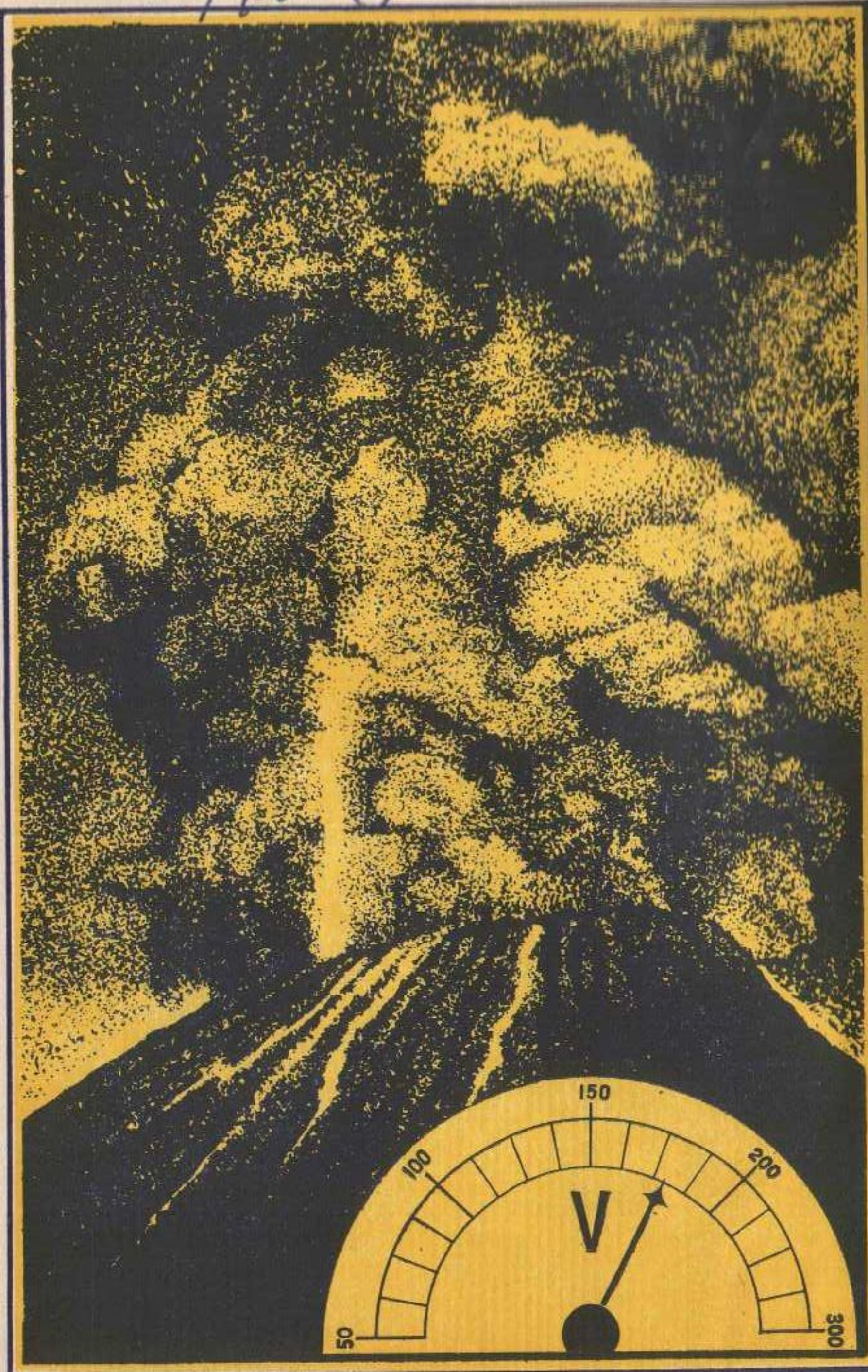


140-9



# ЗНАНИЕ

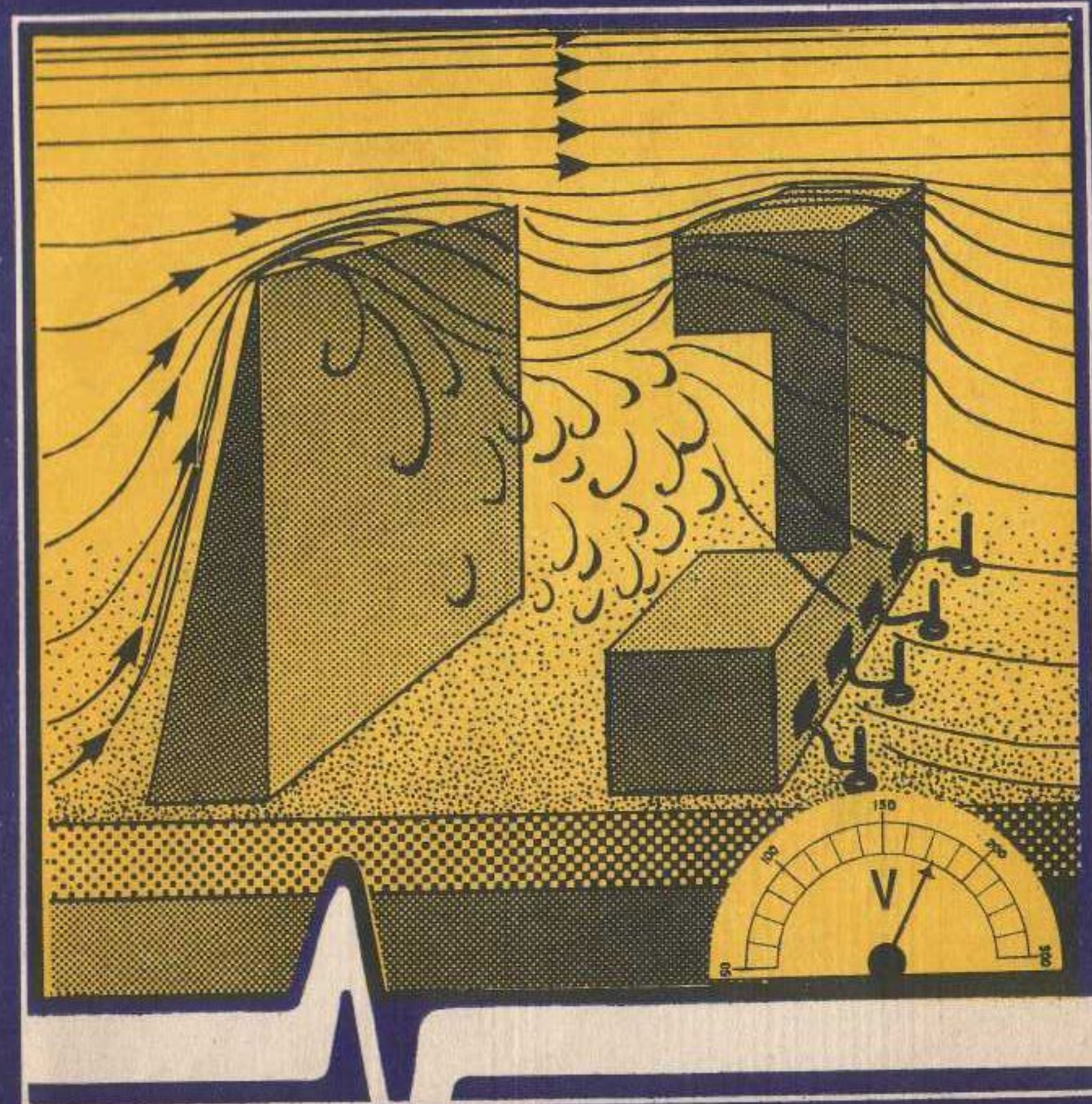
И.Н.Магден  
В.Н.Рыбин

НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

СЕРИЯ  
РАДИО-  
ЭЛЕКТРОНИКА  
И СВЯЗЬ

11'80





НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

Серия  
«Радиоэлектроника  
и связь»  
№ 11, 1980 г.

Издается  
ежемесячно  
с 1966 г.

И. Н. Магден,

В. Н. Рыбин,

кандидаты технических наук

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Книга отсканирована  
А. Федюковым  
fedjukov@mail.ru

Издательство  
«Знание»  
Москва  
1980

Магден И. Н., Рыбин В. Н.

М12 Преобразователи неэлектрических величин.— М.: Знание, 1980.— 64 с.— (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Радиоэлектроника и связь»; № 11).

11 коп.

В брошюре рассмотрено современное состояние, пути развития и перспективы использования отечественных и зарубежных полупроводниковых преобразователей давления, расхода и скорости потока жидкости и газа, основанных на оптических, радиационных и магнитных явлениях. Приводится сравнительный анализ преобразователей неэлектрических величин, различных по физическому принципу, конструктивному исполнению и характеру преобразования сигнала.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей (инженеров, техников, студентов), интересующихся современным состоянием техники измерений.

20400

ББК 30.10  
53.17

© Издательство «Знание», 1980 г.

## Предисловие

Повышение эффективности производства — это одна из основных задач, поставленных перед нашим обществом в десятой пятилетке. Разрешение ее возможно при широком внедрении автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП) в народном хозяйстве, применении единой системы ЭВМ (ЕС ЭВМ) с машинами третьего и четвертого поколения, широком использовании достижений современной микроэлектроники, разработке новых устройств автоматики и измерительной техники. Разнообразие применяемых в народном хозяйстве технологических процессов диктует необходимость при внедрении АСУТП применения большого количества преобразователей с унифицированным токовым выходным сигналом.

При этом благодаря бурному развитию полупроводниковой техники, микроэлектроники, твердотельной и пленочной технологии, изготовлению новых полупроводниковых приборов и материалов ведущая роль в решении этой задачи принадлежит измерительной технике, основу которой составляют полупроводниковые преобразователи неэлектрических сигналов.

Современное производство характеризуется широким применением АСУ. На начало 1980 г. в СССР действует более 4370 различных автоматизированных систем управления, из них 1649 — системы по автоматическому управлению сложными технологическими процессами производства (АСУТП). Но такой симбиоз вычислительной техники и систем управления возможен и оправдан лишь в том случае, когда в производственном процессе используются датчики, способные следить за изменениями всех важнейших параметров объекта без участия человека в процессе измерений. Следовательно, сегодняшнее производство требует интеграции систем измерения в автоматических системах управления на базе вычислительных систем.

Технологический процесс современного производства требует точного, оперативного и надежного контроля за



состоянием обрабатываемого объекта и функционированием оборудования, участвующего в производственном процессе. Проще всего это осуществляется обработкой электрических сигналов, поступающих от многочисленных датчиков различного принципа действия и назначения.

Следовательно, создание современных датчиков, способных преобразовывать неэлектрические величины в электрические сигналы, — это одна из важнейших народнохозяйственных задач.

Современная техника позволяет преобразовать любые физические величины в электрические сигналы, здесь нет никаких принципиальных ограничений, достаточно лишь найти такое явление, которое позволит однозначно связать измерения параметра с изменением электрических характеристик датчика сигнала.

В серии «Радиоэлектроника и связь» вышла в свет брошюра, рассказывающая о большом классе измерительных преобразователей (датчиков), преобразующих физические величины, в той или иной степени зависящие от температуры («Термоизмерения», 1979, № 7). Еще раньше в брошюре «Новое в измерительной технике» (1977, № 11) было рассказано о развитии измерительных комплексов и состоянии разработки агрегатных комплексов Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации в приборостроении. Таким образом, это третий выпуск, раскрывающий тему об измерениях и измерителях. В этом выпуске основное внимание уделено первичным преобразователям, воспринимающим и контролирующим разнообразные физические величины, зависящие от давления, рассмотрены также преобразователи, работающие на других физических принципах.

В производстве важнейшее значение приобрели датчики для измерения и регистрации плотности и концентрации растворов, состава и свойств веществ, вязкости и текучести, влажности, прозрачности, упругости, вибрации, деформации, усилия, скорости, расхода веществ и других параметров, характеризующих технологические процессы.

Разнообразие по применению и назначению датчиков породило разнообразие конструктивное. Сейчас многие отечественные и зарубежные фирмы серийно выпускают потенциометрические, индуктивные, емкостные, компен-

сационные, вибрационно-частотные, магниторезистивные, тензометрические, полупроводниковые преобразователи давления. А если к этому добавить датчики, регистрирующие параметры в оптике, магнетизме, биологии, электричестве, ядерной физике, то перечень, отображающий конструктивное разнообразие датчиков, станет недопустимо велик (в пересчете на объем этой брошюры).

## Преобразователи давления

С помощью преобразователей давления контролируют как абсолютное, так и избыточное давление, измеряют перепад и отношение давлений, получают информацию о деформациях, усилиях, вибрациях и расходах в различных системах. Это наиболее распространенный класс измерительных преобразователей. Так, например, при летно-конструкторских и стендовых испытаниях самолета датчики давления составляют 44% от общего количества измерительных преобразователей. Разнообразие параметров измеряемых сигналов, пропорциональных давлению на каждом типе летательного аппарата, условия испытаний и эксплуатации вызывают потребность создания большого количества приборов, отличающихся по назначению, месту установки, рабочей среде, характеру выходного сигнала и пр. Например, в работающем самолете датчики давления измеряют давление в системах подачи топлива, в гидросистемах, на выходе воздухозаборника, в камере сгорания и на ее срезе; определяют вертикальную скорость подъема или спуска, высоту полета, расход компонентов топлива, угол атаки и скольжения; следят за распределением давления и его перепадами на несущих плоскостях, индикаторной и истинной скоростей полета и пр.

Совершенно очевидно, что на данном уровне развития техники аналогичный по объему поток информационных, контролируемых и управляющих данных, пропорциональных давлению или усилиям, мы должны получить и при испытаниях и эксплуатации гидравлических систем и сооружений, компрессорных установок и многих других широко известных устройств, комплексов и систем. За рубежом ныне существуют тридцать шесть крупных приборостроительных фирм, которые интенсивно проводят разработки и выпуск измерительных преобразователей давления только с электрическим токовым

выходным сигналом, — такое количество фирм нельзя считать чрезмерным.

В нашей стране одна из основных задач десятой пятилетки — повышение эффективности производства на базе широкого внедрения АСУТП с использованием ЭВМ диктует необходимость расширения производства измерителей давления с токовым выходным сигналом, предназначенных не только для энергетики и металлургии, но и для ряда отраслей химической, газовой и нефтеперерабатывающей промышленности, где ранее применялись пневматические датчики давления.

Следует отметить, что принципиально новых решений измерения давления долгие годы не было, работы проводились в направлении усовершенствования отдельных узлов существующих датчиков, унификации, конструкции датчиков, состоящих из ограниченного числа типовых блоков с целью повышения их точности, надежности, виброустойчивости, расширения температурного диапазона работы и улучшения эксплуатационных характеристик, уменьшения габаритов и массы. Но в последнее десятилетие бурное развитие полупроводниковой техники, микроэлектроники, твердотельной и пленочной технологии изготовления новых полупроводниковых приборов и материалов; успешное изучение их электрофизических свойств и характеристик позволило создать преобразователи давления, работающие на новейших физических принципах. А это, в свою очередь, повлияло на их конструктивные особенности, массу и габариты, создание схем вторичных преобразователей и многое другое.

На всех этих вопросах мы остановимся ниже, а сейчас рассмотрим основные принципы и приборы измерения давления, применяемые на современном этапе в мировой практике.

По характеру измеряемой среды и ее параметрам существует различие между датчиками для измерения нейтральных и агрессивных сред. Преобразователи давления, защищенные от повреждения в агрессивной среде, выполняются в агрессивно-стойком исполнении по отношению к измеряемым средам и искробезопасном или взрывозащищенном варианте для работы во взрывоопасных установках, для этого повышают коррозионную стойкость элементов измерительных узлов или их защиты специальными покрытиями.



По характеру выходного сигнала преобразователи давления разделяют на две группы: датчики с выходом по напряжению переменного или постоянного тока, меняющемуся пропорционально изменению давления без усиления этого сигнала, и датчики с усилением токового сигнала. Значение токового сигнала выпускаемых промышленностью датчиков находится в пределах от 0 до 50 мА, а сопротивление нагрузки, включая линии связи, составляет обычно от 300 до 2000 Ом.

Выпускаемые в настоящее время промышленные датчики с высокой точностью (основная допустимая погрешность не превышает 0,25—1,00%) могут измерять давления при температуре от —55 до 120°C в пределах по поддиапазонам от 0,007 до 3000 кг/см<sup>2</sup>.

Выходной сигнал датчика поступает или непосредственно в регулирующие и управляющие системы, или в ЭВМ, контрольно-записывающую аппаратуру или телеметрические станции. Наиболее перспективно в настоящее время применение считывающей аппаратуры с цифровым выходом, преобразующей аналоговые сигналы датчика в цифровую форму по типу «напряжение-частота» или «напряжение-код».

По принципу действия выпускаемые серийные преобразователи давления делятся на потенциометрические, индуктивные, емкостные, преобразователи с силовой компенсацией, вибрационно-частотные, магниторезистивные, тензометрические, полупроводниковые.

Остановимся кратко на основных физических принципах их работы и конструктивных особенностях.

**Потенциометрические (реостатные) датчики давления.** Применяются для измерения перемещений, геометрических размеров, углов поворота. Чувствительным элементом таких датчиков в зависимости от требуемых параметров служат anerоидные коробки, сильфоны или трубки Бурдона и Геликса, выполненные из специальных никелевых сплавов. Чувствительный элемент деформируется от действующего на него давления, и эта деформация с помощью кинематической схемы передается на подвижную щетку потенциометра, изготовленного с проволочными или пленочными резисторами с сопротивлением в пределах от 0 до 10 000 Ом. С выхода прибора снимается напряжение, пропорциональное перемещению щетки по потенциометру. Линейность характеристики таких приборов довольно высока, диапазон измеряемых

давлений от 0 до 700 кг/см<sup>2</sup>. Элементы конструкции датчика изготавливаются: основным из нержавеющей стали, а щетки и потенциометры — из благородных металлов.

Представляют интерес потенциометры, разработанные в США для авиационных приборов, у которых намотка резистивной проволоки ведется совместно с пластиковой проволокой, являющейся межвитковой изоляцией. В настоящее время разработано много видов твердых токопроводящих пластмасс, рекомендуемых для резистивного элемента потенциометра, изготовление которого производится прессованием.

**Индуктивные датчики давления.** По сравнению с потенциометрическими индуктивные датчики давления применяются чаще, поскольку они обладают более высокими эксплуатационными характеристиками, имеют больший технический ресурс, лучше переносят радиацию, вибрацию и удары. Точность и диапазон измерений у них такой же, как у потенциометрических датчиков. Чувствительным элементом служит мембрана или сильфон, от перемещения которой при деформации изменяется воздушный зазор в магнитопроводе и тем самым меняется магнитное сопротивление магнитопровода и, следовательно, индуктивность катушки. Катушки индуктивности составляют плечи мостовой схемы. От рассогласования моста возникает сигнал, поступающий после усиления в линию дистанционной передачи.

Чувствительность преобразователя порядка 200—300 мВ/мм, что позволяет применить довольно простую схему усилителя постоянного тока.

Датчики давления индуктивного типа отличаются высокой надежностью и находят широкое применение для работы в тяжелых эксплуатационных условиях, в схемах управления и аварийной защиты, в энергетике, атомной энергетике и металлургии.

Индуктивные датчики наиболее часто выполняют с переменным зазором в магнитопроводе и с переменной площадью зазора. Первые используются для измерения малых перемещений от долей микрометра до 3—5 мм), вторые — для перемещений от 0,5 до 15 мм.

В Советском Союзе такие датчики выпускаются на допустимое избыточное давление до 400 кг/см<sup>2</sup>. Они собраны по блочному принципу, снабжены магнитомодуляционным преобразователем с компенсацией магнитных



потоков и полупроводниковым усилителем. Обладают высокой надежностью и устойчивостью к случайным механическим и вибрационным нагрузкам.

