

**СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИСТОРОВ —  
ТЕРМИЧЕСКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ\*)****Дж. А. Беккер, С. Б. Грин, Г. Л. Пирсон****І. СВОЙСТВА ТЕРМИСТОРОВ****Введение**

Термисторы, или термически чувствительные сопротивления, представляют собой устройства, изготавливаемые из твёрдых веществ, электрическое сопротивление которых в очень сильной степени зависит от температуры. Несмотря на то, что термисторы известны всего лишь около пятнадцати лет, они уже приобрели значение и широко используются в телефонном и военном оборудовании. Некоторые из них применяются в качестве задерживающих устройств, предохранительных приборов, регуляторов напряжения, регуляторов в системах на несущей частоте, ограничителей громкости, приборов для измерения мощности УВЧ, детектирующих элементов (в случае источников очень малой мощности). Во всех этих применениях термисторам отдают предпочтение перед другими приборами, служащими для аналогичных целей, вследствие того, что, будучи простыми по устройству и обладая небольшими размерами и высокой прочностью, они надолго сохраняют работоспособность и не требуют специального ухода.

Эти, а также и другие положительные свойства термисторов позволяют думать, что им предстоит стать новым элементом электрической схемы, который найдёт себе широкое применение в области связи и в тепловых электрических и радиоприборах, используемых при физических, химических и биологических научных исследованиях и в военной технике.

Характерными примерами применений, которые будут рассмотрены во второй части этой статьи, являются:

- 1) простые чувствительные и быстро реагирующие термометры, температурные компенсаторы и регуляторы температуры;
- 2) переключатели без подвижных контактов;
- 3) регуляторы или ограничители громкости;

---

\*) J. A. Becker, C. B. Green, G. L. Pearson, Bell. Syst. Techn. J. 26, 1 (1947); перевод с английского А. П. Перелешинной.

- 4) приборы для измерения давления и потока и простые приборы для измерения теплопроводности жидкостей и газов;
- 5) уничтожители задержки и стабилизаторы;
- 6) генераторы, модуляторы и усилители для сравнительно низких частот.

Прежде чем приступить к детальному обсуждению этих применений, следует получить представление о физических законах, определяющих свойства термисторов.

Естественно возникает вопрос: почему устройства такого рода лишь недавно вошли в употребление? Ответ заключается в том, что термисторы изготавливаются из полупроводников и сопротивление их может меняться в  $10^3$  —  $10^6$  раз в зависимости от присутствия ничтожного количества примесей, от методов термической обработки, от характера контактов и от обращения с ними при работе. Практическому использованию полупроводников препятствовало то обстоятельство, что различные образцы, изготовленные, казалось бы, одним и тем же способом, оказывались весьма различными по своим свойствам. Даже один и тот же образец под влиянием проходящего по нему тока или умеренного изменения температуры может изменить своё сопротивление в 2 — 10 раз. Поэтому, прежде чем стало возможным серьёзное использование полупроводников в промышленности, потребовалось посвятить большое число научных исследований изучению природы проводимости, влияния примесей и термической обработки на проводимость полупроводников, а также методам создания надёжных контактов. Хотя ещё Фарадей заметил быстрое изменение сопротивления с температурой у сульфида серебра и были найдены тысячи других полупроводников, обладающих большими отрицательными температурными коэффициентами сопротивления, потребовалось около столетия для того, чтобы достижения физики и химии дали инженерам это новое орудие, которое по значению может стать подобным электронной лампе и во многих случаях может заменить её.

Для того чтобы термисторы получили широкое распространение в промышленности, необходимо следующее:

- 1) воспроизводить образцы, обладающие одинаковыми характеристиками;
- 2) получать образцы с характеристиками, не изменяющимися со временем; контакты должны быть неизменными, а образец — химически инертным;
- 3) образцы должны быть механически прочными;
- 4) способ изготовления должен быть таков, чтобы материалу можно было придавать различные формы и размеры и, наконец,
- 5) должна быть обеспечена возможность охватывать широкий интервал значений сопротивления, температурного коэффициента и рассеиваемой мощности.

Изготовить термисторы можно любым методом, посредством которого полупроводнику можно придать определённые размеры и форму и создать контакты. К числу этих методов относятся:

1) плавление полупроводника, охлаждение и затвердевание его, 2) выпаривание, 3) нагревание прессованных порошков полупроводников до температуры, при которой они спекаются в твёрдую, компактную массу, и вжигание контактов из металлического порошка.

