптический сигнал не будет снят. Такие комбинированные элементы представляют большой интерес для использования в устройствах хранения и воспроизведения измерительной информации. Они могут быть использованы в качестве активных элементов переключающих схем, но их применение ограничено из-за большой инерционности. Время возбуждения слоя сернистого цинка приблизительно равно 0,2 мксек при включении и 15 мксек при выключении. Вероятно, можно ожидать создания таких элементов с более высоким быстродействием.

В качестве активных элементов гибридных схем могут использоваться малогабаритные жидкостные приборы — хемотроны, принцип действия которых основан на неоднородности распределения электрических зарядов, получающейся в частично или полностью ионизированной жидкой среде с участием электрохимического процесса или без него. Положительными свойствами хемотронов являются их высокая пороговая чувствительность к входному сигналу по сравнению с полупроводниковыми приборами, а также большая разрешающая способность в области преобразования низкочастотных сигналов (до долей герца). Хемотронные приборы могут выполнять также функции регулируемых активных или емкостных сопротивлений, первичных преобразователей неэлектрических величин в электрические и т. п.

Несомненный практический интерес представляют малогабаритные источники питания. В последние годы мощность, потребляемая микроминиатюрными электронными схемами, значительно уменьшилась и достигла милливаттного диапазона. Ожидается разработка схем с потреб-

ляемой мощностью в нановаттном диапазоне. Появление таких схем позволит использовать в качестве источников питания тонкопленочные термоэлектрические генераторы, создаваемые путем испарения в вакууме. Такие генераторы, состоящие, например, из пяти последовательно соединенных тонкопленочных термопар, обеспечивают выходную мощность около 10^{-6} вт при напряжении примерно 0,15 в [10], если разность температур холодных и горячих спаев равна 100° С. Тонкопленочные термопары можно наносить на покрытую диэлектриком твердую схему, чтобы использовать мощность, рассеиваемую схемой, для питания независимых цепей смещения. Для питания микроэлектронных схем можно использовать и малогабаритные аккумуляторы, аналогичные, например, применяемые в слуховых аппаратах или радиоприемниках «Эра».

Приведенный выше краткий обзор основных характеристик микроминиатюрных элементов ни в коей мере не претендует на полноту освещения достижений в этой области. Этот обзор лишь иллюстрирует многогранность возможностей микроэлектроники и тонкопленочной электроники в частности.

Специфические элементы измерительной техники

До сих пор мы рассматривали вопросы микроминиатюризации измерительной аппаратуры, не учитывая специфических особенностей ее элементов. Для решения большинства этих вопросов можно использовать достижения в смежных областях, например, в радиоэлектронике и вычислительной технике. Теперь перейдем к обсуждению особенностей микроминиатюризации специфических элементов измерительной техники.

Измерительная аппаратура, как правило, содержит элементы, воспринимающие параметры исследуемого объекта (датчики, первичные преобразователи). Во многих случаях уменьшение размеров первичных преобразователей может привести к повышению качества измерительной аппаратуры. Малогабаритные конструкции лучше противостоят ударам и вибрациям, поэтому миниатюрные датчики могут устанавливаться там, где датчики большего размера и веса не могли бы работать. Микроминиатюризация датчиков позволяет проводить отбор измерительной информации в условиях ограниченного пространства и может повысить достоверность получаемой информации за счет уменьшения возмущений, вносимых датчиками в состояние исследуемого объекта. Микроминиатюрные датчики могут повысить точность измерений градиентов различных полей, например, электрических, магнитных, температурных и т. п.

В результате проведенных исследований уже достигнуты определенные успехи в уменьшении размеров датчиков. Для примера можно привести работы по тонкопленочным тензодатчикам [11—13], электрохимическим датчикам малых перемещений [14], датчикам Холла [15], полупроводниковым фотоэлементам [16], микротермосопротивлениям [17], приемникам сверхвысокочастотного [18] и инфракрасного излучений [19] и др. Однако, по нашему мнению, имеется настоятельная необходимость в расширении и углублении подобных исследований.