**Емкостные датчики давления.** Предназначены для измерения уровня жидкости, механического усилия, давления, влажности и других параметров. Основными достоинствами датчиков давления, принцип действия которых базируется на емкостном методе, являются их малые габариты и масса, широкий диапазон измерения статических и динамических давлений и высокая точность измерений (погрешность не более 0,2%). Особенно хорошо эти датчики работают при измерении низких давлений.

Физический принцип измерения давления емкостным методом состоит в использовании зависимости изменения значения емкости конденсатора от изменения величины зазора между его пластинами, но датчики могут работать и на принципе изменения эффективных площадей пластин или изменения значения диэлектрической постоянной разделительного диэлектрика. Обычно измеряемое давление действует на мембрану или сильфон, с противоположной стороны которых крепится одна из металлических пластин конденсатора — подвижная, разделенная от неподвижной пластины слоем силиконового масла, выполняющего одновременно функции разделительной жидкости и диэлектрика. Подвижная пластина позволяет изменять величину зазора в плоском конденсаторе, а значит, и его емкость. Изменение емкости конденсатора влияет на характеристики колебательного контура, сигнал с которого электронный преобразователь обращает в токовый выходной сигнал. Высокая точность измерения давления емкостными датчиками обеспечивается схемными методами и особой тщательностью изготовления пластин конденсатора по технологии, принятой в оптической промышленности. Зазор между пластинами составляет 200 мкм и менее.

Перспективность применения емкостного метода измерения давления очевидна, но есть и недостатки, проявляющиеся в очень сильной чувствительности датчика к колебаниям температуры окружающей среды. Поэтому большой интерес для разработчиков емкостных датчиков давления представили свойства различного рода полупроводниковых соединений ионных кристаллов и керамик, обладающих высокой диэлектрической постоян-

ной. Известно, что ионные кристаллы кальцита фтора значительно изменяют свою емкость при приложении механических усилий. Если на противоположных гранях такого кристалла методами полупроводниковой технологии напылить тонкие алюминиевые пленочные контакты, то получится плоский конденсатор, чувствительный к давлению. Изменение емкости такого датчика при приложении давления можно измерить высокоточным мостом переменного тока, точность измерения давления датчиков очень высока.

**Датчики давления с силовой компенсацией.** Измерительные преобразователи с силовой компенсацией нашли широкое применение для измерения разряжений и перепада давлений в стационарных условиях, так как они обладают повышенной чувствительностью к тряске и вибрациям вследствие того, что имеют довольно большую массу рычажно-передаточного механизма. Высокая точность измерения, повышенная чувствительность, большой предел измеряемых давлений делают эти датчики довольно распространенными при измерении абсолютного и дифференциального давления. Состоят они из линейного преобразователя, усилительного устройства и измерительного блока.

Измеряемое давление преобразуется на чувствительном элементе измерительного блока в пропорциональное усилие, которое через рычажный механизм автоматически уравнивается усилием, развиваемым силовым механизмом обратной связи при протекании по его обмоткам постоянного тока. С рычажной системой жестко связан плунжер индикатора рассогласования, поэтому даже незначительное перемещение рычажной системы приводит к появлению сигнала рассогласования, который усиливается по напряжению и по мощности, выпрямляется фазочувствительным выпрямителем и в виде унифицированного сигнала постоянного тока поступает в обмотки силового механизма.

Представляет интерес разработка французских инженеров, предлагающих помещать силовой преобразователь измерительного блока в нейтральную жидкость.



## Полупроводниковые датчики давления

Полупроводниковые материалы и приборы на их основе благодаря своим уникальным физическим свойствам настолько прочно вошли во все сферы науки, техники и быта, что совершенно естественно повлекли за собой бурное развитие полупроводниковой тензометрии. И в настоящее время полупроводниковые преобразователи давления разрабатываются довольно широко как в нашей стране, так и за рубежом вследствие их весьма малых габаритов и массы, очень высокой чувствительности, большого уровня выходного сигнала, широкого диапазона температурных и механических параметров.

Для сравнения отметим, что масса полупроводниковых преобразователей в 10—15 раз меньше потенциометрических, а чувствительность первых в сотни раз выше. И одновременно оценим, воспользовавшись данными зарубежной печати, какой экономический эффект заложен в самой идее разработки полупроводниковых преобразователей, например для космических исследований. Напомним, что стоимость вывода единицы массы на низкую орбиту составляет 45 долларов, а в космос — 450 долларов и что в тяжелой ракете-носителе типа «Сатурн» масса датчиков и согласующих устройств составляет 12% от массы бортовой информационно-измерительной системы. Увеличение массы бортового оборудования на 1 кг приводит к увеличению стартовой массы ракеты на 100 кг. Отсюда преимущества полупроводниковых датчиков очевидны.

Однако разработка, создание и применение полупроводниковых тензодатчиков во многом сопряжены с рядом технологических и конструктивных особенностей и трудностей, требуют полного технологического комплекса микроэлектронного профиля, специальной химической обработки и учета целого ряда электрофизических фак-

торов и квантовых закономерностей физики твердого тела. Поэтому остановимся на их физических, конструктивных и технологических аспектах несколько подробнее.

**Тензоэффект в полупроводниках.** Под воздействием внешних нагрузок, способных деформировать полупроводниковый кристалл, сопротивление последнего заметно изменяется. Это явление изменения параметров материала получило название тензоэффекта. В принципе при механических воздействиях и вытекающих отсюда деформациях могут изменяться геометрические размеры, а значит, и электрическое сопротивление любого материала. Но отличительное свойство полупроводниковых материалов в том, что изменение их проводимости определяется не геометрическими факторами, а квантово-механическими процессами изменения энергетического равновесия кристалла.

Таким образом, физическая основа тензоэффекта в полупроводниках объясняется изменением его энергетического равновесия. Это в основном относится к тензометрической зависимости ширины запрещенной зоны и последующего изменения концентрации носителей заряда. Тип материала, кристаллографическая ориентация, удельное сопротивление, концентрация и состав легирующих примесей — все это определяет свойства и параметры полупроводниковых тензодатчиков. При этом важно отметить, что свойствами полупроводниковых кристаллов можно варьировать в очень широких пределах, изменяя соответствующим образом некоторые циклы технологического процесса их изготовления.

Для многих полупроводниковых кристаллов и соединений характерно наличие анизотропии тензоэффекта, т. е. зависимость тензочувствительности от кристаллографической ориентации материала. Ориентируя кристалл по различным кристаллографическим осям при его выращивании, можно в широких пределах изменять его тензочувствительность.

Тензочувствительные свойства материалов обычно характеризуются коэффициентом тензочувствительности, который показывает степень изменения сопротивления при деформации кристалла. Одним из методов регулирования тензочувствительности материала является изменение содержания примеси в полупроводниковом кристалле: тензочувствительность растет при уменьшении содержания примеси. Ограничивает этот рост высокая



температурная зависимость удельного сопротивления полупроводникового материала, которая совершенно противоположна его тензометрическим свойствам, а именно: с увеличением удельного сопротивления материала резко снижается его температурная стабильность.

Представляется довольно интересным проведение сопоставительного анализа основных полупроводниковых материалов, применяемых для создания датчика давления с наиболее оптимальными характеристиками. Начнем с монокристаллического кремния. Этот материал в настоящее время становится основой силовой и микроэлектронной полупроводниковой техники. Технология его получения хорошо разработана, он стабильно ведет себя при всех технологических операциях, таких, как диффузия, окисление, ионное легирование, сплавление, напыление, резка, полировка, эпитаксия, до  $200^{\circ}\text{C}$  не обнаруживает пластических деформаций.

Большой класс полупроводниковых материалов составляют интерметаллические соединения типа  $A_3B_5$ , такие, как арсенид галлия, антимонид галлия, арсенид индия, антимонид индия и др. Тензочувствительные свойства этих материалов представляют большой интерес и в настоящее время интенсивно исследуются.

Что касается остальных представителей обширного класса полупроводниковых материалов и соединений, то все они проявляют тензочувствительные свойства тем или иным образом, но на данном этапе производства практическое изготовление датчиков давления на их основе по конструктивным и технологическим особенностям затруднено. Отметим, не останавливаясь подробно на основных характеристиках, перспективность применения в качестве чувствительных элементов датчиков давления нитевидных кристаллов кремния, эпитаксиальных пленок кремния на сапфировой подложке и сплава германия с кремнием. В настоящее время с конструктивной и технологической точек зрения наиболее перспективны монокристаллический кремний и арсенид галлия. Но в конкуренции между двумя этими материалами наибольший практический интерес представляет кремний в силу своих технологических преимуществ.

Наиболее типичным представителем для практического применения стал монокристаллический кремний, тензочувствительные свойства, определяемые его энергетической структурой, позволяют из пластинки кремния с

присоединенными к ней контактами и выводами получить чувствительный элемент тензодатчика с хорошими параметрами. Такие приборы изготавливались 10—15 лет назад, но при существующей тогда технологии производства невозможно было использовать геометрические эффекты для повышения тензочувствительности. В настоящее время наиболее разработанными оказались датчики давления с диффузионными или ионолегированными слоями толщиной 1—3 мкм, образующими тензорезистивные чувствительные элементы. Планарная технология и методы фотолитографии позволяют создавать диффузионные слои толщиной от 10 мкм и более. А так как длина такого диффузионного резистора, созданного в монокристалле, на пластине любых геометрических размеров, практически может быть любой, то и сопротивление такого резистора можно варьировать в широких пределах, например от 100 до 10 000 Ом, что очень удобно для согласования его с электронной схемой вторичного преобразователя. При этом на кремниевой пластине можно создавать огромное количество таких тензорезисторов, коммутировать мостовые схемы и тем самым добиваться получения максимального выходного сигнала. Кроме того, большим преимуществом диффузионных слоев является линейность характеристики тензоэффекта (нелинейность на порядок ниже, чем у объемного материала), малая зависимость тензоэффекта от изменений температуры, возможность изготовления сколь угодно сложного профиля и высокая работоспособность в условиях влияния внешних факторов.

Обобщая проведенный теоретический анализ, мы уже четко представляем, что наилучшими тензочувствительными параметрами будут обладать диффузионные резисторы дырочного типа проводимости, сформированные на кремниевой пластине с кристаллографической ориентацией (111). Естественно, что размеры этой пластины должны быть конечными, а учитывая необходимость изготовления микроминиатюрных датчиков, настолько минимальным, чтобы на этой пластине разместить определенное количество тензорезисторов и при этом расположить ее в стандартном корпусе. Такая кремниевая пластина по аналогии с механическими датчиками давления носит название мембраны, и подчиняется всем законам сопротивления металлов, выведенных для закрепленных мембран конечных размеров.



Кремниевая мембрана может иметь как квадратную, так и круглую форму. Круглые мембраны лучше и проще всего реализуются на кремнии, ориентированном в плоскости (111). При этом снижающие напряжения по контуру такой мембраны во всех точках одинаковы, поэтому эффективно можно использовать всю ее площадь. Для квадратной мембраны нормальные напряжения вдоль стороны квадрата распределены неравномерно, принимая максимальные значения в середине и уменьшаясь до нуля к краю. Механическая прочность круглой мембраны примерно в 1,3 раза выше квадратной, что позволяет применить ее на более высокий диапазон давлений.

Можно предположить, что внимательный читатель уже мысленно задал нам вопрос: «А почему ничего не говорится о толщине мембраны, которая для устройств, воспринимающих давление, является самым критичным параметром датчика?» Вопрос логичен: толстая мембрана выдержит большие давления, но не почувствует малых нагрузок, а тонкая мембрана менее прочна, но очень чувствительна к прикладываемому давлению, и максимально высокий выходной сигнал может быть получен на очень тонкой, большого радиуса мембране с наиболее эффективной конфигурацией тензорезисторов, сосредоточенных в максимально напряженных ее точках.

Проблема изготовления тонких, однородных по большому диаметру мембран очень остро стоит при изготовлении механических датчиков давления, где эксплуатировать металлическую мембрану толщиной 100 мкм практически невозможно. В этом случае более перспективно изготовление полупроводниковых датчиков давления, поскольку на кремниевой пластине в любой ее точке при помощи фотолитографии и химического травления можно довольно легко вытравить мембрану толщиной менее 10 мкм, т. е. на порядок тоньше, чем предельно допустимая металлическая, и при этом тензочувствительные резисторы будут непосредственно расположены на этой мембране, испытывая внешнее давление без каких-либо промежуточных сложных механических устройств. Несмотря на свою малую толщину, кремниевая мембрана очень прочна. Так, мембрана толщиной в 10 мкм выдерживает максимальные давления до 21 атм. При этом благодаря незначительным размерам и массе мембрана практически безынерционна, на ее основе

можно измерять давления, изменяющиеся с частотой до 200 кГц, в то время как металлические мембраны работают в лучшем случае до 1 кГц.

Один тензочувствительный резистор можно поместить точно посередине мембраны — он будет работать на растяжение или ближе к краю мембраны — резистор будет работать на сжатие. Для четырехкратного усиления выходного сигнала лучше использовать мостовую схему, при этом в центре и на краях мембраны размещают по два резистора и включают их попарно в противоположные плечи мостовой схемы (рис. 1). При разработке такой схемы учитывают, что для получения линейного выходного сигнала плечи моста, работающие на растяжение, должны получать за время действия давления то же самое изменение сопротивления, что и плечи моста, работающие на сжатие.

Сопротивление тензочувствительных резисторов выпускаемых в настоящее время тензодатчиков лежит обычно в пределах от 500 до 3000 Ом, а ширина их — в пределах 20—40 мкм. Изготовление таких резисторов осуществляется по планарной технологии, обычно применяемой в полупроводниковом производстве. На кремниевой пластине диаметром 40 мм можно сформировать около 40 чувствительных элементов — датчиков давления диаметром 5 мм.

Существуют миниатюрные датчики, которые представляют собой жестко закрепленную по контуру мембрану с минимальным диаметром 1 мм и толщиной до

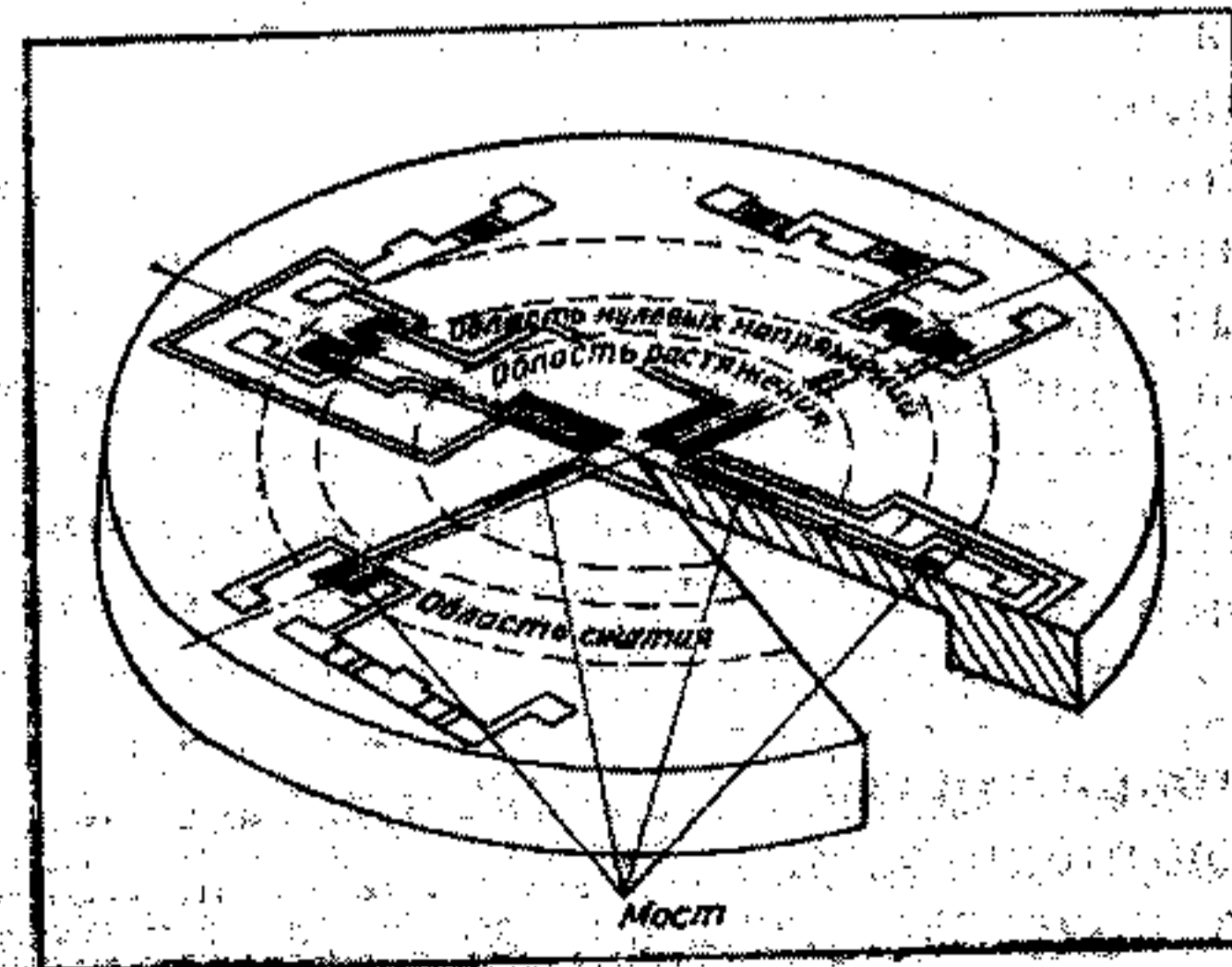


Рис. 1



10 мкм, на ней сформирован мост из четырех резисторов. Чувствительность таких систем в пределах 20—80 мкВ/мм рт. ст. Их используют в медико-биологических исследованиях для измерения давлений, не превышающих по величине 1 кг/см<sup>2</sup>.

Советскими учеными разработан и описан в литературе датчик, работающий в диапазоне сверхнизких давлений от 0 до 1 кг/см<sup>2</sup>. Он изготовлен по технологии обычных серийных интегральных схем и размещен вместе с дополнительным транзистором — датчиком температуры на кремниевом кристалле размерами 4,2×2,9 мм<sup>2</sup>. Кремниевый кристалл в этом датчике расположен на одной керамической подложке с двумя кристаллами операционных усилителей и цепью термокомпенсации.

В настоящее время многие ведущие зарубежные фирмы сообщают о разработанных ими полупроводниковых датчиках давления и приводят их конструктивные и эксплуатационные параметры. Например, фирмой «Qulite» (США) создан широкий ассортимент датчиков различных геометрических размеров и массы, рассчитанных на широкий диапазон давлений и способных работать в специфических условиях.

Достоинства полупроводниковых датчиков давления очевидны, но не следует забывать, что они имеют и ряд серьезных недостатков, к которым относятся: температурная зависимость сопротивления тензорезисторов, разброс параметров тензорезисторов, входящих в мостовую схему преобразователя. Эти вопросы представляют большую важность при конструировании датчиков давления, поскольку определяют их точность и сферу применения. Существующие в настоящее время способы компенсации и стабилизации датчиков давления, к которым можно отнести схемы пассивной и активной компенсации, применение высоколегированных полупроводников, хотя усложняют и делают датчики более дорогими, довольно распространены и эффективны в практике, тем более что компенсации и регулировки требуют и другие типы датчиков.