Хотя применяют все три метода, но для массового производства наиболее пригодным из них считается третий. Он подобен методу, применяемому в керамическом производстве или в порошковой металлургии. При температуре спекания порошок рекристаллизуется, и объём его уменьшается на определённую величину. Процесс измельчения в порошок даёт возможность смешивать два полупроводящих окисла (или большее число их)

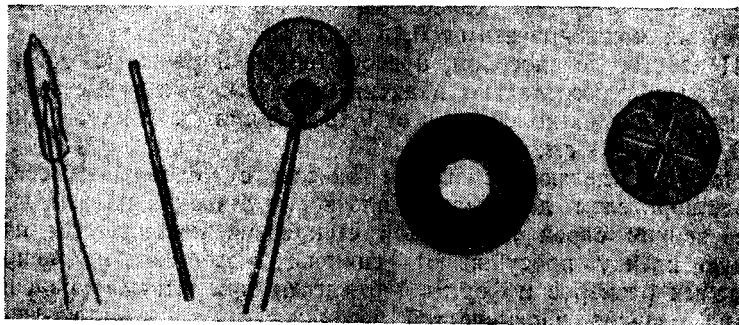


Рис. 1. Термисторы, изготовленные в виде шарика, стержня, диска, шайбы и чешуек.

в различных соотношениях и получать однородное и единое твёрдое тело. В результате, имея одну и ту же систему окислов, можно в широких пределах менять значения удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления и потребляемой мощности, так как процесс измельчения в порошок позволяет изготавливать термисторы самых различных форм и размеров.

Рис. 1 является фотографией термисторов, изготовленных в виде шарика, стержня, диска, шайбы и чешуйки. Шарик делают, натягивая параллельно друг другу две платиновые проволоки (на расстоянии, в 5—10 раз превышающем диаметр проволоки). На проволоки наносят некоторое количество капелек из смеси окислов. Поверхностное натяжение придаёт этим капелькам шарообразную форму. Вдоль проволок размещают с равными промежутками от 10 до 20 таких шариков. Шарик сушат, слегка подогревая,

до тех пор, пока они не станут настолько прочными, чтобы «нитку бус» можно было трогать руками. После этого они проходят через печь для спекания. Окислы на платиновых проволоках сокращаются в объёме, и создаётся прочный и неизменный электрический контакт. Затем проволоки разрезают для того, чтобы отделить шарики друг от друга: При диаметре проволоки от 0,0025 до 0,015 см диаметры шариков колеблются в пределах от 0,015 до 0,15 см.

Для изготовления стержнеобразных термисторов окислы смешивают с органической связкой и растворителем, затем прессуют смесь, просушивают её, придают нужную форму, нагревают для вытеснения связующего вещества и, наконец, спекают при высокой температуре. Контакты создают путём покрытия концов серебряной, золотой или платиновой пастой, подобной той, которая используется в керамическом производстве, и проведения процесса её отвердевания при соответствующей температуре.

Диаметр стержней колеблется обычно от 0,08 до 0,64 см. Длину их можно менять от 0,15 до 5 см.

Подобным же способом, прессуя смесь порошка с органической связкой, изготавливают и диски и шайбы. Возможные значения диаметров дисков колеблются от 0,15 до 3 или 5 см; их толщина — от 0,08 до 0,64 см.

Чешуйки делают, смешивая окислы с подходящей связкой и растворителем до степени плотности сливок и намазывая эту смесь тонким слоем на гладкой стеклянной поверхности; полученную плёнку просушивают, снимают, разрезают на чешуйки желаемых размеров и формы и отжигают при температуре спекания на гладкой керамической поверхности. Контакты создаются описанным выше способом. Допустимы следующие размеры чешуек: толщина — от 0,001 до 0,004 см, длина — от 0,1 до 1 см, ширина — от 0,02 до 0,1 см.

В любом из этих типов термисторов вводы можно прикрепить к контактам посредством пайки или обжига паст тяжёлых металлов. Вышеприведённые предельные размеры считаются легко достижимыми.