Неотъемлемой частью измерительной аппаратуры являются образцовые меры. Существующие образцовые меры, как правило, весьма громоздки (например, сопротивления, катушки индуктивности, воздушные конденсаторы, нормальные элементы и т. п.). Уже сейчас в измерительной аппаратуре объем, занимаемый образцовыми мерами, сравним с объемом остальной части аппаратуры даже при использовании полу-

проводниковых приборов. С развитием микроминиатюризации это несоответствие станет неприемлемым, если не будут своевременно проведены исследования по созданию новых типов микроминиатюрных образцовых мер.

Ряд микроминиатюрных элементов при соответствующей доработке можно было бы, по-видимому, использовать в качестве образцовых мер, например, тонкопленочные сопротивления и конденсаторы, высокостабильные источники питания и другие. В известной авторам литературе практически нет сведений о микроминиатюрных образцовых мерах. Вероятно, это можно объяснить тем, что перед разработчиками элементов микросхем такие задачи еще не ставились. Совершенно очевидно, что проблема микроминиатюризации измерительной аппаратуры не может быть успешно разрешена без серьезных исследований по созданию соответствующих образцовых мер. Образно говоря, область микроминиатюрных образцовых мер является еще целиной для деятельности специалистов различных профилей, в том числе и относительно далеких от измерительной техники, например, для физиков и химиков.

К специфическим элементам измерительной аппаратуры относятся и устройства сравнения, которые предназначены для сопоставления измеряемых (обычно непрерывных) величин со значениями образцовых мер. Устройства сравнения в зависимости от метода работы измерительной аппаратуры должны определять, являются ли значения измеряемой величины больше или меньше значений данного набора образцовых мер, либо равны им.

Несомненный интерес для дискретной измерительной техники представляют различные пороговые элементы. К ним мы относим такие элементы, которые резко изменяют свое состояние, если входной сигнал несколько отличается (в большую или меньшую сторону) от определенного фиксированного значения. В таких элементах образцовые меры являются внутренними, скрытыми. В качестве скрытых образцовых мер могут выступать различные физические или химические явления, обуславливающие нелинейность характеристик пороговых элементов. Для иллюстрации характерных особенностей таких явлений можно упомянуть скачкообразное изменение сопротивления материалов при переходе из сверхпроводящего состояния в обычное, изменение тока при пробое в искровом разряднике или при освобождении электронов, захваченных ловушками в полупроводниках (термостимулированный ток) и т. п. Пороговые элементы могут использоваться в устройствах сравнения, а также в виде комбинации устройств сравнения в обычном смысле с образцовыми мерами. По нашему мнению, разработка таких пороговых микроминиатюрных элементов является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования измерительной аппаратуры. Конечно, для подобных разработок необходимо тесное сотрудничество специалистов в области измерительной техники, физики, химии и др.

Выходные устройства измерительной аппаратуры, т. е. устройства преобразования формы представления информации в вид, удобный для потребления, в ряде случаев нельзя делать микроминиатюрными, например, при визуальном отсчете. По-видимому, при этом применение микросхем будет ограничиваться устройствами преобразования сигналов в форму, необходимую для управления существующими индикаторными элементами. Кроме того, представляется интересной возможность создания индикаторных устройств из большого числа миниатюрных элементов, обладающих малым потреблением мощности и хорошо согласующихся с остальной схемой, например, при использовании электролюминесцентных пленок в матричном исполнении.

Большую роль в измерительной аппаратуре играют различные коммутационные элементы, которые должны обладать необходимыми для измерительной техники метрологическими свойствами (большое отношение сопротивлений в закрытом и открытом состояниях, малые шумы, слабая перекрестная модуляция между различными каналами измерения, незначительные взаимные влияния каналов измерения и управления и др.). Коммутационные элементы могут быть как контактными, так и бесконтактными. Разработанные в настоящее время магнитоуправляемые контакты [20] являются, безусловно, наиболее перспективными для создания измерительной аппаратуры в микромодульном исполнении. При переходе к разработке аппаратуры с применением тонкопленочных схем более предпочтительным будет, по-видимому, использование в качестве ключей тонкопленочных триодов.