Представляет интерес новая разработка, позволяющая уменьшить размеры преобразователя: на одной кремниевой пластине вместе с тензочувствительными резисторами (но не на мембране, а на кольце жесткости, так, чтобы компенсация не зависела от деформации мем-

браны) методом диффузии формируются компенсирующие терморезисторы. Вся мостовая чувствительная схема охватывается разогревающим резистором, который создает определенное температурное поле. Разогревающий резистор позволяет осуществить на мембране принципиально новый метод устранения температурной зависимости тензочувствительности и начального разбаланса. Это метод компенсации в области моста. Меняя силу тока, протекающего через разогревающий резистор, можно поддерживать постоянную температуру на самой мостовой схеме.

Методы активной компенсации тензочувствительных мостовых схем достаточно многообразны, но в большинстве своем сводятся к использованию усилителей постоянного тока (УПТ) для усиления выходного сигнала и компенсации температурной зависимости тензочувствительности. В качестве УПТ очень удобно применять операционный усилитель. Способы активной компенсации позволяют получить выходные сигналы от 0,1 до 5 В при температурной зависимости выходного сигнала не ниже 0,02%/°С.

Конструктивные особенности проектирования полупроводниковых тензодатчиков во многом определяются областью их применения. Совершенно очевидно, что датчики для измерения давления в области сердца или мышечных напряжений отличаются по своим конструкциям от датчиков, применяемых для прочностных исследований конструкций, например гидротехнических сооружений. В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом выпускается большое количество полупроводниковых тензодатчиков с различными эксплуатационными параметрами и свойствами, применяемыми для разнообразных сред и температур.

В СССР налажен выпуск около 30 различных модификаций полупроводниковых кремниевых тензорезисторов типов Ю-8 и Ю-12. Они предназначены для измерения деформаций упругих сред и конструкций в диапазоне рабочих температур от —60 до +115°С и оформлены в виде гантелеобразных пластин из кремния. На концах чувствительных элементов формируются омические контакты, к которым припаиваются гибкие медные проводники. Затем этот элемент приклеивают связующими лаками, приваривают или припаивают. Типичные конструкции таких тензодатчиков приведены на рис. 2.



Для мостовых тензочувствительных схем разработано большое количество различных конструкций, при этом каждая фирма разрабатывает свой корпус и свою технологию крепления чувствительного элемента в корпус, защиту от коррозии, размещение схем вторичного преобразователя. На рис. 3 изображен интересный в конструктивном отношении американский датчик давления. Чувствительная мембрана (М) с размещенной на ней мостовой схемой устанавливается на входе патрубка. Рядом с чувствительным элементом расположен вторичный преобразователь (ВП), изготовленный по тонкопленочной интегральной технологии на ситалловой подложке.

Как мы уже отмечали, конструктивные особенности датчиков определяются их применением. Рассмотрим подробнее сферы применения полупроводниковых датчиков давления. В принципе их используют в тех же устройствах, в которых применяются проволочные, емкостные, индуктивные и другие типы датчиков, т. е. для измерения давлений, усилий, деформаций, ускорений, расходов в различных системах. Но высокий уровень выходного сигнала, малые габариты и масса, кардинально уменьшающие массу и габариты измерительной аппаратуры, значительно расширили пределы и возможности их применения.

Американские исследователи сообщили о применении полупроводниковых датчиков давления в прочностных испытаниях конструкции самолетов, испытаниях напряжений в лопастях винта вертолетов, усталостных испы-

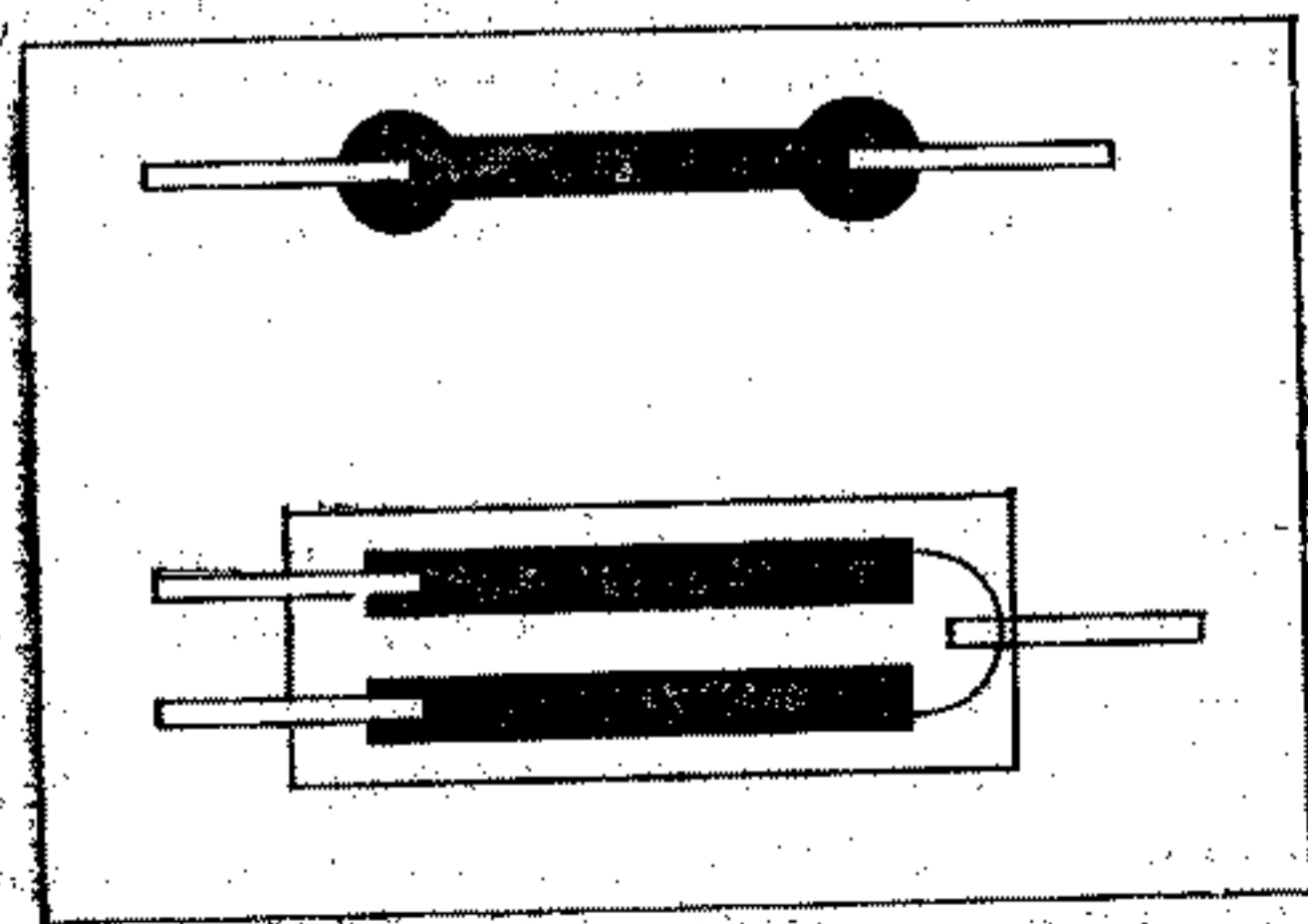


Рис. 2

таниях летательных аппаратов. Достоинства тензодатчиков, особенно их миниатюрность, позволяют определять значения и направления микронапряжений в конструкциях и узлах, не поддающихся измерениям другими типами датчиков. Их высокие частотные характеристики позволяют проводить экспресс-измерения различных объектов, движущихся с большой скоростью, например, взвешивание железнодорожных вагонов без остановки составов. Применение датчиков для измерения деформаций в фотоупругих составах и компаундах при повышенных температурах позволяет определить картину распределения внутренних напряжений. Большой практический интерес представляют измерения крутящих моментов, возникающих при работе компрессорных установок, роторов крупных турбин. Незаменимы полупроводниковые датчики при медико-биологических исследованиях для определения локальных напряжений мышечной системы, измерений давлений внутренних органов, измерений артериального и венозного давления крови.

Весьма интересны и перспективны разработки датчиков для измерения частоты ударов пульса. Особенно в последнее время, когда появилось множество любителей, увлекающихся «бегом от инфаркта». Несмотря на свою огромную пользу, этот бег приводит к тяжелым последствиям, когда он не санкционирован медиком, или человеком, занятым этим процессом, теряет контроль над нагрузками, которые в какой-то определенный момент могут достичь критического значения. Различные субъективные методы контроля в процессе бега, такие, как расстояние и время, которые можно фиксировать по часам или по ориентирам на местности, очень часто могут подвести, поскольку именно в эту минуту, час, время суток или даже день мы не учитываем состояние организма, нервной и сердечно-сосудистой системы. Кстати, и врача, который смог бы измерить наш пульс или артериальное давление в этот момент, естественно, рядом не будет. Незаменим же в такой ситуации счетчик

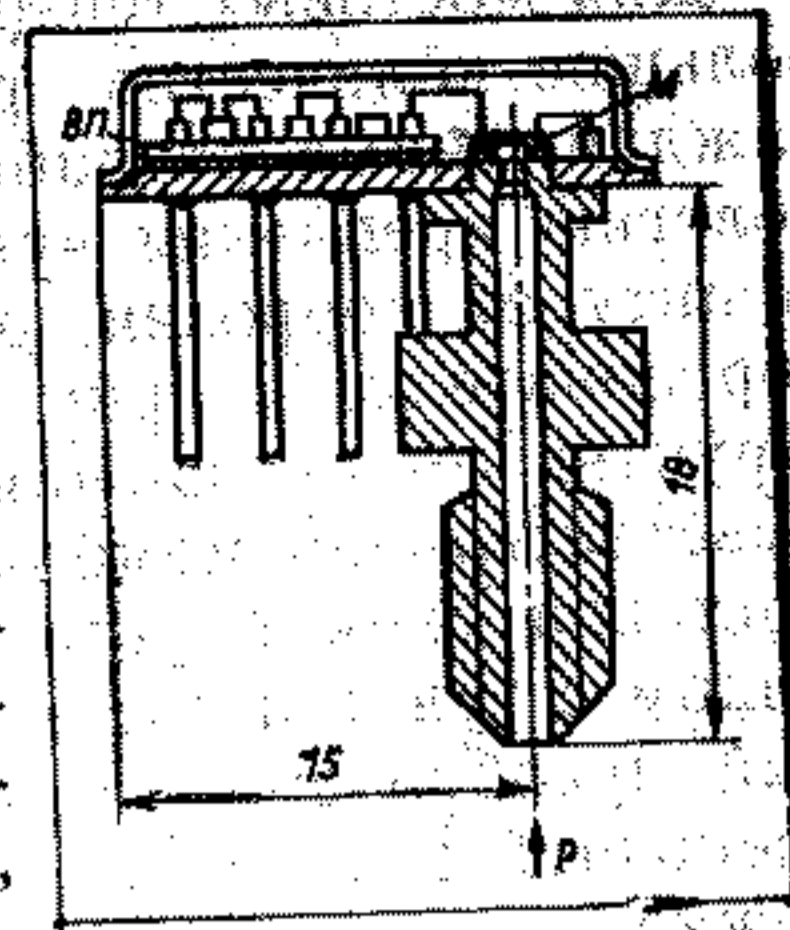


Рис. 3



частоты пульса с цифровой или световой индикацией, основным элементом которого служит полупроводниковый тензодатчик. Объективно, с большой точностью и за время не более 3 с такой прибор сообщит о временном интервале между систолой и диастолой сердечной мышцы, приведя при помощи вторичной электронной схемы это время в частоту сокращений сердечной мышцы, и если измеренное значение будет заметно отличаться от обычного статического, владелец прибора обязан снизить нагрузку. Разработками таких приборов небольших размеров и малой массы в настоящее время занимаются советские ученые.

Эти примеры и многие другие возможности применения полупроводниковых датчиков говорят об их большой перспективности.

Были рассмотрены преобразователи давления, напряжения, деформаций, которые работают на принципе тензоэффекта в полупроводниковых материалах. Но не меньший интерес и большие возможности представляет тензочувствительность полупроводниковых приборов. Остановимся на этом вопросе несколько подробнее.

## Тензочувствительность полупроводниковых приборов

Вопросами исследования тензочувствительности полупроводниковых приборов начали интересоваться примерно с того момента, когда американский ученый С. Смит в 1954 г. обнаружил тензоэффект в полупроводниковом германии. В то время промышленностью выпускались точечные и плоскостные диоды, фотоэлектрические и термоэлектрические приборы и устройства.

Бурное развитие полупроводникового приборостроения, предусматривающее дальнейшее интенсивное и планомерное внедрение полупроводниковых приборов и устройств на их основе в различных отраслях науки и техники, создание совершенно новых по физическому принципу и конструктивному исполнению приборов, широкая сеть АСУТП — все это повлекло за собой глубокие научные изыскания и исследования и в том числе изучение тензометрических свойств полупроводниковых приборов с целью их широкого внедрения в народное хозяйство. Наряду с традиционными диодами и транзисторами разработан ряд новых полупроводниковых приборов: диоды Ганна для генерации и усиления колебаний сверхвысокочастотного диапазона, светодиоды, твердотельные приборы, способные эффективно преобразовывать электрическую энергию в световую, полевые транзисторы с затвором в виде электронно-дырочного перехода и с изолированным затвором, приборы с барьером типа Шотки, запоминающие элементы с *p-n* переходами и много других.

Любой полупроводниковый прибор можно представить как сочетание сильно неоднородных слоев полупроводникового материала, например, электронно-дырочный переход в диоде или несколько электронно-дырочных переходов в транзисторах и тиристорах, обладающих определенной вольт-амперной или частотной характери-



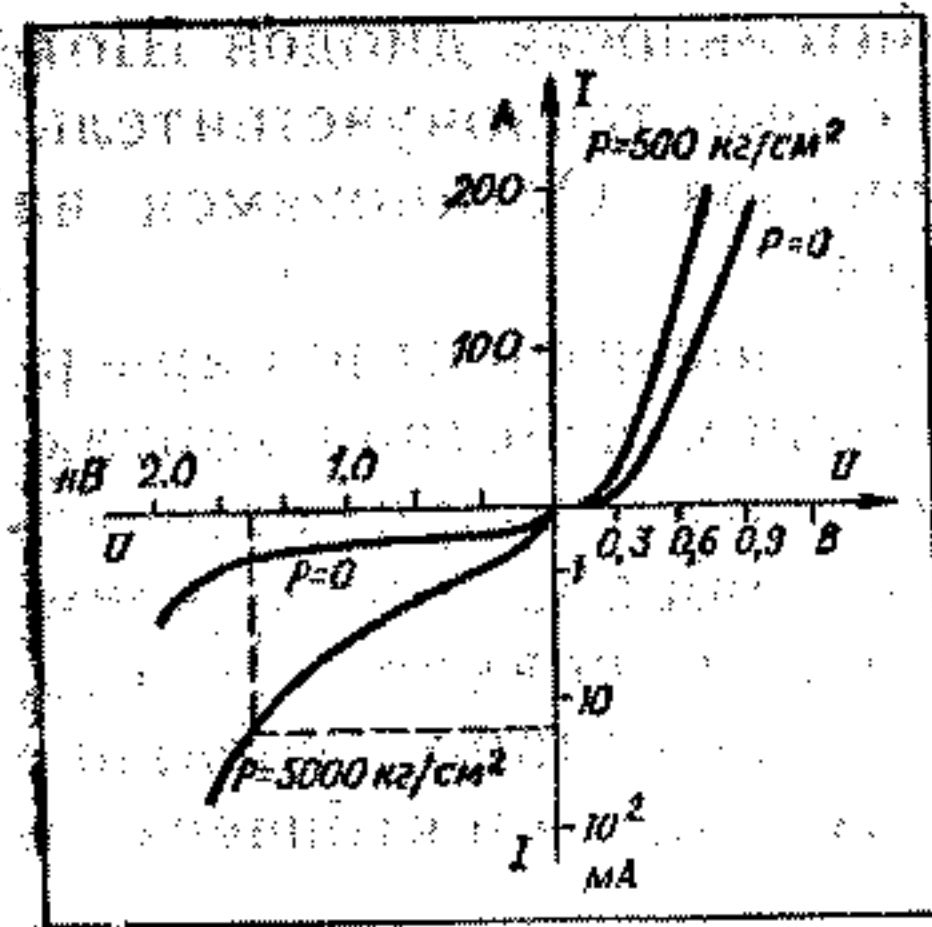


Рис. 4

кой. Тензоэффект в полупроводниковых приборах определяется изменением какого-либо параметра (тока, напряжения, частоты, емкости, квантового выхода и др.) от изменения приложенного к прибору внешнего давления. В одних случаях тензоэффект вреден, например, нестабильность характеристик прибора при его закреплении в корпус вызывает возникновение микронапряжений между кристаллом и корпусом. Это явление резко проявилось себя в мощных полупроводниковых приборах из-за неравенства температурных коэффициентов линейного расширения применяемых материалов. При изменении температуры рабочей среды или сильных токовых нагрузках, когда на приборе выделяется значительная энергия, возникает неравномерное поле упругих деформаций, которое изгибает полупроводниковый кристалл. В критическом случае кристалл может разрушиться, и прибор будет неработоспособен.

На рис. 4 приведена вольт-амперная характеристика, из которой видно, что при изменении внешнего давления от атмосферного до 5000 кг/см<sup>2</sup> обратный ток возрастает более чем в 100 раз, а обратное напряжение уменьшается почти в 1,3 раза. Совершенно очевидно, что такое явление приводит к снижению электрической прочности всего устройства, самопроизвольному его включению или выходу из строя в результате пробоя. Это обратная картина тензоэффекта, вернее, его отрицательное проявление. Но в тензометрии, в противовес такому явлению, стараются использовать зависимость изменения обратного тока, поскольку изменения прямого тока от приложенного давления, как видно из характеристики, незначительны. Были разработаны специальные технологические приемы, о которых мы сообщим ниже. Большая заслуга в исследовании тензочувствительности и разработке технологических процессов изготовления тензодатчиков на основе контакта металл-полупроводник или барьера Шотки принадлежит совет-

ским ученым В. И. Стрихе, А. Л. Поляковой, М. С. Кауфману и другим. Тензочувствительность диодов Шотки оказалась на 1—2 порядка выше тензочувствительности полупроводниковых материалов. Остановимся на этом вопросе несколько подробнее.

Физический принцип работы поверхностно-барьерного диода основан на выпрямляющем действии контакта металл-полупроводник. Такие диоды получают вакуумным испарением на тщательно обработанную кремниевую пластину вольфрама, титана, никеля, золота, молибдена, платины. Очень перспективно создание барьера Шотки при помощи метода электрического взрыва в вакууме.

Когда создан потенциальный барьер, металл заряжается отрицательно, а полупроводник — положительно. Следовательно, граничный слой обладает повышенным удельным сопротивлением и определяет сопротивление всей системы. При приложении внешнего давления высота потенциального барьера изменяется, кроме того, изменяется ширина запрещенной зоны полупроводника и концентрация носителей заряда. При этом очень резко, при наличии обратного смещения на барьере, будет изменяться ток термоэлектронной эмиссии и рекомбинационно-генерационный ток. Чем больше значение рекомбинационно-генерационного тока при приложении определенного давления, тем выше коэффициент тензочувствительности диода Шотки.

Обнаружено, что при напылении тугоплавких металлов (вольфрама и платины) на кремний тензочувствительность диодов значительно повышается по сравнению с пленками из золота. Это можно объяснить тем, что вольфрам и платина более тугоплавки, чем золото, и их напыление происходит в течение гораздо большего времени и большей температуры, а значит, вероятность возникновения в кристалле кремния термоупругих напряжений повышается. Эти напряжения, так же как и нарушения структуры материала при обработке, могут быть причиной возникновения поверхностных состояний, которые приводят к повышению тензочувствительности диодов Шотки. На таком принципе был разработан ряд специальных технологических приемов повышения тензочувствительности диодов. Отмечено, что при облучении диодов Шотки  $\gamma$ -лучами тензочувствительность их значительно возрастает.