При создании термистора для определённых целей следует принять во внимание следующие данные:

- 1) механические размеры (в том числе и размеры опор);
- 2) материал, из которого делают термистор, и его свойства (последние включают удельное сопротивление и характер изменения его с температурой, удельную теплоёмкость, плотность и коэффициент термического расширения);
- 3) постоянную рассеяния и чувствительность к мощности. Постоянная рассеяния равна числу рассеиваемых в термисторе ватт, делённому на выраженный в °С повышение его температуры по сравнению с температурой окружающей среды.

Чувствительность к мощности равна числу ватт, которое необходимо рассеять для того, чтобы сопротивление уменьшилось на 1%. Эти постоянные определяются природой поверхности, площадью её, окружающей средой и теплопроводностью опор;

4) теплоёмкость, значение которой определяется удельной теплоёмкостью, размерами и плотностью;

5) постоянную времени. Эта постоянная определяет скорость нагревания или охлаждения термистора. Она равна времени, необходимому для понижения температуры термистора на 63% от разности температур термистора и окружающей среды. Постоянная времени выражается в секундах и равна значению теплоёмкости в джоулях на градус Цельсия, делённому на величину постоянной рассеяния в ваттах на градус Цельсия;

6) максимальное допустимое значение мощности, которая может быть рассеяна при непрерывной работе и нестационарных процессах, причём характеристики термисторов остаются стабильными, а срок службы его — продолжительным. Максимальную допустимую мощность можно вычислить, зная постоянную рассеяния и максимальное значение допустимого повышения температуры. Она и зависимость сопротивления от температуры определяют максимальное уменьшение сопротивления.

### Свойства полупроводников

Большую часть термисторов изготавливают из полупроводников и поэтому очень важно рассмотреть свойства последних. Полупроводник можно определить как вещество, электропроводность которого при комнатной (или близкой к ней) температуре гораздо меньше, чем у типичных металлов, но значительно превышает электропроводность типичных изоляторов. Несмотря на то, что резкой разницы между этими классами проводников нет, можно считать, что при комнатной температуре значения удельного сопротивления у полупроводников расположены в пределах от  $0,1 \text{ ом см}$  до  $10^9 \text{ ом см}$ . Как правило, полупроводники имеют большие отрицательные значения температурного коэффициента сопротивления. Например, при повышении температуры от  $0^\circ$  до  $300^\circ \text{C}$  сопротивление полупроводника может уменьшиться в 1000 раз. У типичного же металла (например, платины) сопротивление в этом интервале температур возрастает в два раза. Рис. 2 показывает, как зависит от температуры  $T$  логарифм удельного сопротивления у трёх типичных полупроводников и у платины.

Кривые 1 и 2 соответствуют широко используемым в настоящее время материалам № 1 и № 2. Материал № 1 состоит из окислов марганца и никеля; материал № 2 — из окислов марганца, никеля и кобальта. Пунктирная часть кривой 2 относится к области,

в которой зависимость сопротивления от температуры известна не столь точно, как при более низких температурах. Кривая 3 представляет экспериментальную кривую для смеси окислов цинка

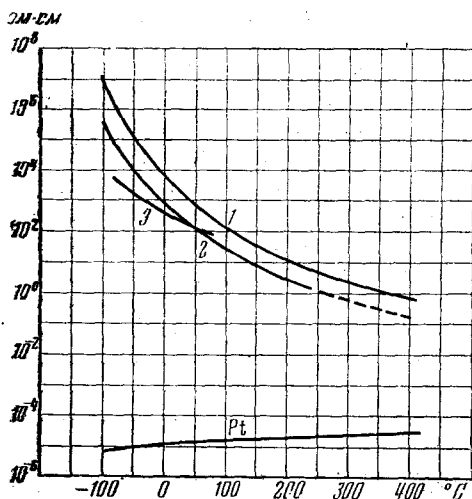


Рис. 2. Характеристики зависимости логарифма удельного сопротивления от температуры для трёх термисторных материалов и для платины.

и железа, взятых в соотношении, при котором образуется феррит цинка.

Из рис. 2 видно, что и сопротивление  $R$  и  $\lg R$  меняются с температурой  $T$  нелинейно.