Мы перечислили лишь важнейшие специфические элементы измерительной аппаратуры и попытались осветить перспективы их микроминиатюризации. Естественно, что в процессе исследований может выявиться ряд новых соображений, которые будут определять направления развития микроминиатюризации измерительной аппаратуры.

В заключение следует подчеркнуть, что нельзя пассивно ожидать решения всех основных вопросов микроминиатюризации в радиоэлектронике и вычислительной технике, а затем переносить их в измерительную аппаратуру. Нужно уже сейчас формулировать технические условия, обоснованные с точки зрения измерительной техники, на создание новых элементов и схем, ставить и решать совместно с разработчиками микроэлектроники специфические задачи, связанные с построением микроминиатюрной измерительной аппаратуры.

Предполагаемые достоинства микроминиатюризации измерительной аппаратуры

Обсуждая проблему микроминиатюризации измерительной аппаратуры, нельзя обойтись без оценки предполагаемых достоинств этого нового направления. К сожалению, такую оценку пока невозможно подкрепить конкретными примерами использования твердых схем в измерительной технике. Это объясняется, по-видимому, тем, что возможности использования достижений микроэлектроники в измерительной аппаратуре, в частности, твердых схем, насколько нам известно, до сих пор еще не обсуждались ни в отечественной, ни в зарубежной печати.

К числу безусловных достоинств измерительной аппаратуры в микроминиатюрном исполнении следует отнести существенное уменьшение размеров и веса. Уменьшение размеров и соответственно веса ограничивается допустимой для данного объема рассеиваемой мощностью. Естественно, что с повышением плотности упаковки мощность, рассеиваемая в единице объема, увеличивается. Поэтому практические пределы плотности упаковки определяются термодинамическими условиями. Для разрешения этой проблемы необходима разработка микроваттных измерительных и электронных схем с использованием элементов, работающих в области малых напряжений и токов.

Есть весьма веские основания предполагать, что применение тонкопленочных схем позволит повысить надежность измерительной аппаратуры. В тонкопленочных схемах по сравнению с обычными заметно уменьшается число соединений между элементами, особенно при использовании комбинированных элементов. А соединения, как известно, в значительной мере определяют надежность оборудования. При уменьшении веса работоспособность устройств сохраняется в большем диапазоне ме-

ханических воздействий. Тонкопленочные элементы, в том числе и активные, лучше противостоят радиационному облучению.

Повышению надежности микроминиатюрной измерительной аппаратуры будут способствовать также более широкие возможности применения различных методов резервирования с автоматическими или полуавтоматическими средствами переключения, поскольку ныне применение резервирования ограничивается в основном габаритами и весом оборудования. В настоящее время для контроля почти всех электронных устройств необходимо участие оператора. Применение микроэлектроники позволит создавать измерительную аппаратуру, которая сможет сама контролировать правильность своей работы, например, путем периодического включения серий тестов. Одна группа тестов может служить для определения правильности функционирования аппаратуры, а вторая — для локализации обнаруженной неисправности.

При микроминиатюризации измерительной аппаратуры, вероятно, повысится ее быстродействие, поскольку с уменьшением размеров соответственно уменьшаются и паразитные емкости, создающие задержку распространению сигналов.

Стоимость современной измерительной аппаратуры неуклонно растет по мере ее усложнения. Известно, например, что стоимость существующих автоматических цифровых измерительных приборов весьма высока, что создает определенные препятствия их широкому распространению. Можно ожидать, что существенное уменьшение ее будет достигнуто за счет применения технологии с использованием тонкопленочных схем. Конечно, сейчас пока еще рано считать эту возможность безусловной. Во всяком случае, уже совершенно очевидно, что технология создания тонкопленочных схем является явно прогрессивной по сравнению со сборкой аппаратуры из обычных элементов. Следует иметь в виду, что такая технология может позволить изготавливать одновременно до нескольких десятков тонкопленочных схем, даже различных по выполняемым функциям.