Были разработаны методы диффузии тяжелых элементов в кремниевых пластинах для увеличения рекомбинационно-генерационной составляющей обратного тока при введении в кремний, например, золота. Энергетические уровни располагаются примерно посредине ширины запрещенной зоны полупроводника и существенного влияния на свойства прибора не оказывают. Но при приложении внешних давлений эти уровни освобождаются и резко стимулируют процессы генерации и рекомбинации носителей в полупроводниках, а значит, приводят к увеличению обратного тока через контакт, тем самым увеличивая коэффициент тензочувствительности контакта. Наиболее простым технологическим приемом увеличения тензочувствительности поверхностно-барьерных диодов является увеличение поверхностных состояний, что практически выражается в ухудшении состояния поверхности полупроводника, шлифовка его грубыми порошками, создание полей микротрещин и микронапряжений.

Применение этих трех методов приводит к созданию диодов с очень высокой тензочувствительностью, достигающей 1 мА/г, т. е. при приложении к диоду сосредоточенной нагрузки в 1 г обратный его ток увеличивается на 1 мА. Для сравнения отметим, что у обычных диодов это значение достигает 5—7 мкА. С применением несложной схемы, сочетающей диоды с барьером Шотки и кремниевый транзистор, сформированные на одной пластине размером 0,2×0,2 мм таким образом, что диод Шотки своими контактами присоединяется к коллекторному и базовому выводам *n-p-n* транзистора, удается увеличить коэффициент тензочувствительности датчика до 8 мА/г. При создании диодов с барьером Шотки большое применение нашли эпитаксиальные пленки кремния толщиной 1—2 мкм, легированные глубокими примесными уровнями. Тензочувствительность таких датчиков достигала 12—17 мА/г.

Помимо диодов с барьером Шотки, высокой тензочувствительностью обладают туннельные диоды. Мы не будем подробно останавливаться на их электрических и частотных характеристиках, а оценим их тензочувствительные свойства для применения в датчиках давления.

Влияние давления на туннельный диод определяется изменением ширины запрещенной зоны полупроводникового материала, изменением вероятности туннелирова-

ния носителей, а значит, и величины тока, протекающего через *p-n* переход. Наибольшим значением зависимости изменения ширины запрещенной зоны ( $W_g$ ) от изменения приложенного давления ( $P$ ) обладают антимонид галлия и антимонид индия, у которых соотношение  $\Delta W_g/\Delta P$  равно соответственно

$$16 \cdot 10^{-12} \text{ и } 15,5 \cdot 10^{-12} \text{ эВ} \cdot \text{дин}^{-1} \cdot \text{см}^2,$$

в то время как у кремния это соотношение едва достигает  $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ эВ} \cdot \text{дин}^{-1} \cdot \text{см}^2$ . Соответственно и коэффициент тензочувствительности туннельных диодов для кремния составляет всего лишь 18, а для антимонида галлия 480.

Однако наряду с высокой тензочувствительностью туннельные диоды, как датчики давления, имеют ряд существенных недостатков, к основным из них можно отнести очень низкую мощность выходного сигнала, не превышающую 0,1 мВт, и высокую нелинейность выходного сигнала от прикладываемого давления. Последний недостаток можно устранить, применив схемы вторичного преобразователя, но это очень дорого.

Представляет интерес облучение туннельных диодов мощными потоками быстрых электронов. В этом случае на прямой ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода исчезает участок отрицательного сопротивления, что снимает ограничение по величине тока, проходящего через диод, а значит, и ограничение рассеиваемой мощности. Кроме того, линейность вольт-амперной характеристики значительно повышается. Такие чувствительные элементы находят в настоящее время практическое применение в высококачественных микрофонах.

Практически все полупроводниковые датчики давления со специально достигнутыми высокими тензочувствительными свойствами могут заменить во всех областях применения ранее существующие датчики давления, поскольку они имеют очень малые габариты (наименьший размер тензочувствительного диода с барьером Шотки всего лишь 50 мкм). Такие приборы обладают высокой тензочувствительностью, широким диапазоном измеряемых давлений (до 10 000 кг/см<sup>2</sup>), очень низкой инерционностью (доли микросекунд), температурным коэффициентом тензочувствительности, не требующим специальных методов термокомпенсации. Технология их



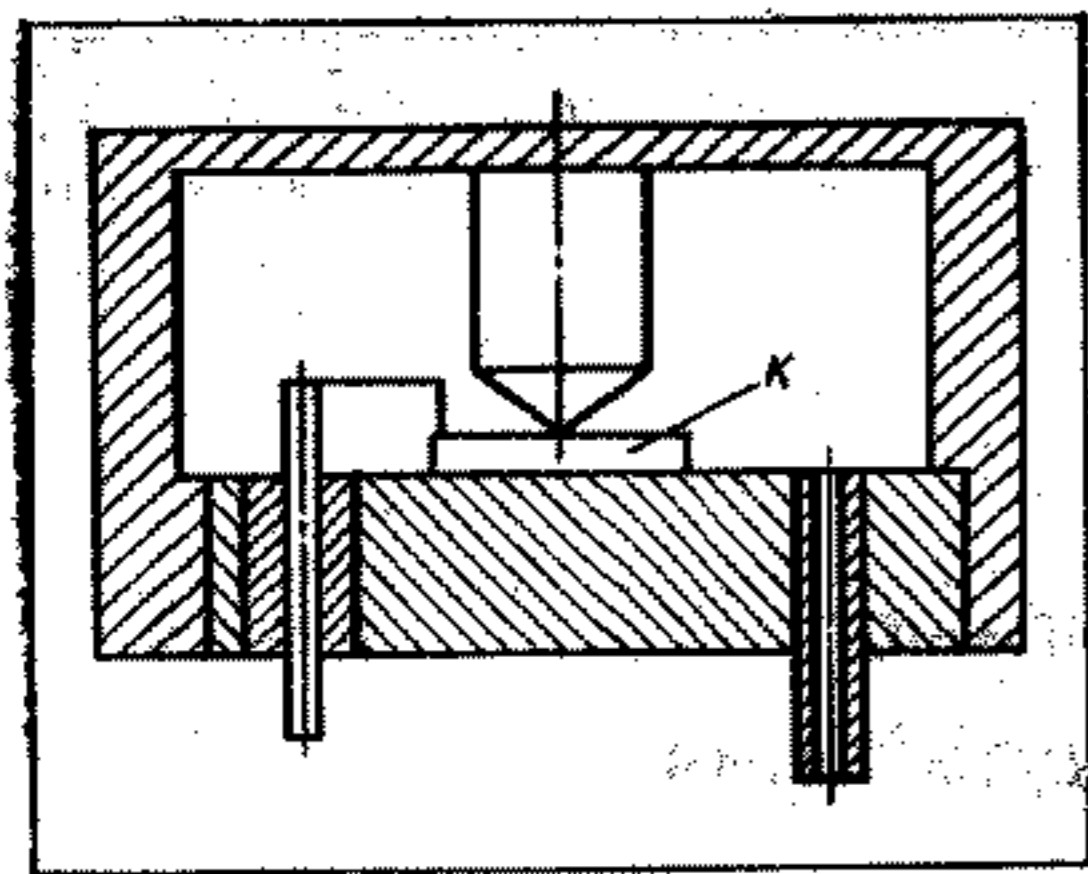
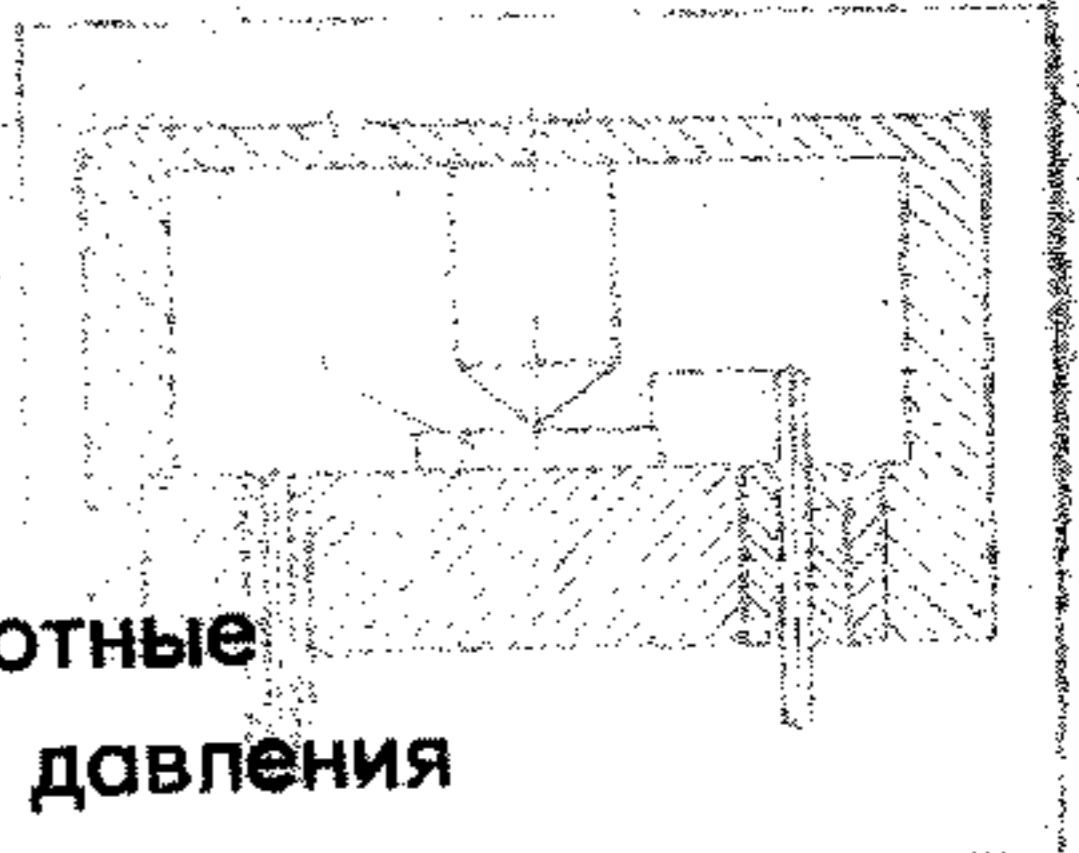


Рис. 5

Типичная конструкция такого датчика приведена на рис. 5. Недостатки ее совершенно очевидны: тонкая корундовая игла с размером контактирующей площадки от 15 до 200 мкм, оказывая воздействие на диод, разрушает его. Такая конструкция очень критична к ударам, вибрациям, ускорениям и тряскам. Разработка и усовершенствование существующих конструкций в настоящее время проводятся очень интенсивно. Представляет интерес предложенная американскими учеными игольная конструкция датчика давления. Она довольно проста и оригинальна: на кремниевой игле размерами порядка 100 мкм формируется диод с барьером Шотки, полученным по интегральной технологии. Таким образом, эти элементы слиты воедино и в какой-то мере устраняются указанные недостатки, но появляется другой — высокая хрупкость кремниевой иглы. Такая конструкция с успехом может применяться в высокочувствительных адаптерах и микрофонах.

изготовления хорошо совмещается с технологией изготовления интегральных схем. Но они имеют один очень существенный недостаток конструктивного характера, ограничивающий в настоящее время их практическое применение, — это необходимость воздействия на них осевого давления, т. е. воздействия иглой или шаром.

...вообще...  
...используют...  
...различными...  
...для...  
...взаимодействия...  
...и...  
...и...  
...и...  
...и...



## Вибрационно-частотные преобразователи давления

**Пьезоэлектрический измерительный преобразователь.** Первый опыт в применении пьезоэлектрических резонаторов (ПР) был связан с вопросами стабилизации и селекции частот. Эти проблемы решались выбором определенных конструкций, схем компенсации, технологических приемов для обеспечения стабильного поддержания частоты в радиоэлектронных системах при дестабилизирующих внешних воздействиях температуры, давления, вибраций, ускорений и пр. Таким образом, наличие отрицательного эффекта и тщательное изучение его свойств породило новое направление — разработку чувствительных к давлению и температуре управляемых пьезоэлектрических преобразователей. Работы по этому направлению начались давно, но бурное развитие они получили примерно 15 лет назад. Большой вклад в изучение акустоэлектронного взаимодействия и акустоэлектрических процессов и разработку ПР и датчиков внесли советские ученые: академик С. Г. Калашников, член-корреспондент АН СССР Ю. В. Гуляев, А. И. Морозов, И. М. Котелянский, В. В. Малов и другие. В настоящее время пьезорезонансные датчики нашли разнообразное применение, создано большое количество приборов для измерения механических перемещений, давлений, деформаций, угловых скоростей, линейных ускорений, устройств для измерения микромасс, влажности, толщины, химических и физических свойств веществ. Широкое применение управляемых пьезоэлектрических преобразователей обусловлено их высокой добротностью, воспроизводимостью параметров, отсутствием гистерезисных явлений, высокой временной стабильностью, химической и радиационной стойкостью, технологичностью процесса изготовления, надежностью в работе и рядом других факторов.



В основе физического принципа работы пьезоэлектрического преобразователя лежит явление пьезоэффекта, открытого в прошлом веке. Изучено это явление на кристаллах кварца, сегнетовой соли, титаната бария и др. Пьезоэффект может быть как прямым, так и обратным. При прямом пьезоэффекте на кристалл, состоящий из жестких диполей, воздействует внешнее усилие, вызывающее деформацию растяжения или сжатия, при этом молекулярные диполи определенным образом поворачиваются и изменяют поляризацию кристалла. На противоположных концах кристалла возникают связанные заряды, создающие электрическое поле и разность потенциалов. При переходе от растяжения к сжатию меняется знак поляризации и возникающего электрического поля. В этих же кристаллах обязательно наблюдается обратный пьезоэлектрический эффект: прикладывая к кристаллу электрическое поле, можно наблюдать его деформацию. Если электрическое поле меняется периодически с частотой, равной частоте собственных механических колебаний пластины пьезоэлектрика, то в ней возникают резонансные колебания. При этом как всякое упругое тело, пьезоэлемент обладает спектром собственных частот механических колебаний, который определяется его размерами и конструкцией, способом крепления в корпусе, упругими свойствами пьезоматериала и типом деформации элемента в процессе колебаний.

Пьезоэлектрические материалы анизотропны, их механические и электрофизические свойства различны по различным кристаллографическим направлениям кристалла. Обычно для пьезорезонансных датчиков используют кристаллический пьезокварц и пьезоэлектрическую керамику. Если на пластину пьезоэлектрического материала с нанесенными на нее электродами подать переменное электрическое поле, то кварц начнет колебаться с этой же частотой. В процессе колебаний между структурой и окружающей средой происходит обмен энергией, устанавливается определенное равновесное состояние системы. Измеряемое давление или усилие воздействует на характеристические параметры элементов структуры пьезоэлектрика и модулирует их. В результате этого изменяется амплитудно-частотная характеристика системы, и это изменение можно фиксировать по изменению частоты, фазы или амплитуды выходного сигнала.

Тензочувствительность пьезоэлектрического датчика

давления в общем случае можно определить как зависимость его резонансной частоты от внешнего воздействия давления. В принципе все пьезоэлектрики очень чувствительны к влиянию внешнего давления, так как при этом изменяются его геометрические размеры, плотность, упругие свойства, скорость распространения колебания, а это, в свою очередь, изменяет резонансную частоту. Чем больше отклоняется частота от резонансной при изменении давления, тем более высоким коэффициентом тензочувствительности обладает данный пьезоэлектрик.

Метрологические характеристики преобразователей давления в большей мере определяются значениями упругого гистерезиса и ползучестью, вызванными несоответствием свойств всех элементов, входящих в конструкцию. Наиболее ценными упругими свойствами обладает пьезокварц, сохраняя свои свойства вплоть до предела прочности. Проблема гистерезисных явлений наилучшим образом решается в монолитной конструкции, в которой совмещены тензочувствительный пьезорезонатор, упругий элемент, а также другие звенья механического преобразования. К сожалению, этот метод используется в отечественном приборостроении еще не полно, что объясняется сложностью технологии изготовления монолитных элементов, необходимостью механической обработки пьезокварца, его шлифовки и полировки. На практике при изготовлении датчиков давления наибольшее распространение получили низкочастотные тензочувствительные кварцевые преобразователи, работающие на изгиб, и высокочастотные с колебаниями сдвига по толщине кварца. Низкочастотные резонаторы не обладают высокой линейностью выходной характеристики, но очень точны (класса 0,01) и температурно стабильны. Высокочастотные преобразователи обладают хорошей линейностью характеристики, высокой пороговой чувствительностью и универсальностью.

В конструктивном отношении пьезоэлектрические датчики давления имеют две модификации: датчики, у которых пьезорезонатор работает в контакте с окружающей средой, и датчики с резонатором, отделенным от среды разделительным элементом. Первые преобразователи применяются для измерения давления только газообразных сред, вторые—пригодны для любой среды. Диапазон измеряемых давлений таких датчиков довольно широк и находится в пределах от 0,01 до 100 кг/см<sup>2</sup>. Ими



можно измерять абсолютное, избыточное и дифференциальное давление в полосе частот от десятков герц до десятков меггерц.

**Таблетки для определения вибрации.** В Ростове-на-Дону в конструкторском бюро «Пьезоприбор» при Ростовском университете созданы пьезопреобразователи, по виду напоминающие таблетки (диаметр 8 мм, масса 5 г). Раньше их приходилось собирать из нескольких различных узлов, а теперь достаточно одного монокристаллического блока из пьезокерамики. Он преобразует механические колебания в электрические сигналы, пропорциональные ускорению колеблющегося объекта, что позволяет определить силу вибрации. Источники питания не нужны, сама природа пьезокристалла обеспечивает выработку энергии. Ростовские таблетки применимы повсюду, где ведутся исследования или испытания устройств, подвергаемых динамическим нагрузкам в широком диапазоне частот и ускорений.