На рис. 3 изображены кривые зависимости  $\lg \rho$  от  $\frac{1}{T}$  для материалов № 1 и № 2. По форме они приближаются к прямым. Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_{\infty} e^{\frac{B}{T}} \\ \text{или} \\ \rho &= \rho_0 e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $T$  — температура в  $^{\circ}\text{K}$ ,  $\rho_{\infty}$  — значение  $\rho$  при  $T = \infty$  (или при  $\frac{1}{T} = 0$ ),  $\rho_0$  — значение  $\rho$  при  $T = T_0$  и  $B$  — по-

стоянная величина, равная увеличенному в 2,303 раза наклону прямых линий на рис. 3.

Величина  $B$  выражается в  $^{\circ}\text{K}$  или в  $^{\circ}\text{C}$ ; она играет в уравнении (1) такую же роль, как работа выхода в уравнении Ричардсона для термоионной эмиссии. Для материала № 1  $B = 3920^{\circ}\text{C}$ . Это соответствует энергии электрона, равной  $3920/11600$  вольт или 0,34 вольта.

На первый взгляд линии на рис. 3 кажутся прямыми, но более тщательное исследование показывает, что крутизна их линейно возрастает с повышением температуры. Отсюда следует, что более точным является выражение:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= AT^{-c} e^{\frac{D}{T}} \\ \text{или} \\ \lg \rho &= \lg A - c \lg T + \frac{D}{2,303 T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Постоянная  $c$  равна малому положительному или отрицательному числу или нулю. Для материала № 1  $\lg A = 5,563$ ,  $c = 2,73$  и  $D = 3100$ .

Для одной из форм материала № 2  $\lg A = 11,514$ ,  $\epsilon = 4,83$  и  $D = 2064$ .

Если мы определим температурный коэффициент сопротивления уравнением

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}, \quad (3)$$

то из уравнения (1) следует, что

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}. \quad (4)$$

Для материала № 1 при температуре  $T = 300^\circ \text{ К}$   $\alpha = -3920/90000 = -0,044$ . Для платины же  $\alpha = +0,0037$ , т. е. является величиной обратного знака и приблизительно в 10 раз меньшей, чем у полупроводника. Из уравнения (2) следует, что

$$\alpha = -\frac{D}{T^2} - \frac{\epsilon}{T}. \quad (5)$$

Из уравнения (3) следует, что

$$\alpha = \frac{1}{2,303} \frac{d}{dT} \lg R. \quad (6)$$

При обсуждении природы проводимости полупроводников удобнее пользоваться понятием проводимости  $\sigma$ , чем понятием сопротивления  $\rho$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ и } \lg \sigma = -\lg \rho. \quad (7)$$

Свойства полупроводников выражаются более ясно, если построить в широком интервале температур график зависимости проводимости (или логарифма её) от  $\frac{1}{T}$ . Рис. 4 является таким графиком для ряда образцов кремния с возрастающим содержанием примеси. В области высоких температур все образцы имеют приблизительно одинаковое значение проводимости. Это значение называется собственной проводимостью, так как является, повидимому, свойством, присущим кремнию. В области низких темпе-

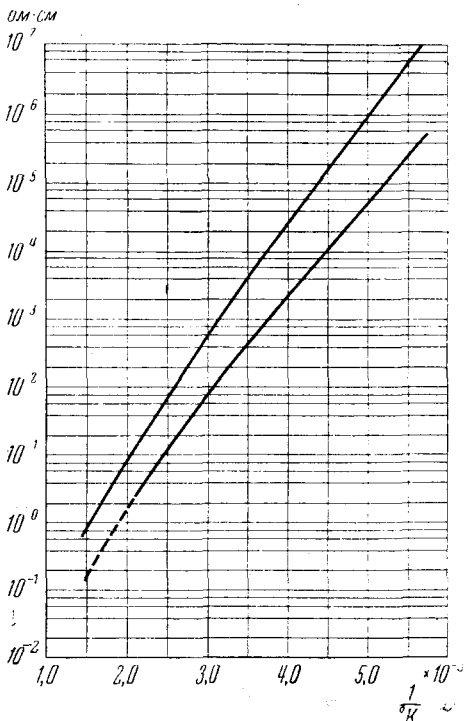


Рис. 3. Кривые зависимости  $\lg \rho$  от  $\frac{1}{T}$  для материалов №№ 1 и 2 (см. уравнение (1)).