Введение в измерительную аппаратуру устройств обработки измерительной информации даст возможность создавать новые высококачественные приборы. Такой путь совершенствования измерительной аппаратуры уже определился достаточно четко. Для примера можно привести работы [21—25]. Правда, в этих исследованиях для реализации принципов построения измерительных устройств пока еще используются обычные радиодетали. Применение микроэлектронных схем откроет возможность широкого использования устройств обработки информации с большим разнообразием выполняемых операций. Это может привести к существенному улучшению метрологических характеристик измерительной аппаратуры.

Весьма вероятно, что подробное исследование существующих микроминиатюрных элементов приведет к использованию их специфических особенностей с пользой для измерительной техники. Следует особо подчеркнуть, что новые образцы микроминиатюрных элементов появляются пока, как правило, в результате запросов со стороны разработчиков радиоэлектронной и вычислительной техники. Имеется настоятельная необходимость в разработке элементов с учетом требований измерительной техники. Для этого в исследованиях существующих и поисках новых микроминиатюрных элементов должны принимать активное участие и специалисты в области измерительной техники.

Обсуждая преимущества микроминиатюризации измерительной аппаратуры, следует отметить и ее вероятные недостатки. К их числу можно отнести пока еще относительно низкий процент получения годных,

работоспособных микроэлектронных схем. Нельзя также забывать, что такие схемы работают в режимах очень малых токов и напряжений. Полезные сигналы, получаемые на выходе схем, будут тоже малыми.

По нашему мнению, работы в области микроминиатюризации измерительной аппаратуры в ближайшее время должны проводиться по следующим основным направлениям.

1. Использование микроминиатюрных схем для изготовления отдельных узлов измерительной аппаратуры, например, устройств управления автоматических цифровых измерительных приборов, усилительных устройств и т. п.

2. Создание измерительной аппаратуры в микроминиатюрном исполнении, основанной на использовании известных принципов и методов измерений.

3. Исследование возможностей создания измерительной аппаратуры, в которой для улучшения метрологических характеристик используются новые схемные решения и методы измерений.

Проблема микроминиатюризации измерительной аппаратуры является очень сложной и для ее разрешения необходимо проведение серьезных научных исследований в области разработки как новых элементов, так и новых схемных решений.

Целесообразно отметить, что все изложенное выше в равной степени относится к автоматическому контролю, технической диагностике и т. п.

Выводы

Микроминиатюризация является одним из наиболее перспективных направлений дальнейшего совершенствования измерительной аппаратуры.

Наиболее подходящими для создания измерительной аппаратуры в микроминиатюрном исполнении являются тонкопленочные схемы.

Необходимо уже сейчас начинать исследования в области тонкопленочных измерительных схем как по созданию новых элементов, так и по рациональным схемным решениям.

Для успешного разрешения проблемы микроминиатюризации измерительной аппаратуры назрела настоятельная необходимость совместной работы специалистов по измерительной технике и микроэлектронике.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. W. A. D u m m e r. Electronic components — past, present and future.— Brit. Comm. and Electr., 1961, v. 8, N 11, p. 834.
2. Interavia Air Letter, 1965, N 5682, p. 10. (Рекламное сообщение).
3. M. F. Wolff. Forward step in microcircuits: thin-film transistors form scanning generator.— Electronics, 1964, v. 37, N 8, p. 23.
4. В. А. Югов. Тонкие пленки и их применение в радиоизмерительной технике. М., Изд-во стандартов, 1964.
5. Тонкие ферромагнитные пленки. Перев. с нем. М., Изд-во «Мир», 1964.
6. К. М. Поливанов, А. Л. Фрумкин. Измерение свойств тонких магнитных пленок.— В сб. «Перспективные научно-технические направления развития магнитоизмерительной аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов», кн. I. Л., 1964.
7. M. L. Cohen. What about cryotronics? — Control Engineering, 1961, v. 8, N 9, p. 160.
8. A. L. Mc Whorter, R. H. Rediker. The cryosar — a new low-temperature computer component.— Proc. IRE, 1959, v. 47, N 7, p. 1207.
9. I. Melngailis, A. G. Milnes. The cryosistor — a field-effect controlled impact ionization switch.— Proc. IRE, 1961, v. 49, N 11, p. 1616.