Интересный во многих отношениях датчик давления вибрационно-частотного типа разработан фирмой «Hewlett — Packard» (США). Чувствительным элементом датчика (рис. 6) служит прецизионный резонатор частотой 5 МГц, изготовленный в виде перемычки в пьезокварцевом цилиндре, который заполнен инертным газом и закрыт крышкой из пьезокварца. Измеряемое давление создает всестороннее сжатие кварцевого преобразователя (КП) и трансформируется в плоское сжатие резонатора-перемычки. Кварцевый блок размещается в корпусе (К), заполненном жидкостью. Для передачи давления внутрь полости используется мембрана малой жесткости. Для повышения стабильности градуировки приме-

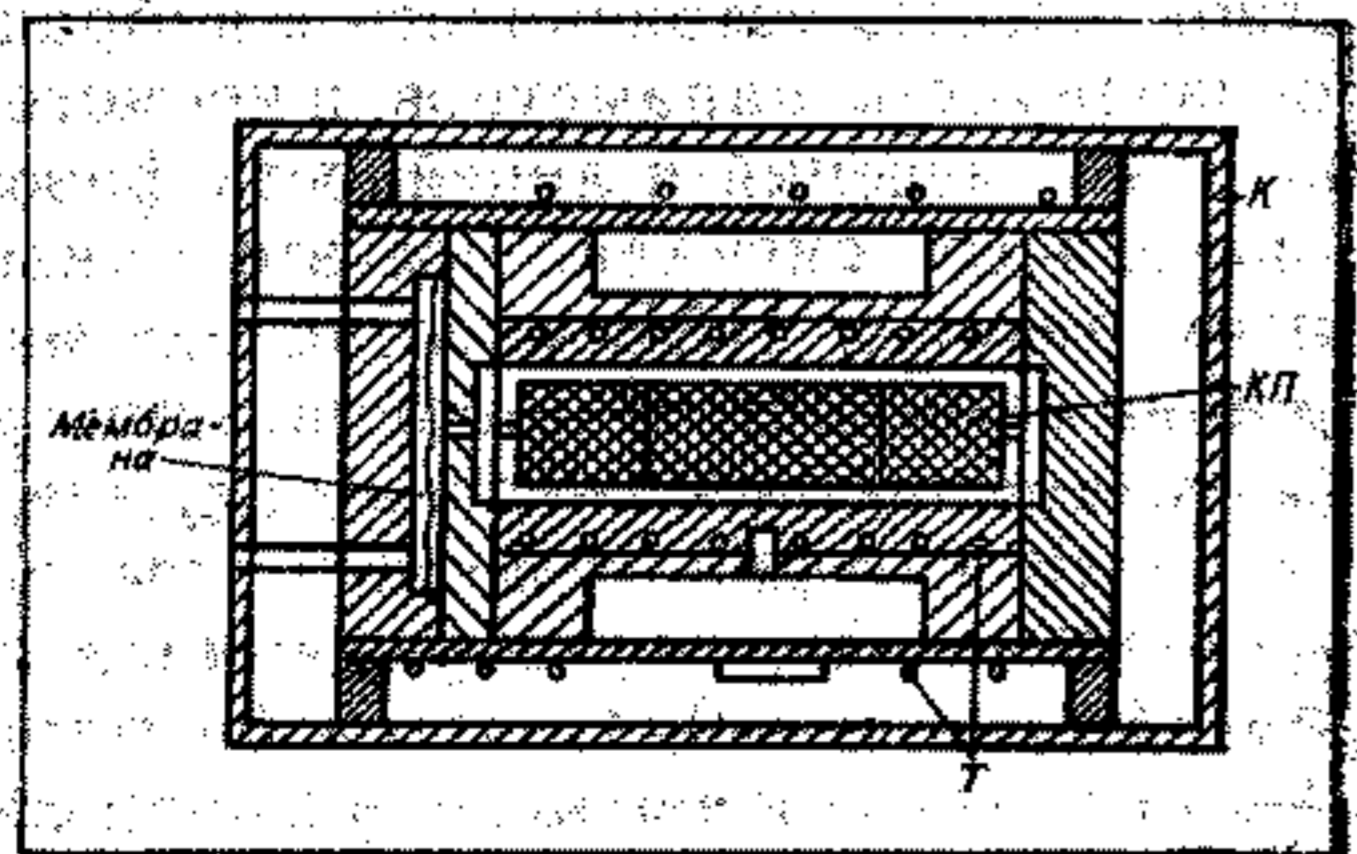


Рис. 6

няется двойное термостатирование (Т) внутреннего объема датчика. Электронная схема вторичного преобразователя позволяет подать на кварцевый преобразователь переменное поле с частотой 5 МГц и регистрировать измеряемое давление с цифровой индикацией в диапазоне до 70 мПа.

**Преобразователи на ПАВ.** Один из наиболее интересных и перспективных разновидностей вибрационно-частотных датчиков — это преобразователь, работа которого основана на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Десять лет назад о поверхностных акустических волнах в отечественной литературе появилось сообщение за авторством Ю. В. Гуляева — одного из крупнейших советских ученых в области акустоэлектроники. Именем ученого назван один из типов ПАВ. В настоящее время область применения таких акустических волн очень велика.

Поверхностная акустическая волна распространяется вдоль поверхности твердых тел в относительно тонком приповерхностном слое. Толщина слоя от долей до нескольких микрометров. С этой волной легко можно «связаться» на всем пути ее следования, т. е. создать ряд функциональных устройств с самыми разнообразными фазовыми и частотными характеристиками. При этом очень важно, что технология изготовления преобразователей на ПАВ совместима со стандартной планарной технологией интегральных схем, использующей хорошо разработанные процессы фотолитографии, диффузии, ионной имплантации, напыления и пр.

Большое преимущество приборы на ПАВ получили вследствие их малой массы и габаритов, хорошей температурной стабильности, устойчивости к вибрациям, хорошей воспроизводимости параметров, широкого динамического диапазона измерений и линейности фазовой характеристики выходного сигнала. Все это привело к бурному развитию техники ПАВ и созданию многочисленных приборов на их основе. В настоящее время промышленность выпускает акустоэлектронные линии задержки, частотные и полосовые фильтры, элементы с перестройкой частоты, усилители, преобразователи. Имеются опытные разработки преобразователей температуры и давления. Рассмотрим основные физические аспекты преобразователей на ПАВ.

**Диапазон частот акустоэлектрических волн, исполь-**



зубных в акустоэлектронике, находится в пределах от единиц меггерц до десятков гигагерц. При этом нижний предел определяется геометрическими размерами имеющихся кристаллов, а верхний — технологическими возможностями изготовления сверхминиатюрных элементов и вязкостным поглощением звука в кристаллической решетке твердых тел. Упругая волна возбуждается в пьезоэлектрическом материале при помощи специальных устройств — встречно-штыревых преобразователей (ВШП), нанесенных напылением на поверхность твердого тела (рис. 7).

Расстояние между штырями ВШП равно половине длины волны, возбужденной в пьезоэлектрике. Например, если нам необходимо в пьезоэлектрике возбудить колебания с частотой 100 МГц, то расстояние между штырями составит 40—50 мкм. Возбуждение ПАВ в пьезоэлектрике осуществляется подключением к ВШП генератора переменных электрических сигналов (Г). Переменное электрическое поле вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта возбуждает в кристалле упругие механические деформации, и по поверхности кристалла распространяется акустическая волна с частотой, равной частоте возбуждающего генератора. Пройдя заданное расстояние, эта волна будет упруго деформировать приемную пару ВШП, и вследствие обратного пьезоэффекта возникает электрическое поле и разность потенциалов на концах приемных штырей (П). Частота этого напряжения будет в идеальном случае равна частоте сигналов возбуждающего генератора. Но характеристики системы можно изменить с помощью изменения температуры.

Экспериментальные исследования устройств на ПАВ

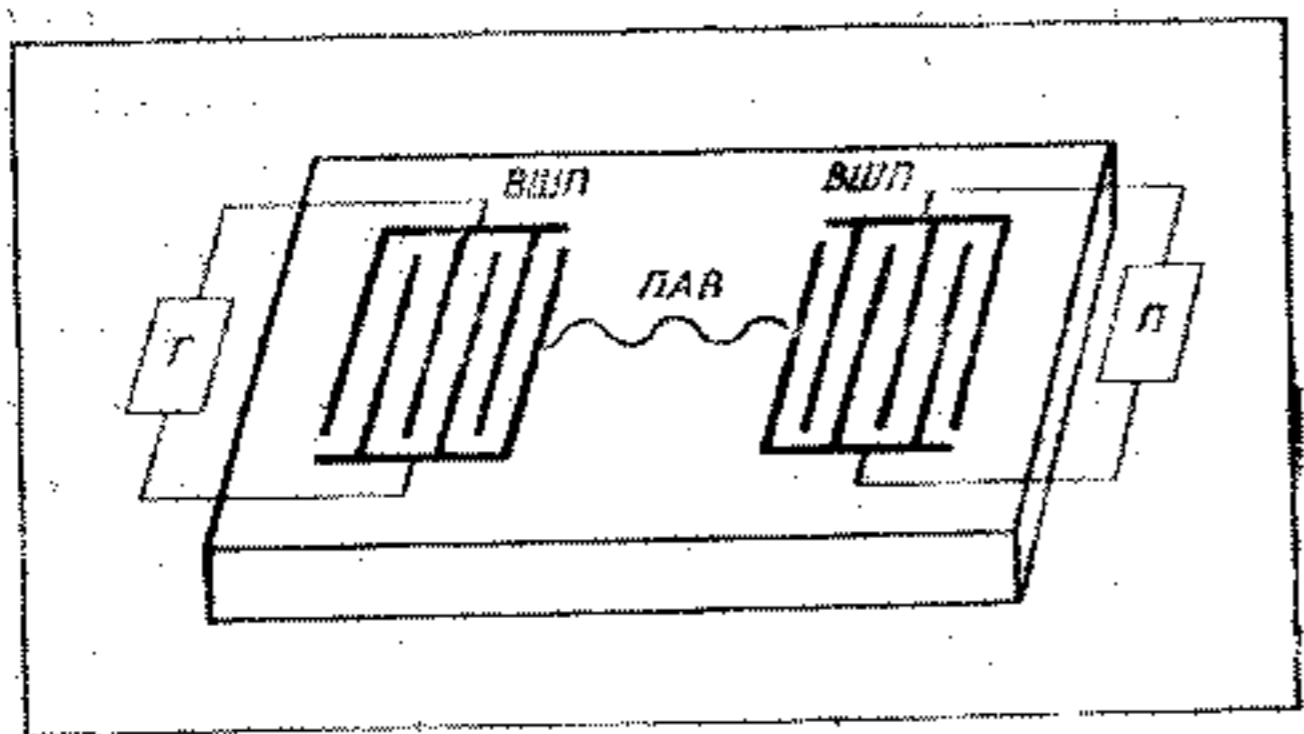


Рис. 7.

показали, что на распространение волны в веществе сказывается не только изменение длины пути, но и изменение фазовой скорости под влиянием деформации среды. При этом ответственными за эти процессы могут быть изменения модулей упругости вещества и плотности деформированного вещества. Для создания приборов на ПАВ чаще всего применяют плавленый кварц, ниобат лития и силикат висмута. Эти материалы характеризуются различной скоростью распространения ПАВ и эффективностью пьезоэлектрика или коэффициентом электромеханической связи. До недавнего времени наибольшее распространение в производстве приборов на ПАВ получил ниобат лития из-за его высокого коэффициента электромеханической связи, а кроме того, технология его производства хорошо освоена, он выпускается в виде больших пластин диаметром до 5 см. Но в настоящее время технология выращивания полупроводниковых кристаллов, на основе которой производится выращивание силиката висмута, позволила создать кристаллы длиной до 20 см и до 4 см диаметром. А так как скорость распространения ПАВ у силиката висмута (1708 м/с) в 2 раза меньше, чем у ниобата лития (3330 м/с), то из пластины силиката висмута можно изготовить, применив планарную технологию, в 2 раза больше преобразователей, т. е. снизить стоимость этих приборов. Напомним, что стоимость пьезоэлектрических материалов очень велика.

Акустоэлектрические усилители могут работать в комплексе с акустическими преобразователями давления и температуры. Работа основана на принципе акустоэлектронного взаимодействия. Если вдоль поверхности пьезоэлектрического материала распространяется ПАВ, то это характерно наличием связанного с ней электрического поля. Поместим рядом с пьезоэлектриком полупроводниковый или металлический приемник, тогда в нем наведется электрический ток. При наложении на такую взаимодействующую систему постоянного электрического поля последнее вызовет рост носителей заряда вдоль направления распространения волны со скоростью, несколько большей скорости акустической волны, и произойдет направленное усиление бегущих по поверхности волн.

Большой класс приборов составляет акустооптические преобразователи изображения, также работающие



на принципе акустоэлектронного взаимодействия. В данном случае в результате фотоэффекта в полупроводнике при его освещении возникают дополнительные носители зарядов, которые и взаимодействуют с ПАВ. Это явление дает возможность использовать акустические импульсы для построчной развертки оптического изображения, сформированного на полупроводниковом кристалле. При развертке импульсами более сложной формы можно получить пространственное преобразование оптического изображения, что практически очень трудно осуществить непосредственно в воспроизводящих устройствах других типов.

Но наибольший интерес с точки зрения преобразователей неэлектрических сигналов представляет разработка на ПАВ сверхчувствительных датчиков температуры и давления. Схематическое изображение такого датчика представлено на рис. 8. Конструктивно он похож на полупроводниковый мембранный датчик давления, у которого на поверхности вместо мостовой схемы сформирована система излучающих и приемных встречно-штыревых преобразователей. Основным элементом датчика служит тонкая мембрана, сформированная в пластине пьезоэлектрического кристалла кварца  $\gamma$ -среза. Толщина диафрагмы составляет 200 мкм, а диаметр ее 6,35 мм. Получена она ультразвуковым методом в подложке толщиной 1,6 мм. Акустические волны возбуждаются в кварце при помощи системы ВШП, рассчитанных для работы в одномодовом режиме на частоте 82,3 МГц.

Физический принцип работы такого датчика состоит в следующем. Высокочастотный сигнал с генератора по

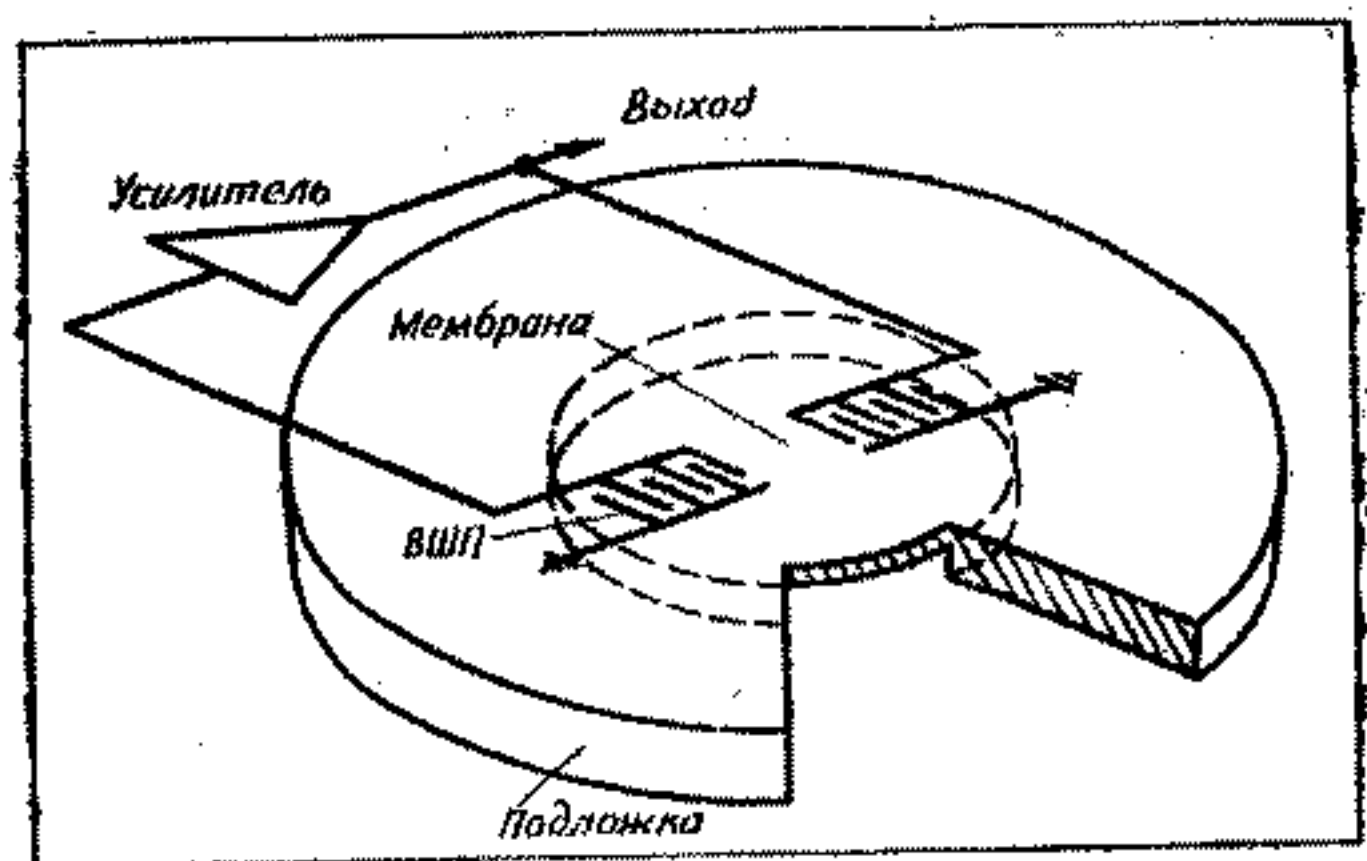


Рис. 8

цепи обратной связи подается на ВШП, возникающая акустическая волна пробегает по тонкой мембране, некоторый путь и попадает на приемный ВШП, где трансформируется в электрический сигнал. Если на мембрану действует внешнее давление, то она изогнется и ее длина изменится, т. е. теперь волна пройдет уже большее расстояние. А так как скорость ПАВ для каждого материала постоянна, то это расстояние она пройдет за большее время. Время задержки ПАВ будет пропорционально внешнему давлению.

В настоящее время изготовлены только опытные образцы датчиков давления на ПАВ. Они работают в диапазоне температур от  $-50$  до  $+100^\circ\text{C}$ . Погрешность измерения не превышает 0,1%. Чувствительность таких датчиков находится на уровне  $0,0001 \text{ кг/см}^2$ , т. е. значительно превосходит все имеющиеся на сегодня датчики давления. Датчик имеет частотный выход, что в практическом отношении представляет собой очень ценное свойство этого малогабаритного твердотелого прибора. Частотный выходной сигнал диафрагменного датчика с ПАВ может быть непосредственно обработан простой частотноизмерительной схемой и последующей передачей информации в систему цифровой обработки.



## Преобразователи скоростей воздушных потоков

В последнее время во многих областях науки и техники появилась большая необходимость в измерениях не только средних во времени, но и мгновенных значений параметров воздушных потоков. Такие измерения проводятся в различных системах охлаждения, термостатирования и кондиционирования. Имеется большое количество разработок датчиков скоростей потоков воздуха (СПВ), начиная от традиционных чашечных анемометров и заканчивая новейшими полупроводниковыми датчиками. По физическому принципу действия их можно разделить на датчики переменного перепада давления, датчики с переменным сечением сужающего устройства, датчики скоростного напора, тахометрические, датчики тепловые, ионизационные, акустические, датчики с метками потока. Каждый из этих типов датчиков обладает определенными особенностями в измерении параметров воздушных потоков, которые определяют область их использования.

Применяют кинематические, динамические и физические методы измерения. Кинематические методы измерения СПВ базируются на определении времени прохождения потоком определенного пути, который можно зафиксировать двумя устройствами, например, по меченым микрочастицам в потоке или искусственно заряженному облаку. По способу измерения параметров газовых потоков различают два типа динамических датчиков СПВ: газодинамические и термодинамические. Газодинамические — это датчики переменного перепада давления или скоростного напора, с переменным сечением сужающего устройства.

Рассмотрим для примера принцип работы датчика скоростного напора. Он базируется на использовании кинематической энергии движущегося потока. При тор-

можении потока среды в каком-либо сечении создается избыточное давление. Поэтому конструктивно он оформляется просто — две трубы, разнесенные на некоторое расстояние, подключаются к датчику измерения перепада давления. При этом плоскость входного отверстия одной трубы расположена перпендикулярно направлению потока, а входного отверстия другой трубы — параллельно потоку. Разность динамического и статического давления будет пропорциональна скорости потока, и по этим параметрам проводится градуировка датчика. Такие датчики очень точно измеряют большие по значению скорости потока. Недостаток всех газодинамических датчиков проявляется в зависимости чувствительности измерений от плотности движущейся среды.

Термодинамические датчики работают на принципе изменения термодинамического состояния приемного преобразователя от скорости или расхода получаемого потока и делятся на калориметрические, термоанемометрические и датчики теплового пограничного слоя. В датчиках теплового пограничного слоя термодинамическое состояние приемного преобразователя изменяется способом переброса тепла тонким пограничным тепловым слоем от нагревателя к термоприемнику. При этом основная масса потока в теплообменнике не участвует. Эти датчики точно измеряют СПВ в тонких сечениях, трубках или капиллярах. Следует отметить, что, зная диаметр капилляра, можно по скорости движения потока определить расход газа или жидкости в данном канале.