ратур проводимости различных образцов резко отличаются друг от друга. В этой области кремний является, как принято говорить, примесным полупроводником. Идеально чистому кремнию присуща лишь собственная проводимость, а сопротивление его выражается уравнением (1). С возрастанием концентрации примеси

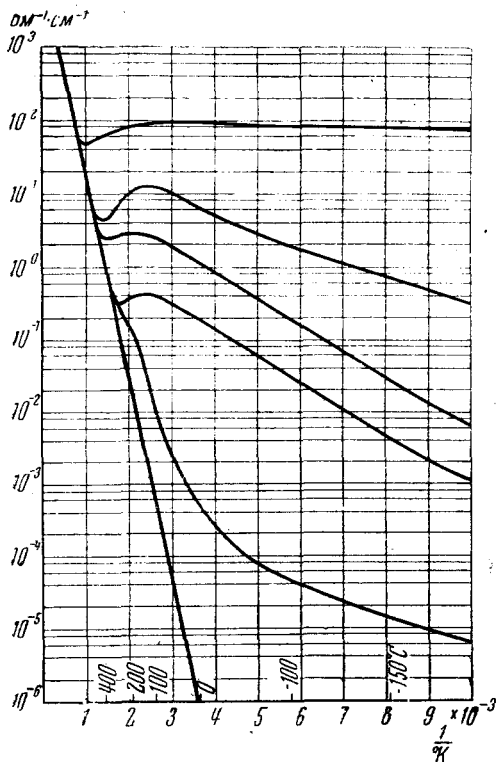


Рис. 4. График зависимости логарифма проводимости от  $\frac{1}{T}$  для ряда образцов кремния. С ростом концентрации примеси проводимость увеличивается.

в виде частиц, размеры которых заметно превышают атомные, то влияние её незначительно. Так как на дисперсию примесей в твёрдых телах влияет термическая обработка, то в процессе термообработки проводимость многих полупроводников сильно меняется.

проводимость растёт, и в области более низких \*) температур главную роль начинает играть примесная проводимость. Некоторые примеси влияют на возрастание проводимости гораздо сильнее остальных. Если на миллион долей чистого кремния приходится сто долей таких примесей, то они могут увеличить его проводимость при комнатной температуре в  $10^7$  раз. Другие же примеси могут присутствовать в количестве 10 000 долей на миллион и всё же мало влиять на величину проводимости.

Больше того, два образца могут содержать одну и ту же концентрацию примеси и, тем не менее, резко различаться по своей проводимости при низкой температуре; если примесь содержится в твёрдом растворе, т. е. является атомарно диспергированной, то влияние её велико; если же примесь включается

\*) В тексте очевидная опечатка: сказано — «высоких температур». (Прим. перев.)

На некоторые же другие полупроводники термообработка оказывает довольно незначительное влияние.

Не всегда примесь является чужеродным элементом; в случае окислов или сульфидов её роль может выполнять избыток или недостаток кислорода или серы по сравнению с точным стехиометрическим соотношением. Избыток или недостаток этот может быть создан термической обработкой. Рис. 5 показывает, как зависит проводимость от температуры у ряда образцов из закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , подвергнутых такой термической обработке, что количество избыточного кислорода меняется от нуля до приблизительно 1%. Чем больше избыток кислорода, тем больше проводимость в области низких температур. При высоких температурах все образцы обладают приблизительно равной проводимостью.

В зависимости от природы носителей тока полупроводники можно разделить на ионные, электронные и смешанные. Хлориды (например,  $\text{NaCl}$ ) и некоторые сульфиды являются ионными, остальные сульфиды и некоторые окислы (например, окись урана) — смешанными полупроводниками; к электронным полупроводникам относятся большая часть окислов (например,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), карбиды (например, карбид кремния) и некоторые элементы (например, бор, кремний, германий и теллур).

В ионных и смешанных полупроводниках по твёрдому телу перемещаются ионы, в результате чего изменяется плотность носителей тока в различных областях, а тем самым меняется и проводимость. Так как это оказывается неудобным, то такие полупроводники редко используют для приготовления