10. G. Abo witz and oth. Thin-film thermoelectrics.— *Semicond. prod.*, 1965, v. 8, N 2, p. 18.
11. А. В. Шубников и др. Исследование пьезоэлектрических текстур. М., Изд-во АН СССР, 1955.
12. А. Ф. Городецкий, Г. Н. Гук, Б. И. Пучкин. О тензочувствительности тонких слоев висмута, теллура и германия.— Сб. «Физика твердого тела», т. I. М., 1959.
13. А. Ф. Городецкий и др. Измерительные характеристики кремниевых тензодатчиков типа «Нэтистор».— Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1965.
14. Н. С. Лидоренко и др. Электрохимические датчики для приема акустических сигналов и измерения малых перемещений.— *Электротехника*, 1965, № 3.
15. Тезисы докладов к научно-техническому совещанию по вопросам применения гальваноманнитных датчиков в приборостроении. М., 1962.
16. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963.
17. С. Б. Быков и др. Микротермосопротивления на рабочие температуры до 200° С.— *Инженерно-физический журнал*, 1962, № 8.
18. Т. С. Мосс. Современные инфракрасные приемники.— Сб. «Успехи спектроскопии». М., Изд-во иностр. лит., 1963.
19. А. А. Бокринская, Е. Т. Скорик. Методы измерения мощности в диапазоне сверхвысоких частот. Киев, Гостехиздат УССР, 1962.
20. Я. М. Диковский, И. И. Капралов, М. П. Цапенко. Реле с однолепестковыми магнитоуправляемыми контактами.— *Автоматический контроль и методы электрических измерений* (Труды III конференции, 1961 г.). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
21. А. Н. Касперович, И. Ф. Клисторин, М. П. Цапенко. Автоматические цифровые электроизмерительные приборы.— *Автометрия*, 1965, № 1.
22. А. Н. Касперович. Об устранении влияния периодических помех на результаты многоточечных измерений постоянных напряжений.— *Автометрия*, 1965, № 2.
23. И. Ф. Клисторин, И. И. Коршевер. Об измерении действующего значения периодического напряжения произвольной формы методом обработки мгновенных значений.— Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1965.
24. Э. И. Гитис, Г. В. Маркус. Самонастраивающиеся преобразователи напряжения в код как средство устранения систематических погрешностей.— Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1965.
25. А. Н. Касперович, И. Я. Корчагин, В. И. Патерикин. Помехоустойчивый цифровой милливольтметр с обработкой данных.— Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1965.

*Поступила в редакцию
7 августа 1965 г.*

После того, как рукопись статьи была сдана в редакцию, появились первые сообщения об использовании твердых схем в измерительной аппаратуре. В «Электронике» (русск. перев., 1965, т. 38, № 7, стр. 70) сообщается, что фирма «Дэйтапалс» выпустила интегрирующий цифровой вольтметр на интегральных схемах. В журнале ТИИЭР (русск. перев., 1964, т. 52, № 12) описан аналого-цифровой преобразователь для гибридной вычислительной машины на интегральных схемах, выдающий 11-разрядный двоичный код в последовательной или в параллельной форме при скорости преобразования 2 мксек на разряд. В преобразователе использованы как существовавшие, так и специально разработанные интегральные схемы. Отмечается, что некоторые фирмы пытаются использовать интегральные схемы в разрабатываемых ими измерительных приборах, при этом указывается на две основные трудности: цены на интегральные схемы все еще высоки, а введение их в проектируемые изделия весьма сложно.