Термоанемометрические датчики СПВ работают на принципе охлаждения потоком газа нагретой тонкой металлической нити или полупроводникового кристалла, например нитевидного кристалла кремния. Скорость потока при этом определяется по величине тепловой конвекции между двумя сечениями.

Для измерения СПВ при помощи датчиков, основанных на физических принципах работы, обычно используют электрические, радиофизические, акустические и спектральные методы. При этом процессы взаимодействия потока газа с измерителем зависят от параметров газа. Электрический метод измерения основан на явлении создания ионов в движущемся потоке газа. Пучок ионов исходит от радиоактивных элементов. В зависимости от изменения СПВ меняется число ионов, проте-



кающих в этом потоке, а, следовательно, и значение ионного тока. Преимущество этого метода в малой инерционности и высоких значениях уровня выходного сигнала. На этом же принципе работают плазменные датчики при взаимодействии движущейся плазмы с электромагнитным полем.

Акустические датчики основаны на принципе распространения звуковых колебаний в движущейся среде. Скорость звука относительно неподвижной системы координат равна некоторой сумме скоростей звука и среды, т. е. учитывается эффект Доплера. Наибольшей чувствительностью эти датчики обладают при возбуждении колебаний ультразвуковых частот. Состоят они из двух излучающих пьезоэлементов (один из них излучает ультразвуковую волну по направлению потока, а второй — против) и из двух приемных пьезоэлементов, расположенных на одинаковом расстоянии от излучателей. При неподвижном газе волновая длина обоих акустических каналов одинакова, но при движении газа между ними возникает волновая разность, пропорциональная скорости газа. На принципе акустических датчиков работают также спектральные датчики СПВ, но они применяются, главным образом, для исследования быстрых течений газа и плазмы.

К сожалению, у данных методов и конструкций датчиков имеется больше недостатков, чем преимуществ: большие габариты и масса, низкая точность измерения (ошибка 5—10%), малый диапазон измерения, большие постоянные времени измерений. В значительной степени свободны от этих недостатков полупроводниковые датчики, работающие на различных физических принципах: магнитодиодный датчик, датчик с тензопреобразователями, с терморезисторами, на нитевидных кристаллах, с интегральными преобразователями.

Наиболее прост по принципу и схематическому решению магнитодиодный и тензопреобразовательный датчики СПВ. Они работают на принципе деформации упругой пластины при действии на нее движущихся потоков. В первом случае отклонение пластины изменяет величину магнитной индукции, действующей на магнитодиод, а во втором — деформация пластины изменяет сопротивление тензорезистора. Изменение сопротивления как магнитодиода, так и тензорезистора приводит к разбалансу мостовой схемы, в одно из плеч которой включены

эти чувствительные элементы. Чем выше скорость потока, тем больше упругая деформация пластины, тем значительнее разбаланс мостовой схемы. Чувствительность этих датчиков весьма высока, измерения можно проводить в широком диапазоне. Но у них довольно сложное конструктивное исполнение и высокая чувствительность к ударам и вибрациям.

Датчики СПВ с терморезистивным преобразователем работают на принципе переноса тепла при изменении скорости воздуха. Конструктивно они выполнены следующим образом: по обе стороны вольфрамового нагревателя (максимальная температура нагрева которого всегда должна быть несколько выше максимальной температуры движущихся потоков) располагаются две мостовые схемы из четырех терморезисторов каждая. При движении воздушного потока температура в зоне нагревателя уменьшается и в результате этого возникает градиент в местах расположения терморезисторов. Разбаланс мостовой схемы выдает сигнал, пропорциональный СПВ. Высокой чувствительностью и широким диапазоном измеряемых значений обладают датчики СПВ, изготовленные на основе нитевидных кристаллов кремния.

Большая заслуга в создании нитевидных кристаллов и датчиков на их основе принадлежит советским ученым К. В. Сандуловой, В. С. Постникову, С. А. Аммеру, Г. Ю. Чумаку и другим. Основное преимущество нитевидных кристаллов перед обычными монокристаллами проявляется в их высокой прочности, совершенстве структуры и поверхности и высокой чувствительности, достигающей  $7^\circ\text{C}$ . Практическое применение они нашли в качестве чувствительных элементов термоанемометров, в которых используются НК с исходным сопротивлением 500 Ом и температурным коэффициентом сопротивления  $2\%^\circ\text{C}$ . Конструкция их проста: два НК с припаянными к ним выводами располагаются параллельно один другому на расстоянии 0,3—0,7 мм. Элементы включаются в режим прямого подогрева. Движущийся воздушный поток, попадая на первый НК, охлаждает его, переносит тепло ко второму НК, также охлаждая его, но уже несколько более теплым воздушным потоком. Небольшие габариты датчика, малая инерция (порядка  $10 \div 50$  мс) и высокая чувствительность поз-



воляют фиксировать разность изменения сопротивления ИК, а значит, и скорость воздушного потока.

Большими возможностями обладают интегральные схемы для определения скорости и направления воздушных потоков. Прибор состоит из нагревателя и двух датчиков температуры, изготовленных на едином монокристалле кремния. Преобразователь обладает высокой чувствительностью, определяемой чувствительностью датчиков температуры, которая может достигать 10—15 мВ/°С. Линейность такого преобразователя сохраняется вплоть до СПВ, равной 20 м/с. Принцип его действия состоит в переносе тепла от одного датчика температуры полупроводникового подогревного резистора к другому. Возникающая при этом разность температуры пропорциональна скорости воздушного потока. Поскольку в зависимости от нагревания потока меняется соотношение температур транзисторов, то полярность выходного сигнала служит индикатором направления потока. Размеры такого чувствительного элемента с размещенными на нем рабочими элементами составляют 2 × 3 мм. Конструктивно он может быть выполнен только открытым, без защиты от агрессивных сред. Датчиком температуры в таком преобразователе может быть диод, транзистор, тиристор или интегральная схема с небольшой степенью интеграции.

Совершенно очевидно, датчики СПВ можно использовать для измерения расходов жидкостей и газов, поскольку в принципе своей работы в расходомерах можно в качестве чувствительного элемента использовать тензочувствительный или термочувствительный элементы. Наиболее часто для измерения расходов используются тензорезисторные элементы. Принцип действия такого расходомера следующий: в трубе, по которой протекает поток, устанавливается сужающее устройство и измеряется давление жидкости или газа до сужающего устройства и после него.

На принципе перепада давления основано также измерение расхода жидкости расходомерными трубами специальных форм и размеров. Это трубы Вентури, Далла, Хупера, сдвоенное сопло Вентури, труба Вази с обтекаемым соплом Вентури.

Тензочувствительный полупроводниковый элемент, работающий в вихревых расходомерах (рис. 9) на принципе срыва вихрей с какой-либо преграды (тела обтека-

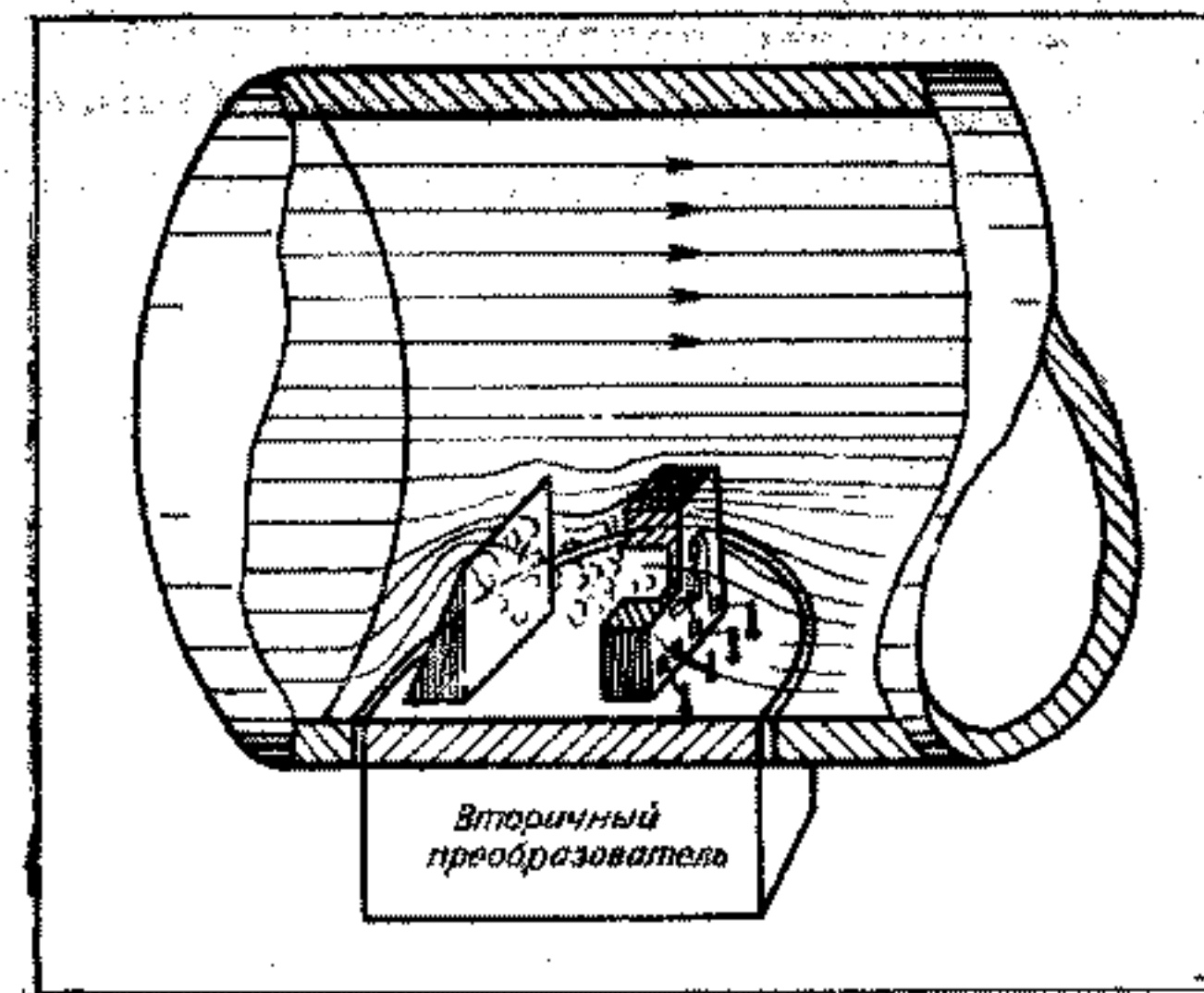


Рис. 9

ния), надежен в работе и позволяет производить измерения с высокой точностью. Если на пути ламинарного потока жидкости имеется преграда, то вследствие перераспределения энергии в потоке текущей жидкости будет происходить срыв вихрей с частотой, прямо пропорциональной расходу жидкости. Применение обычных мембранных датчиков давления на принципе срыва вихрей ограничено собственной частотой мембраны. Полупроводниковые тензодатчики, изготовленные с мостовыми тензорезисторами на кремниевой мембране или тензочувствительных диодах Шотки, имеют практически неограниченный частотный диапазон для любых скоростей ламинарных потоков. Они с успехом применяются при турбулентных потоках течения жидкости, а также в динамическом режиме.



## Датчики на основе оптических явлений

Из всего частотного диапазона видимый человеческим глазом свет занимает очень малый диапазон: от 0,4 до 0,7 мкм. За пределами этого диапазона электромагнитные волны можно обнаружить только с помощью специальных датчиков (приемников), регистрирующих взаимодействие излучения с веществом.

Для того, чтобы пояснить принцип работы любого из оптических датчиков, необходимо четко представлять механизм взаимодействия излучения с веществом. На сегодняшний день принято считать, что наиболее чувствительными веществами к электромагнитному излучению являются полупроводниковые материалы. Действие электромагнитного излучения на полупроводники можно разделить в основном на два процесса: возбуждение электронов, т. е. внутренняя ионизация, вызывающая появление избыточных свободных носителей заряда; нарушение периодической структуры кристаллической решетки, т. е. возникновение радиационных структурных дефектов.

Какие же задачи можно решать с помощью оптических и фотоэлектрических датчиков? Развитие современной техники ставит перед исследователями множество задач. Так, с помощью источника излучения, например лазера, можно проводить в порт корабля, осуществлять «слепую» посадку самолетов, получать и записывать информацию с высокой плотностью (в современных оптических запоминающих устройствах можно записать информацию с плотностью  $10^8$  бит/см<sup>2</sup>). Острая направленность монохроматического когерентного излучения позволяет концентрировать и передавать с малыми потерями электромагнитную энергию в заданную область пространства. Возможность временной и пространственной независимой модуляции части луча, сфокусированного на

площадку порядка квадрата длины волны излучения (примерно  $10^{-8}$  см<sup>2</sup>), позволяет проводить независимую, параллельную обработку информации, что является непременным условием создания высокопроизводительной вычислительной техники.

Возможность фотосчитывания, визуализации, например, с помощью электрически нейтральных фотонов, позволяет создать бесконтактные устройства и дает систему максимально удобной для использования. Особый интерес представляют бесконтактные функциональные преобразователи.

В настоящее время для различного рода датчиков, для целей оптоэлектроники и функциональной микроэлектроники в качестве источников света используются либо полупроводниковые лазеры, либо полупроводниковые некогерентные источники света на *p-n* переходах (светодиоды) и разрабатываемые в последнее время источники света без *p-n* переходов.

Самый распространенный вид датчика, основанного на оптических явлениях, — это фотоэлемент, преобразующий падающее на него оптическое излучение в фотоЭДС, или фототок.

Велик диапазон использования современных фотоэлементов — это автоматика и телемеханика, фотометрия, измерительная техника, метрология (астрофизические и космические исследования), кино- и фототехника, факсимильная связь, перспективно использование полупроводниковых фотоэлементов (фотоприемников) в системах энергоснабжения космических аппаратов, морской и речной навигационной аппаратуре, устройствах питания и др.

Рассмотрим далее конструктивные особенности и принцип действия современных оптических датчиков.

**Полупроводниковые фотоприемники.** Так как источники света характеризуются монохроматичностью излучения, то в первую очередь фотоприемники должны быть максимально чувствительны к определенной длине волны излучения, что называется спектральной чувствительностью. Для приемника белого света основной характеристикой должна быть интегральная чувствительность, т. е. сравнительно одинаковая фоточувствительность в широком спектральном диапазоне.

Современная техника требует высокой степени быстродействия. Поэтому одно из основных требований к



фотоприемникам — их малая инерционность. Инерционность полупроводниковых приемников определяется временем жизни носителей заряда, инжектированных светом. Так, для быстродействующих фотоприемников время жизни должно быть порядка  $10^{-8} - 10^{-10}$  с.

В условиях различных атмосферных помех (загазованность, туман, запыленность и др.) передача информации может осуществляться только в том случае, когда длина волны больше размеров частиц, рассеивающих свет. Поэтому приходится работать в области длин волн, больших 2 мкм. В этом случае чувствительность фотоприемника определяется примесными центрами, энергия ионизации которых меньше тепловой энергии при комнатной температуре. Для максимальной чувствительности такие приемники приходится охлаждать до температуры жидкого азота или еще более низкой температуры. Это делает фотоприемник громоздким и дорогим.

При наличии случайных (посторонних) источников сигнала на входе фотоприемника возникает «шум» — беспорядочный сигнал, снижающий пороговую чувствительность фотоприемника. Таким образом, существует минимальное значение сигнала, которое уже нельзя выделить из шума.

Перечисленным выше требованиям удовлетворяют лучше всего полупроводниковые материалы. Поэтому в качестве фотоприемников используются или приборы без *p-n* перехода — фоторезисторы или с *p-n* переходом (фотодиоды и фототранзисторы).

**Фоторезисторы.** Рассмотрим принцип действия фоторезистора (рис. 10, а). Полупроводниковая поликристал-

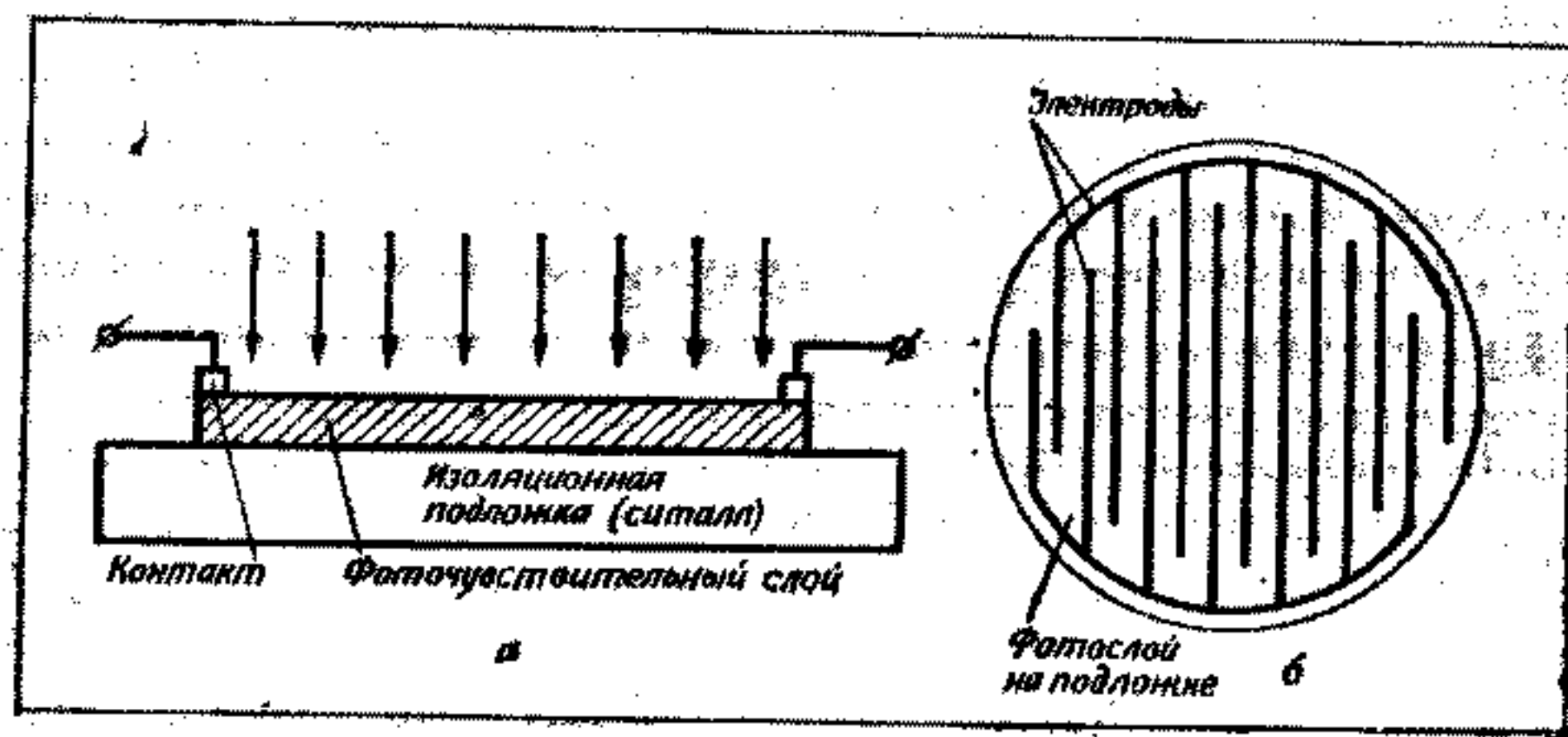


Рис. 10

лическая, аморфная или монокристаллическая пленка наносится на изолирующее основание (подложку). Причем геометрическая форма пленки строго задается. Свет с определенной интенсивностью и длиной волны освещает эту пластинку или ее часть. При этом энергия кванта света передается электрону. Если этой энергии достаточно, чтобы оторвать электрон от атома, то электрон переходит в свободное состояние и может участвовать в переносе заряда. Если концентрация таких свободных электронов сильно увеличивается при освещении фоторезистора, то ток растет в первом приближении пропорционально концентрации образовавшихся свободных носителей заряда. Так как число свободных носителей заряда может увеличиваться при освещении на несколько порядков, то и значение тока увеличивается на столько же порядков. Для повышения чувствительности фоторезистора применяют также специальную форму токовых электродов в виде гребенки, нанесенной на поверхность фоточувствительной пленки, например, селенида кадмия, обработанного специальным способом (рис. 10, б). На таких фоторезисторах удалось получить чувствительность к белому свету, имеющую 6—10 порядков. Такой материал в темноте обладает сопротивлением, близким к сопротивлению хорошего диэлектрика, а на свету его сопротивление составляет всего десятки ом.