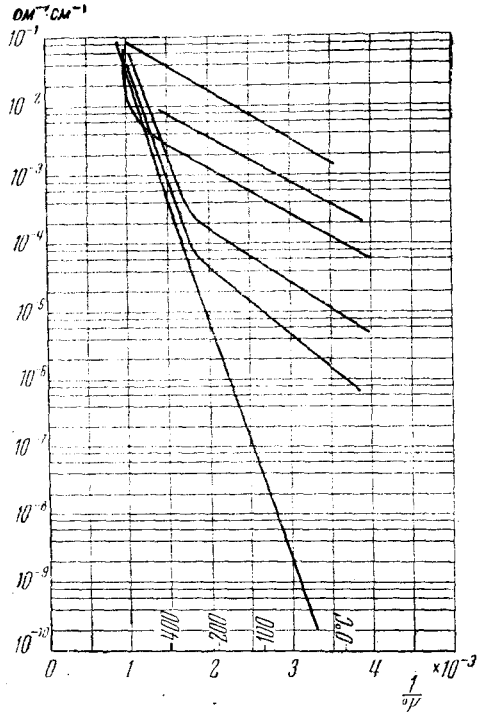


Рис. 5. График зависимости логарифма проводимости от  $\frac{1}{T}$  для ряда образцов закиси меди. По мере возрастания концентрации избыточного — по сравнению с точным стехиометрическим соотношением — кислорода проводимость увеличивается. (На графике приведены имеющиеся в литературе<sup>1</sup> данные.)

термисторов, и поэтому мы сосредоточим наше внимание на электронных полупроводниках.

Существует два типа электронных полупроводников — «электронные» и «дырочные» — смотря по тому являются ли носители тока электронами или положительными «дырками» в нормально заполненной энергетической зоне \*). В «электронных» полупроводниках носители тока отклоняются в магнитном поле, как отри-

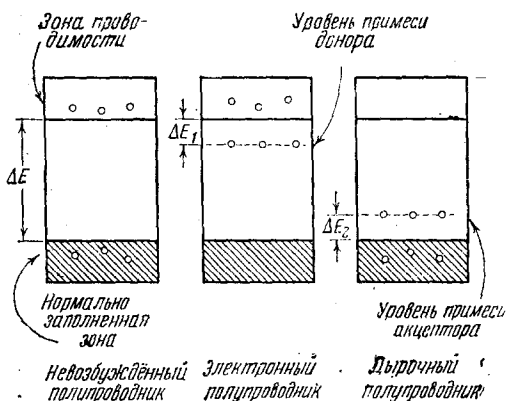


Рис. 6. Диаграммы энергетических уровней невозбуждённого, электронного и дырочного полупроводников.

цательно заряженные частицы, в «дырочных» полупроводниках — в обратном направлении. Направление отклонения устанавливают, определяя знак эффекта Холла. Знак заряда носителей тока определяется также и направлением термо-э.д.с. Зная удельное сопротивление, коэффициент Холла и термо-э.д.с. данного образца при данной температуре, можно определить плотность носителей тока, знак их заряда и их подвижность или среднюю длину свободного пробега. Подвижность определяется как средняя скорость перемещения в поле, напряжённость которого равна  $1 \text{ в/см}$ . Существование этих типов полупроводников поясняется<sup>2, 3, 4</sup> с помощью диаграмм, изображённых на рис. 6. В невозбуждённом полупроводнике валентные электроны при низких температурах полностью заполняют все разрешённые энергетические уровни. Согласно принципу Паули, в любой системе на данном энергетическом уровне может находиться только один электрон. В полупроводниках и изоляторах как раз над разрешённой зоной имеется область запрещённых значений энергии. Ширина её, выраженная в электрон-вольтах, равна  $\Delta E$ . Над этой запрещённой зоной расположена зона разрешённая, но при низкой температуре в ней нет электронов. Если поместить такой полупроводник в электрическое поле, то ни один электрон не может получить ускорения, так как если бы это случилось, то его энергия возросла бы до

\*) В работе Беккера, Грина и Пирсона вместо общепринятых в нашей литературе терминов — «электронный» (или «дырочный») полупроводник использованы термины «полупроводник N-типа» (или P-типа). (Прим. перев.)

цательно заряженные частицы, в «дырочных» полупроводниках — в обратном направлении. Направление отклонения устанавливают, определяя знак эффекта Холла. Знак заряда носителей тока определяется также и направлением термо-э.д.с. Зная удельное сопротивление, коэффициент Холла и термо-э.д.с. данного образца при данной температуре, можно определить плотность носителей тока, знак их заряда и их подвижность или среднюю длину свободного пробега. Подвижность определяется как средняя скорость перемещения в поле, напряжённость которого равна  $1 \text{ в/см}$ . Существование этих типов полупроводников поясняется<sup>2, 3, 4</sup> с помощью диаграмм, изображённых на рис. 6. В невозбуждённом полупроводнике валентные электроны при низких температурах полностью заполняют все разрешённые энергетические уровни. Согласно принципу Паули, в любой системе на данном энергетическом уровне может находиться только один электрон. В полупроводниках и изоляторах как раз над разрешённой зоной имеется область запрещённых значений энергии. Ширина её, выраженная в электрон-вольтах, равна  $\Delta E$ . Над этой запрещённой зоной расположена зона разрешённая, но при низкой температуре в ней нет электронов. Если поместить такой полупроводник в электрическое поле, то ни один электрон не может получить ускорения, так как если бы это случилось, то его энергия возросла бы до

энергетического уровня, который или занят или запрещён. Если же повысить температуру, то некоторые электроны приобретают энергию, достаточную для того, чтобы, минуя запрещённый участок, подняться в верхнюю разрешённую зону. Теперь благодаря приложенному полю эти электроны могут занять более высокий энергетический уровень и, следовательно, могут переносить ток.

Каждый перешедший в «возбуждённое» состояние электрон оставляет в нормально заполненной зоне «дырку». Другие электроны, обладающие несколько меньшими значениями энергии, могут, получив благодаря приложенному полю ускорение, попасть в эти «дырки».

Эти дырки ведут себя по отношению к приложенному полю так, как если бы они представляли собой частицы с зарядом, равным по величине, но противоположным по знаку заряду электрона, и с массой, равной массе электрона или несколько большей её. В полупроводнике с собственной (отличной от нуля даже в отсутствии примеси) проводимостью последняя обусловлена наполовину электронами, наполовину — дырками.

Значение  $\Delta E$  связано с величиной  $B$  из уравнения (1) следующим образом:

$$2B = \Delta E \frac{e}{k}, \quad (8)$$

где  $B$  выражается в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta E$  — в электрон-вольтах,  $e$  — заряд электрона в кулонах,  $k$  — постоянная Больцмана в джоулях на  $^{\circ}\text{C}$ . Величина отношения  $\frac{e}{k}$  равна 11 600, так что

$$\Delta E = \frac{B}{5800}. \quad (8a)$$

Различие между металлами, полупроводниками и изоляторами сводится к различию величин  $\Delta E$ . Для металлов эта величина равна нулю или очень мала. Для полупроводников  $0,1 \text{ эв} \lesssim \Delta E \lesssim 1,5 \text{ эв}$ . Для изоляторов  $\Delta E \gtrsim 1,5 \text{ эв}$ .

Некоторые имеющиеся в полупроводнике примеси с положительными валентностями могут занимать такие энергетические уровни, что энергия  $\Delta E_1$  поднимает валентный электрон атома примеси в зону проводимости (см. рис. 6). Тогда электрон может принять участие в проводимости; примесь-донор представляет положительный ион, который обычно закреплён в определённом положении и не может участвовать в проводимости. Примеси эти создают «электронные» полупроводники (с избытком электронов). Проводимость зависит от плотности доноров и от значения  $\Delta E_1$  и  $T$ .

Подобным же образом некоторые другие примеси с отрицательными валентностями могут занимать энергетический уровень, расположенный на расстоянии  $\Delta E_2 \text{ эв}$  над заполненной зоной.

При комнатной или более высокой температуре энергия электрона в заполненной зоне может увеличиться настолько, что он захватывается примесью, которая становится в результате отрицательным ионом, остающимся обычно неподвижным. Однако в проводимости может принять участие «дырка», получившаяся в результате такого процесса.

Во всех изображённых на рис. 6 случаях электрон, занявший более высокий (по сравнению с положительным ионом или дыркой) энергетический уровень обладает определённой вероятностью перехода за какой-то короткий промежуток времени на более низкий уровень. Однако в течение того же самого времени найдутся электроны, которые за счёт теплового движения поднимутся на более высокий энергетический уровень. Когда в секунду поднимается и опускается одинаковое число электронов, наступает равновесие. Проводимость  $\sigma$  равна тогда

$$\sigma = Ne v_1 + P e v_2, \quad (9)$$

где  $N$  и  $P$  — концентрации электронов и дырок, соответственно,  $e$  — заряд электрона,  $v_1$  и  $v_2$  — подвижности электронов и дырок. Вышеприведённая схема объясняет следующие экспериментальные факты, которые трудно интерпретировать иным путём.