Сравнительная простота схем и устройств на базе фоторезисторов позволила советским ученым под руководством чл. корр. АН УССР, проф. С. В. Свечникова разработать ряд специальных фотопотенциметров и функциональных фоторезисторов.

Под потенциометрами обычно понимают приборы, широко используемые в измерительной и вычислительной технике, в устройствах автоматического контроля, управления и регулирования, а также в радиотехнических цепях, следящих и отсчетных устройствах. Обычно все потенциометры имеют в своей конструкции подвижный электрический контакт. Такой контакт снижает точность и разрешающую способность устройства, его надежность и срок службы. Все эти вопросы можно решить, заменив подвижный электрический контакт фотоэлектрическим. В таком устройстве с помощью пространственного управления перемещением светового зонда можно получить переменный резистор, следящий и диф-



Ференциальный потенциометры (позиционно-чувствительные элементы), функциональные преобразователи. Эти приборы легко согласуются с микросхемами и, следовательно, могут быть использованы в устройствах электронной техники. Схематическое устройство фотопотенциометра представлено на рис. 11, а. Световой зонд выполняет функцию движка, т. е. в определенных участках замыкает резистивный слой фотополупроводника, сопротивление которого из-за освещения меняется. Выходное напряжение, пропорциональное падению напряжения на резисторе в данной точке, снимается с сопротивления нагрузки  $R_n$ . Таким образом, прибор может следить за пространственным положением источника излучения. Роль функционального фоторезистора может выполнять схема, изображенная на рис. 11, б. Здесь световой зонд перемещается вдоль фоточувствительного слоя, размеры которого меняются по заданному закону. Если параметры фоточувствительного слоя одинаковы по всей площади, то сигнал в цепи нагрузки будет определяться, в зависимости от положения светового зонда, формой эквипотенциальных поверхностей. Так, при одном и том же напряжении сигнал будет минимальный при положении зонда в правой части образца (освещается максимальная площадь фотослоя) и максимальный — в левой части (освещается минимальная площадь фотослоя).

С помощью таких функциональных фоторезисторов можно задать любой профиль межэлектродного расстояния и получить линейную, логарифмическую, косинусоидальную и другие характеристики. Можно получить также и прямоугольные импульсы с крутым фронтом нарастания. Приведенный на рис. 11 б функциональный фоторезистор, представляет собой наиболее простой прибор. Его можно усложнить, используя многослойную систему. При этом становится возможным реализовать более сложные функциональные зависимости, например получение координаты движущегося светового пятна в двухкоординатной системе и др.

**Фотоприемники с р-п переходом.** Если чувствительность фотоприемника должна быть высокой, то используют в качестве датчика фоточувствительные приборы с р-п переходом. Кроме высокой чувствительности они характеризуются хорошим быстродействием, малыми об-

ратными токами, линейностью характеристик, высокой температурной стабильностью.

К числу перспективных и быстро развивающихся в последнее время фотодиодных конструкций фотоприемников относятся кремниевые фотодиоды на основе р-і-п структуры, фотодиоды на основе барьеров Шотки и гетерофотодиоды.

**Кремниевые р-і-п фотодиоды.** Эти диоды имеют высокоомный і-слой с проводимостью, близкой к собственной для кремния. Слой служит основой для наращивания методами эпитаксии низкоомных слоев кремния с двух сторон пластины. Наличие і-слоя позволяет получить даже при небольших смещениях сильное электрическое поле в высокоомной области р-п перехода. Это обеспечивает малые рекомбинационные потери, так как электроны и дырки, которые легко рекомбинируют в области р-п перехода, в данном случае быстро рассасываются электрическим полем, что уменьшает темп рекомбинации. Кроме того, этим же процессом обеспечивается высокое быстродействие, так как сильное поле способствует быстрому рассасыванию объемного заряда. На таких приборах можно получить быстродействие порядка  $10^{-9}$  —  $10^{-10}$  с. К другим достоинствам этих приборов можно отнести малую барьерную емкость, высокую эффективность при малых обратных напряжениях. Но есть и недостатки, наиболее существенный из них — это низкая чувствительность на длинах волн, больших 1 мкм. Дело в том, что длина волны излучения, большая 1 мкм, находится на границе собственного поглощения и, следовательно, часть излучения проходит кремниевую

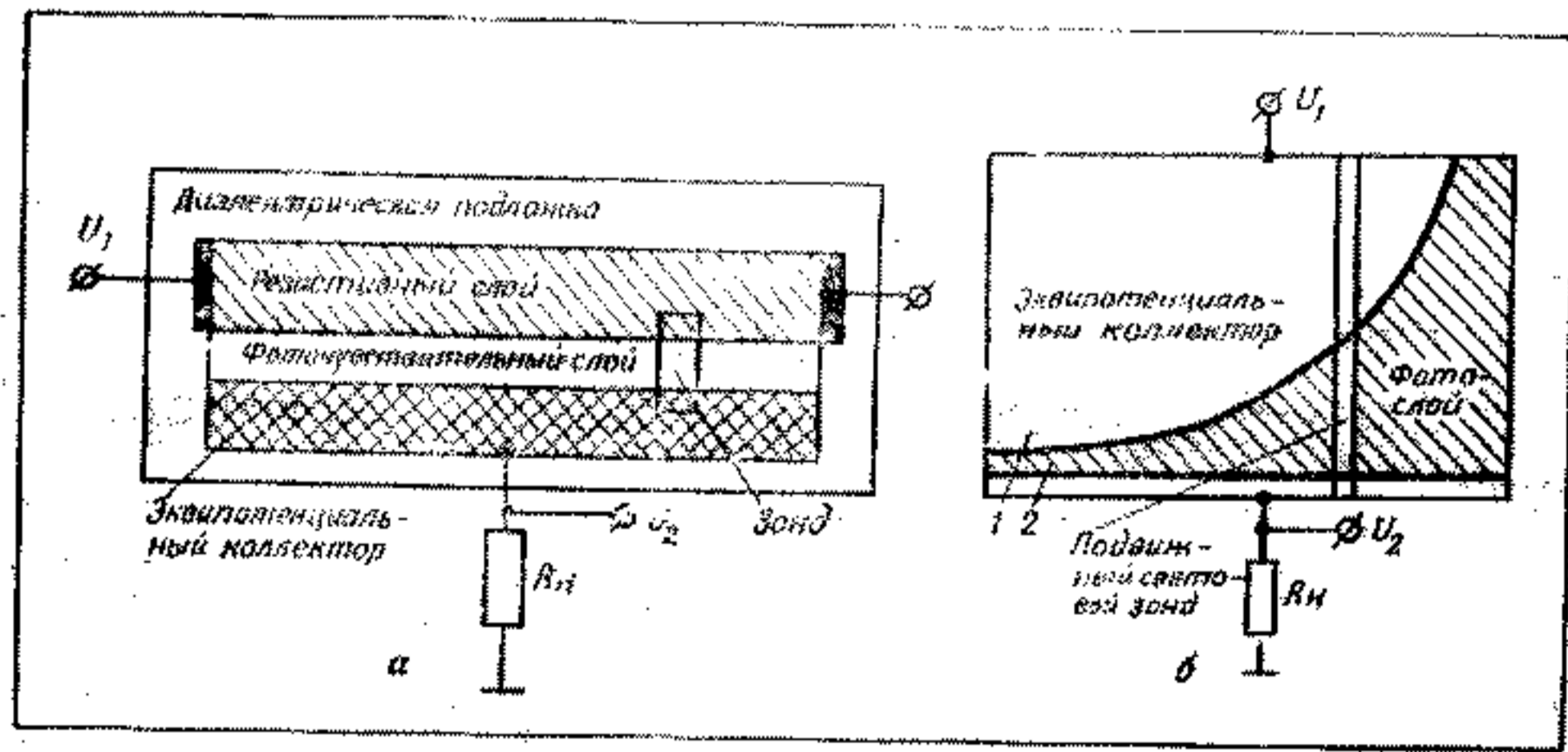


Рис. 11.



пластину, не взаимодействуя с материалом. Поэтому для эффективности прибора приходится увеличивать толщину  $i$ -слоя, что, как правило, нежелательно. С целью увеличения поглощения создают  $p-i-n$  структуры с боковым освещением, однако и эти структуры имеют недостатки.

**Фотодиоды на основе барьера Шотки.** По своим физическим свойствам и физике фотоэлектрических явлений контакт металл-полупроводник (т. е. барьер Шотки) близок к  $p-i-n$  переходу. В области контакта образуется область объемного заряда за счет термоэлектронной эмиссии электронов из полупроводника. Приложенное к  $p-n$  переходу обратное смещение почти полностью падает в области объемного заряда, что и создает здесь большую напряженность электрического поля. Далее процессы в  $p-n$  переходе происходят так же как и в случае  $p-i-n$  диода. Эти приборы эффективны в видимой и близкой инфракрасной области спектра. Практически кремниевые фотодиоды с барьером Шотки оказались удобными для длины волны, равной 0,63 мкм; при быстром действии порядка  $10^{-10}$  с получен предел, по фоточувствительности равный 0,5 лм/Вт.

Для работы в более длинноволновой области повышают удельное сопротивление базовой области и одновременно увеличивают ее толщину, т. е. переходят к  $m-i-n^+$  структурам. Однако и в этом случае решаются не все проблемы. В ряде случаев для решения перечисленных выше проблем используют другие полупроводниковые материалы.

**Фотодиоды на основе гетеропереходов.** Значительный интерес представляет собой целый класс быстро развивающихся в последнее время фотодиодов, так называемых гетерофотодиодов. У нас в стране разработкой и исследованием гетерофотодиодов руководит академик АН СССР Ж. И. Алферов.

Принцип получения гетероперехода заключается в том, что на подложке арсенида галлия  $n$ -типа методами жидкофазной эпитаксии последовательно наращивают сначала слой чистого нелегированного арсенида галлия  $n$ -типа, а затем слой твердого раствора  $p^+$ -типа.

**Многослойные фотоэлементы.** В настоящее время КПД фотоприемников на основе  $p-n$  переходов достиг максимума. При этом не ожидается увеличения КПД ни от изменения технологии, ни от замены материала. Од-

нако КПД можно увеличить за счет конструктивных решений. В самом деле, чаще всего фотоэлемент служит приемником белого света, а не монохроматического. Как было показано выше, максимальная чувствительность всех полупроводниковых материалов определяется шириной его запрещенной зоны. Это значит, что максимальный фотоответ будет наблюдаться в том случае, когда энергия падающего излучения равна энергии ширины запрещенной зоны. Следовательно, только небольшая часть спектра будет давать максимальный сигнал, а сигнал от всего остального спектра излучения будет незначительный. Для того, чтобы получить максимальный сигнал одновременно от всех участков спектра, необходимо расположить один под другим полупроводниковые фотоприемники таким образом, чтобы верхний фотоприемник имел максимальную ширину запрещенной зоны, а во всех остальных последующих слоях ширина запрещенной зоны последовательно уменьшалась. Можно подобрать фотоприемники таким образом, чтобы коротковолновое излучение максимально поглощалось в верхнем слое, затем часть прошедшего излучения поглощалась во втором слое и т. д. Расчеты показывают, что в этом случае можно получить КПД порядка 36,4% и использовать 73% энергии солнечного спектра для генерации пар электрон — дырка.

В настоящее время уже существует реальная возможность построения таких многослойных фотоэлементов на основе гетеропереходов.

**Фотоприемники инфракрасного излучения.** Для подобного рода фотоприемников используются обычно фоторезисторы, либо фотоприемники с  $p-n$  переходом, либо фотоприемники, работающие на основе фотогальваномагнитного эффекта. Работу фотоприемников в ИК диапазоне определяют свойства переходов типа валентная зона — зона проводимости или свойства переходов с примесных уровней. В первом случае используются узкозонные полупроводники, а во втором — примесные. К достоинствам узкозонных полупроводников по сравнению с примесными следует отнести более высокую фото чувствительность и быстродействие. Их можно использовать для оптической связи, дистанционного зондирования, контроля за уровнем загрязнения атмосферы, получения тепловых изображений, лазерной диагностики.

В настоящее время наряду с широко изученными по-



полупроводниковыми материалами, такими, как антимонид и арсенид индия, используются узкозонные полупроводниковые материалы на основе твердых растворов. К наиболее интересным твердым растворам такого типа относятся  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ,  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ . Интерес к этим материалам в последнее время возрос в связи с тем, что ширина их запрещенной зоны при изменении процентного содержания олова в твердом растворе может меняться в широких пределах, вплоть до значений, равных 0 эВ.

В настоящее время фотоприемники, захватывающие диапазон излучений 0,5—14 мкм, выпускаются в Советском Союзе, США, Англии. Основные усилия разработчиков направлены на изготовление многоэлементных матриц фотоприемников с большой плотностью элементов, что обусловлено требованиями увеличения пространственного разрешения и угла поля зрения приемника, а также обнаружительной способности датчиков, так как последняя пропорциональна корню квадратному из числа элементов.

**Приемники излучений с внутренним усилением.** Излучение, падающее на область базы эмиттера или коллектора фототранзистора, образует в этой области электроны и дырки. Эти носители диффундируют в направлении коллекторного и (или) эмиттерного переходов и разделяются потенциальными барьерами в этих переходах, увеличивая ток коллектора и (или) эмиттера. Благодаря этим фототокам наступает изменение напряжений на эмиттерном и коллекторном переходах. Это изменение вызывает инжекцию носителей заряда через эмиттерный переход в область базы и дополнительное увеличение коллекторного тока. Последнее зависит от коэффициента усиления фототранзистора по току (в режиме короткого замыкания), от способа включения в схему и от того, какая область фототранзистора подвергается освещению. Как и в фотодиодах, в фототранзисторах имеется фотоприемное стекло, через которое свет попадает на тонкий эмиттерный слой и, пройдя его, на базу. Максимальная чувствительность наблюдается в случае освещения базовой области в схеме с общим эмиттером и разомкнутой базой. За счет большого внутреннего усиления чувствительность фоторезистора значительно выше, чем у фотодиода. Еще большее усиление можно получить в составном фототранзисторе. К достоинствам фототранзисторов относится также схемотехническая, элек-

трическая и технологическая совместимость с интегральными схемами. Быстродействие фототранзистора в пределах  $10^{-4}$  —  $10^{-6}$  с, что значительно хуже, чем в фотодиодах. Это связано с их конструктивными особенностями и с необходимостью получения большой фоточувствительности. Последнее обеспечивается увеличением толщины базы и времени жизни носителей заряда, что, в свою очередь, увеличивает инерционность. Этому противоречия можно избежать, делая в одном технологическом цикле отдельно фотодиод и транзистор. Однако подобная схема уже представляет собой интегральный фотоприемник.

В настоящее время нашей промышленностью разрабатываются интегральные фотоприемники, функционально подобные фототранзисторам. Причем средства современной технологии интегральных микросхем позволяют разместить элементы схемы таким образом, что значительная часть его полезной площади остается под фоточувствительную площадку. Именно этот путь — путь создания интегральных фотоприемников (или фоточувствительных интегральных микросхем) — представляет будущее фототранзисторов.

Кроме фототранзисторов в качестве датчиков излучений, работающих в ключевом режиме, используют фототиристоры. Фототиристор представляет собой четырехслойную структуру, состоящую из двух транзисторов типа *p-n-p* и *n-p-n*. Основное достоинство фототиристора — способность переключения значительных токов и напряжений. На базе таких переключателей можно создать бесконтактные устройства управления выпрямителями и преобразователями, систем контроля линий электропередач, схем управления исполнительными механизмами в автоматике. В слаботоковых цепях используют наличие встроенной памяти: прибор остается во включенном состоянии даже после снятия светового воздействия.

Промышленностью СССР выпускаются и многие другие разновидности фотоприемников: полевые фототранзисторы с *p-n* или МОП затвором, фоточувствительные однопереходные транзисторы, S-диоды, фотоварикапы и др.

**Многоэлементные фотоприемники.** Эти приборы и датчики на их основе относятся к числу наиболее быстро развивающихся и прогрессирующих изделий электронной



техники. Сочетая в себе успехи физики дискретных фотоприемников и новейшие технологические достижения больших интегральных схем, многоэлементные фотоприемники позволяют создавать фотоэлектрические датчики, способные реагировать не только на яркостно-временные, но и на пространственные характеристики объекта, т. е. они воспроизводят не только характеристики обычных фотоприемников, но и функции позиционно-чувствительных элементов, а именно функциональных фоторезисторов или фотоэлементов. Однако для успешного выполнения этих функций необходимо, чтобы число элементарных фоточувствительных элементов в приборе было достаточно большим. Поэтому все многоэлементные фотоприемники представляют собой сканирующие системы, т. е. устройства, позволяющие производить анализ исследуемого пространства путем последовательного его просмотра.

Принцип восприятия образов этими системами сводится к следующему. Распределение яркости объекта наблюдения превращается в оптическое изображение и фокусируется на фоточувствительную поверхность. Причем фотоответ каждого отдельного элемента пропорционален его освещенности. Так как схема сканирования производит опрос всех элементов, то можно получить распределение четкости по исследуемому объекту, т. е. фактически вид самого объекта. Здесь в первую очередь требуется выполнение линейной зависимости между сигналом и освещенностью объекта. Для этих целей сейчас используется ряд приборов, таких, как сканистор, кремникон, фотодиодная матрица на МОП транзисторах, фотоприборы с зарядовой связью и др. Во всех случаях такие приборы включают в себя большое количество разделенных  $p-n$  переходов, составляющих матрицу или триодную структуру (сканйстор), т. е. структуру типа  $p+n-p^+$ . Здесь верхний и нижний слой  $p^+$  создают  $p^+-n$  переход, а нижний  $p^+$  слой используется в качестве контакта.

Применение многоэлементных фотоприемников разнообразно. Это системы автоматического контроля: контроля размеров, положения предметов, наличия дефектов, качества обработки, очистки и т. д. Эти датчики осуществляют автоматизацию связи, например, сортировку почтовой корреспонденции, применяются в фототелеграфии, видеотелефоне и др. Это аналог передающей телевизион-

ной трубки на основе твердотельного преобразователя изображения (мишень кремникона). На базе таких мишеней в принципе возможно создание искусственного электронного зрения. Активное участие в процессе формирования зрительного восприятия принимает участок рецептивного поля сетчатки, содержащий несколько десятков тысяч элементов. Скорость передачи информации по зрительному нерву близка к  $5 \cdot 10^6$  бит/с. Электронным аналогом описанного процесса с технической точки зрения является прибор с зарядовой связью (фото-ПЗС) в сочетании с микропроцессорами. Собственно такой прибор может послужить аналогом для создания искусственного глаза. Дальнейший прогресс разработки датчиков этого направления будет связан с созданием «трехцветных» (например, на основе мозаичных гетероструктур) и трехмерных отображений, осуществляющих не только восприятие образов, но и необходимую обработку видеосигналов.



## Датчики на основе магнитных явлений

**Основные характеристики магнитных материалов.** Для того, чтобы рассмотреть возможность использования магнитных материалов в качестве датчиков, необходимо представить себе основные характеристики магнитных материалов.

В первом приближении можно считать, что магнитные свойства материалов обусловлены суммарным магнитным моментом ядра атома, магнитными моментами электронов, вращающихся вокруг ядра атома (орбитальный магнитный момент) и вокруг своей оси (спиновый магнитный момент). Существует ряд элементов переходной группы таблицы Менделеева (железо, никель, кобальт и редкоземельный элемент гадолиний), которые имеют отдельные электронные подоболочки, не полностью заполненные электронами. При этом заполняются в этих материалах следующие электронные подоболочки. Строго говоря, таких элементов в таблице Менделеева значительно больше, однако только в перечисленных выше материалах соседние атомы с незаполненными подоболочками располагаются таким образом, что их магнитные моменты складываются. В результате такого взаимодействия в материале образуются области с самопроизвольной намагниченностью — домены. Эти области полностью определяют магнитные свойства материалов. Так, например, если увеличивать внешнее магнитное поле, то домены выстраиваются по направлению поля. В материале возникает магнитная индукция, которая возрастает с ростом внешнего магнитного поля. При изменении направления внешнего поля происходит перемагничивание материала, т. е. поворот доменов в обратном направлении.

Высоким быстродействием перемагничивания обладают материалы, у которых характер взаимодействия

между соседними атомами с незаполненными оболочками такой, что суммарный магнитный момент отдельных атомов компенсируется. Такие материалы получили название антиферромагнетиков, или ферромагнетиков. На основании этих материалов с добавками чисто магнитных материалов изготавливают ферриты. Эти материалы могут работать в СВЧ диапазоне, т. е. иметь быстродействие порядка  $10^{-10}$  с.

Особый интерес представляют датчики типа запоминающих устройств. Для этих датчиков используются материалы с так называемой прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). Параметры материалов с ППГ отличаются от обычных материалов, например, в устройствах переработки информации они должны иметь малые значения коэрцитивной силы, а в устройствах хранения информации — большие. При этом увеличивается быстродействие.

Одной из основных характеристик магнитных материалов является температура фазового перехода, или так называемая температура Кюри. Эта температура для различных материалов лежит в пределах от нескольких десятков градусов Цельсия до нескольких сотен. В некоторых материалах точка Кюри может лежать и при более низкой температуре, например при температуре жидкого азота ( $-196^\circ\text{C}$ ). При температуре выше точки Кюри самопроизвольная намагниченность исчезает, и материал перестает быть магнитным. Это свойство используют в датчиках, например, для записи информации.

Датчики, основанные на взаимодействии магнитного поля с веществом, можно разделить на две группы.

Во-первых, датчики, у которых свободные носители заряда (электроны) взаимодействуют с внешним магнитным полем. К ним относят датчики, использующие эффект Холла и эффект магнитосопротивления, т. е. изменение сопротивления материалов электрическому току при наличии внешнего магнитного поля. Как правило, эти датчики получают на основе немагнитных материалов. И во-вторых, датчики на основе магнитных материалов.

К первой группе относятся датчики, позволяющие определять значение магнитного поля. Наиболее чувствительны к таким эффектам полупроводниковые материалы. Через образец специальной геометрии пропускается



электрический ток. Если перпендикулярно к линиям тока в образце направить магнитный ток, то на движущиеся в таком образце электроны будет действовать сила Лоренца. Под действием этой силы электроны будут отклоняться к боковой поверхности образца, заряжая ее отрицательно. При этом противоположная сторона зарядится положительно. Появится ЭДС Холла, значение которой будет зависеть от формы и геометрии образца, силы тока, протекающего через образец, значений магнитного поля, подвижности свободных носителей заряда. Так как подвижность свободных носителей заряда максимальна именно в полупроводниковых материалах, то датчики на них обладают максимальной чувствительностью. Из всех полупроводниковых материалов максимальной подвижностью свободных электронов обладает соединение индия и сурьмы. Подобные датчики были использованы на советских и американских спутниках и космических кораблях для определения магнитного поля Земли, Луны, Венеры, Марса и др.

Принцип работы датчиков, в которых использовано явление изменения сопротивления материалов в магнитном поле, основан также на силе Лоренца. Искривление траектории носителей в магнитном поле соответствует увеличению пути, пройденного свободными носителями заряда. Если траектория электрона искривляется достаточно сильно, то такой электрон достигает боковой поверхности образца и далее в переносе заряда практически не участвует. Для того, чтобы искусственно увеличить длину траектории электрона, необходимо создать боковую поверхность с радиусом закругления, близким к радиусу кривизны траектории подвижного электрона. Такие датчики хорошо известны, они получили название дисков Карбино. Так как многие полупроводниковые материалы анизотропны, т. е. неоднородны по различным кристаллографическим направлениям, то анизотропным будет и эффект магнитосопротивления. Используя анизотропию во многих полупроводниковых материалах, были рассчитаны структуры зонных диаграмм для различных кристаллографических направлений, т. е. в этом случае сам материал служил датчиком, в котором измерялось магнитосопротивление при известных параметрах внешнего поля.

Вторая группа датчиков, основанных на изменении свойств магнитных материалов, также достаточно хоро-

шо известна и описана. Однако в последнее время появился ряд новых материалов, на базе которых разрабатываются оригинальные датчики. Интерес к ним с каждым годом все возрастает. Такие датчики разрабатываются на базе магнитных полупроводниковых материалов и, в частности, на базе магнитных материалов, в которых при определенных условиях образуются цилиндрические магнитные домены.

**Датчики на основе магнитных полупроводников.** Несмотря на то что первые теоретические и экспериментальные исследования магнитных полупроводников начались в начале 60-х годов, интерес к этим материалам с каждым годом увеличивается. Уже к 1977 г. в нашей стране и за рубежом было синтезировано около 60 магнитных материалов, обладающих такими свойствами.

Магнитный полупроводник, как и любой другой, изменяет свои свойства под действием температуры, освещения, электрического поля. При этом данные изменения можно проводить локально, что, в свою очередь, приводит к локальным изменениям магнитных свойств материала. Кроме того, ферромагнитные полупроводники могут быть использованы в качестве модуляторов света (эффект Керра). Уже сейчас рассматриваются возможности использования магнитооптических свойств этих материалов в лазерной технике. Например, физический принцип работы модуляторов и дефлекторов лазерного луча основан на эффектах Керра и Фарадея. Магнитные полупроводники могут быть прозрачными как в видимой, так и в инфракрасной областях спектра. Под действием сильного магнитного поля в магнитном полупроводнике образуются области с высоким сопротивлением, что дает возможность создания приборов, механизм работы которых основан на электромагнитных доменах. Поэтому на базе магнитных полупроводников разрабатывают запоминающие устройства, магнитооптические датчики, датчики для неразрушающего считывания информации со скоростью, превышающей  $10^6$  бит/с. Например, недавно сконструированы оптические затворы для подавления нежелательных мод в лазерном луче. Такими затворами можно управлять как электрическим, так и магнитным полем.

В последнее время активно ведутся разработки оптической памяти на основе магнитных полупроводников. Это так называемая термомагнитная запись, в которой



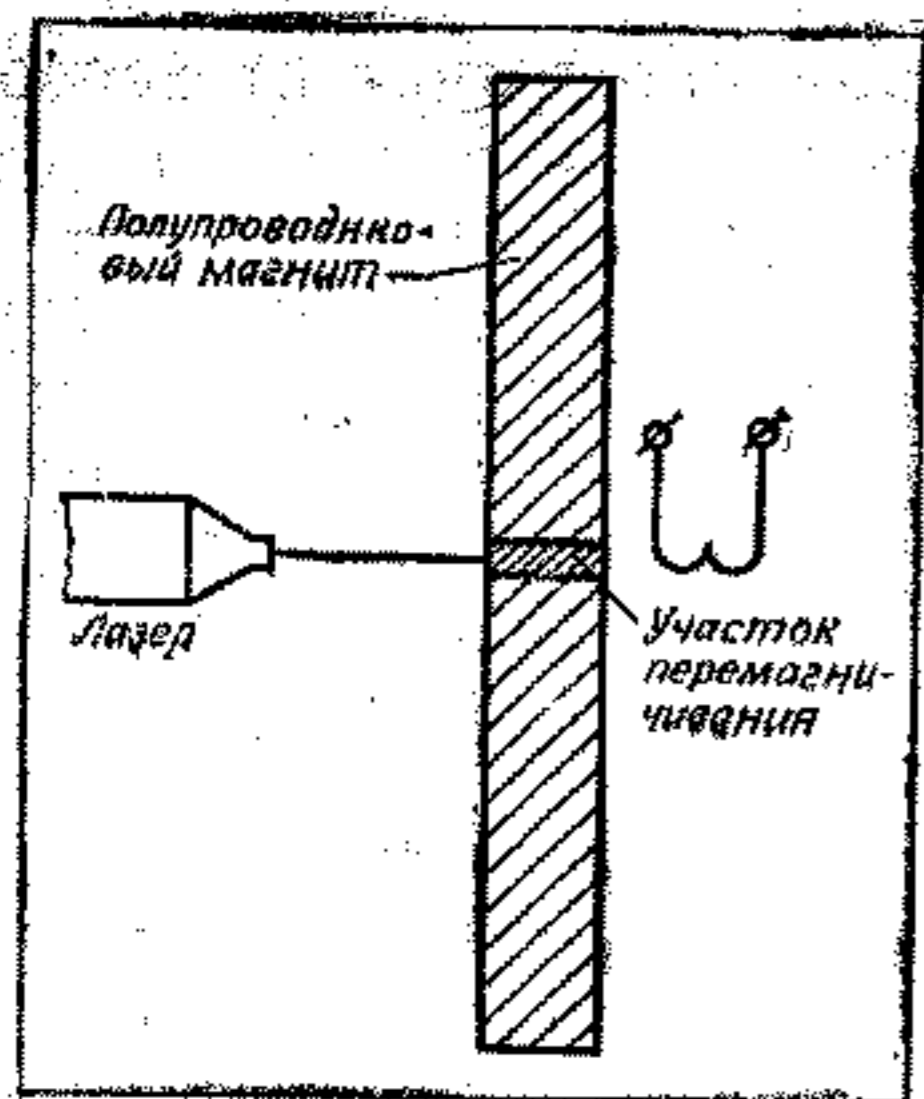


Рис. 12

используется свойство магнитных материалов менять свои параметры при температуре Кюри ( $T_K$ ). При этом применяют либо поячеечный, либо голографический способы записи информации. При поячеечном способе на пленку магнитного полупроводника направляется луч лазера (рис. 12), сфокусированный в пятно диаметром 1—5 мкм. При этом температура освещаемого участка образца повышается до температуры  $T_K$ . При этой температуре нагреваемый участок теряет магнитные свойства. Специальным витком, создающим магнитное поле в локальном участке, прогретый участок вновь намагничивается в направлении, противоположном намагниченности пленки. Таким образом, появляется участок с перевернутой намагниченностью, что соответствует записанной информации. Плотность записанной информации зависит от скорости нагрева отдельного участка, скорости намагничивания этого участка, намагниченности соседних участков. Для считывания записанной информации используется эффект Фарадея, заключающийся в том, что плоскость поляризации электромагнитного излучения, проходящего через намагниченное вещество, поворачивается. Направление и угол поворота плоскости луча зависят от направления и величины намагниченности. На этом принципе работает ряд приборов СВЧ-устройства первой группы. Если теперь за пленкой расположить анализатор, т. е. приемник, анализирующий направление и угол поворота плоскости поляризации луча, то можно считывать записанную информацию без ее разрушения.

При использовании голографической записи информации, основанной на этом принципе, можно проводить запись одновременно большого числа световых точек.

Описанные датчики можно видоизменить; для этого используются две плоскопараллельные полупроводниковые магнитные пленки. Электромагнитная волна, проходя через намагниченную пленку, становится плоскопо-

ляризованной. Если на некотором расстоянии от первой расположить вторую пленку, то в зависимости от направления намагниченности второй пленки или отдельных ее участков электромагнитное излучение или пройдет через вторую пленку, или будет задержано. Для второго случая направление намагниченности второй пленки должно быть антипараллельным, т. е. направлено встречно направлению намагниченности первой пленки. В этом случае значительно упрощаются датчики, фиксирующие наличие записанной информации по сравнению со случаем, рассмотренным выше. Для таких пленок используются  $\text{EuO}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{EuS}$ ,  $\text{Ni-Fe}$ . Кроме перечисленных выше датчиков, на основе магнитных полупроводников разрабатываются датчики на полупроводниковых приборах с отрицательной проводимостью, имеющих  $N$ - и  $S$ -образные характеристики, магнитоуправляемых диодах Шоттки, лавинопролетных диодах, варикапах и др.

На основе приборов с  $S$ -образной вольт-амперной характеристикой созданы элементы памяти и переключатели из низкопроводящего состояния в высокопроводящее. Все это управляется магнитным полем. В настоящее время магнитоуправляемые  $p$ - $n$  переходы получены на основе  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ . На специально подготовленную поверхность из  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  (проводимость  $p$ -типа) введена примесь серебра и нанесена пленка индия толщиной 5 мкм. В зависимости от температуры и условий нанесения пленки индия получают плавный или резкий  $p$ - $n$  переход. Так как температура  $T_K$  сильно изменяет свойство магнитного материала, то и все свойства  $p$ - $n$  перехода, кроме обычных зависимостей от температуры, еще имеют зависимость, связанную с  $T_K$ . Так, например, разработан туннельный диод, хорошо управляемый магнитным полем при определенной температуре.

Датчики на основе цилиндрических магнитных доменов. В настоящее время исследования и разработки в области материалов с ЦМД находятся в стадии интенсивного развития; этими разработками заняты ученые Советского Союза, США, Японии и западноевропейских стран. Во всем мире ведется поиск материалов, позволяющих получить ЦМД с характеристиками, приемлемыми для реализации ЗУ с диаметром доменов, меньших 1 мкм. При этом плотность записи информации возрастет примерно в 5 раз. Разработан однокристалльный процессор на ЦМД с диаметром домена



0,5 мкм. При этом на кристалле 25×25 мм размещены 3У емкостью 125 Кбит, а логическая часть состоит из 1000 вентиляей.

Разрабатывают и аморфные пленки, на которых создают ЦМД. Простота получения аморфных пленок, возможность получения ЦМД с малыми диаметрами (0,1—2,0) мкм, малые значения намагниченности насыщения — все это должно обусловить меньшие значения управляющих полей, что делает заманчивым использование аморфных пленок в 3У на ЦМД.

### ОПУБЛИКОВАНО В ПЕЧАТИ

Полтора десятилетия назад впервые в СССР сотрудники Института физики АН УССР предложили оригинальный приемник излучения — болометр, действие которого основывается на пьезоэлектрическом эффекте — возникновении зарядов на некоторых гранях сегнетоэлектрических кристаллов при их облучении. Бесконтактный и малоинерционный способ измерения температуры нагретых тел — главная отличительная особенность новинки. Она сразу завоевала симпатии всех, кто имел прямое отношение к радиометрии.

Разработанные киевлянами тепловые приемники излучения нашли применение и в оптической аппаратуре советских искусственных спутников земли «Метеор». Они, в частности, помогают собирать сведения, необходимые для составления долгосрочных прогнозов погоды.

Расчеты, проведенные специалистами Госстроя Украинской ССР, показали, что только на предприятиях республики эта новинка позволит сэкономить за год более пяти миллионов рублей.

\* \* \*

Фирма «Интернешнл бизнес машинз корпорейши» разработала компактный прибор для быстрого измерения длины волны настроенных лазеров на красителях.

Корпус прибора имеет 30 см в длину. Точность измерений  $1 \times 10^{-7}$ , что на длине волны около 5000 Å составляет  $\pm 0,001$  Å. Измерение производится интерферометрическим методом, т. е. определением отношения интерференционных полос лучей с известной и неизвестной длинами волн. Длительность импульсов в таком интерферометре составляет около 0,01 длины волн.

\* \* \*

Выпускаются специализированные автомобильные ЭВМ, автоматически контролирующие скорость и режим работы двигателя. Так, ЭВМ «Компьюкруиз» производит расчет допустимой скорости автомобиля с учетом дорожных знаков и требуемого времени прибытия в пункт назначения. ЭВМ «Принц» автоматически предупреждает о возникающих аварийных ситуациях, о необходимости объезда, бли-

жайшем полицейском посту и т. п. ЭВМ «Авгар» контролирует и воспроизводит такие параметры, как число оборотов двигателя, температура масла, на основании чего водитель выбирает скорость. Цена от 160 до 350 долларов.

Информацию автомобильные ЭВМ получают от специальных датчиков, состоящих из катушки и магнитов. Для определения скорости движения по известному пройденному пути в ЭВМ предусмотрены цифровые часы с кварцевым генератором, являющимся эталоном времени. ЭВМ «Компьюкруиз» с 20 клавишами выполняет 44 функции.

\* \* \*

Фирма «Лайон лабораториз» (Кардифф) разработала прибор «SL-2» для определения на месте степени опьянения. В состав этого прибора входит электрохимический топливный элемент, вырабатывающий напряжение пропорциональное содержанию алкоголя в крови, определяемого по пробе выдыхаемого воздуха. Водитель отправляется на экспертизу лишь при определенном показателе прибора. Такие меры связаны с тем, что около 10 000 из 60 000 водителей в год по анализу мочи и крови признаются допустимо опьяневшими в связи с тем, что они протрезвляются до доставки в медпункт.

\* \* \*

Фирма «Ригаку» (Япония) разработала рентгеновский анализатор остаточных напряжений и механических деформаций в элементах крупных конструкций, принцип действия которого основан на изменении межатомного расстояния в материалах под воздействием внешних сил. Деформации в проверяемом материале обуславливают дифракцию рентгеновских лучей, на основании которой и определяется величина деформаций и напряжений. Определение физических величин остаточных напряжений и деформаций производит микропроцессор.

### Литература

- Амброзьяк А. Конструирование и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. М., Советское радио, 1970.  
Викунин И. М. Магнито-транзисторы. М., Электроникл, 1978.  
Ильинская Л. С., Подмарьков А. П. Полупроводниковые термодатчики. Ленинград, Энергия, 1966.  
Миллов В. В. Пьезорезонансные датчики. М., Энергия, 1978.  
Кривонос А. П. Полупроводниковые датчики температуры. М., Энергия, 1974.  
Курносоев А. П., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов. М., Высшая школа, 1974.  
Магден П. П., Сухарев Ю. Г. Новые полупроводниковые приборы. М., Знание, 1975.  
Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. М., Советское радио, 1977.  
Рыбин В. Н. Физика и техника полупроводников, 1972, № 7, с. 190; 1973, № 8, с. 499.  
Свечников С. В., Смирнов А. К., Каганович Э. В. Фотопотенциометры и функциональные фоторезисторы. М., Советское радио, 1978.



## Содержание

Предисловие . . . . .	3
Преобразователи давления . . . . .	6
Полупроводниковые датчики давления . . . . .	12
Темпозчувствительность полупроводниковых приборов . . . . .	23
Вибрационно-частотные преобразователи давления . . . . .	29
Преобразователи скоростей воздушных потоков . . . . .	38
Датчики на основе оптических явлений . . . . .	44
Датчики на основе магнитных явлений . . . . .	56
Литература . . . . .	63

*Игорь Никитович Магден*  
*Владимир Николаевич Рыбин*

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерышкин*. Редактор *Б. М. Васильев*. Мл. редактор *И. В. Розова*. Обложка художника *В. В. Амохина*. Худож. редактор *Т. С. Егорова*. Техн. редактор *Н. В. Лбова*. Корректор *Р. С. Колокольчикова*.

ИБ № 2948

Сдано в набор 15.08.80. Подписано к печати 10.10.80. Т 18713. Формат бумаги 84×108<sup>1/2</sup>. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,23. Тираж 37 400 экз. Заказ № 1491. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 804611.  
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.