1) Окислы, являющиеся электронными полупроводниками (например,  $ZnO$ ) при нагревании в нейтральной или обладающей слабыми восстановительными свойствами среде становятся хорошими проводниками, повидимому, потому, что они содержат избыток цинка, могущий давать электроны. Если эти окислы нагревать затем в среде с постепенно возрастающими окислительными свойствами, то проводимость их уменьшается до тех пор, пока они не станут, в конце концов, невозбуждёнными полупроводниками или изоляторами.

2) Окислы, являющиеся дырочными полупроводниками (например,  $NiO$ ), становятся хорошими проводниками, когда подвергаются термической обработке в среде, обладающей сильными окислительными свойствами. Весьма вероятно, что они содержат кислород в избытке по сравнению со стехиометрическим соотношением, и этот кислород захватывает дополнительные электроны. Если эти окислы нагревать в среде, нейтральной или обладающей меньшими окислительными свойствами, то они становятся более плохими проводниками, полупроводниками или изоляторами.

3) Если спекаются друг с другом два окисла, представляющих собой дырочные полупроводники, то общая проводимость смеси возрастает. То же самое имеет место и для двух окислов, являющихся электронными полупроводниками. Если же смешать окислы, один из которых является электронным, а другой — дырочным полупроводником, то проводимость смеси уменьшается.

4) Если металл образует несколько окислов, то тот из них, в котором металл обладает своей наивысшей валентностью, относится к электронным полупроводникам, тогда как окисел, в котором металл имеет наименьшую валентность, будет представлять собой дырочный полупроводник<sup>5</sup>.

По некоторым соображениям следует исследовать все полупроводники относительно их удельного сопротивления и температурного коэффициента. Один из методов, посредством которого можно было бы сделать это, заключается в нахождении для каждого образца кривых зависимости удельного сопротивления от  $\frac{1}{T}$ . Однако подобный график состоял бы из такой путаницы пересекающихся линий, соответствующих различным образцам, что весьма трудно было бы выделить какую-либо одну из них и заняться ею. Эти же сведения могут быть получены, если с помощью уравнения (1) найти зависимость  $\lg \rho_0$  от  $B$ <sup>6</sup>.

В этом случае наиболее важные характеристики образца выразятся одной точкой, и на одном графике можно исследовать много образцов. Рис. 7 представляет подобный график для большого числа исследованных в лабораториях или описанных в литературе полупроводников. Для  $\rho_0$  и  $B$  даны значения, соответствующие температуре  $T = 25^\circ \text{C}$ . Точки образуют нечто подобное Млечному Пути. Повидимому, полупроводники с большим удельным сопротивлением  $\rho_0$  обладают и большим значением  $B$  и обратно. Если для ряда полупроводников точки на рис. 7 лежат вдоль прямой линии с наклоном в  $\frac{1}{2,3} T_0$ , то соответствующие этим полупроводникам кривые на рис. 3 имеют точку пересечения при  $\frac{1}{T} = 0$ .

### Физические свойства термисторов

Одним из наиболее интересных свойств термистора является характер изменения напряжения на нём при возрастании тока. На рис. 8 изображена эта зависимость для укрепленного в воздухе шарика диаметром в 0,061 см, изготовленного из материала № 1. Всякий раз при изменении тока приходится выждать некоторое время, пока напряжение не достигнет нового установившегося значения. Поэтому эту кривую называют кривой установившегося режима. При достаточно малых токах рассеиваемая мощность слишком мала для того, чтобы более или менее заметно нагреть термистор, и для последнего остается в силе закон Ома. Однако при дальнейшем возрастании тока рассеиваемая мощность увеличивается, температура термистора становится выше температуры окружающей среды, сопротивление падает, а напряжение в результате оказывается меньшим, чем оно должно было бы быть при постоянном сопротивлении. При некотором значении тока  $I_m$  напряжение

достигает максимального или пикового значения  $V_m$ . При дальнейшем возрастании тока напряжение начинает уменьшаться, сопротивление термистора, равное  $\frac{dV}{dI}$ , становится отрицательным. Числа на кривой дают выраженную в  $^{\circ}\text{C}$  величину  $(T - T_{\text{окруж}})$ , где  $T$  — температура термистора и  $T_{\text{окруж}}$  — температура окружающей среды.

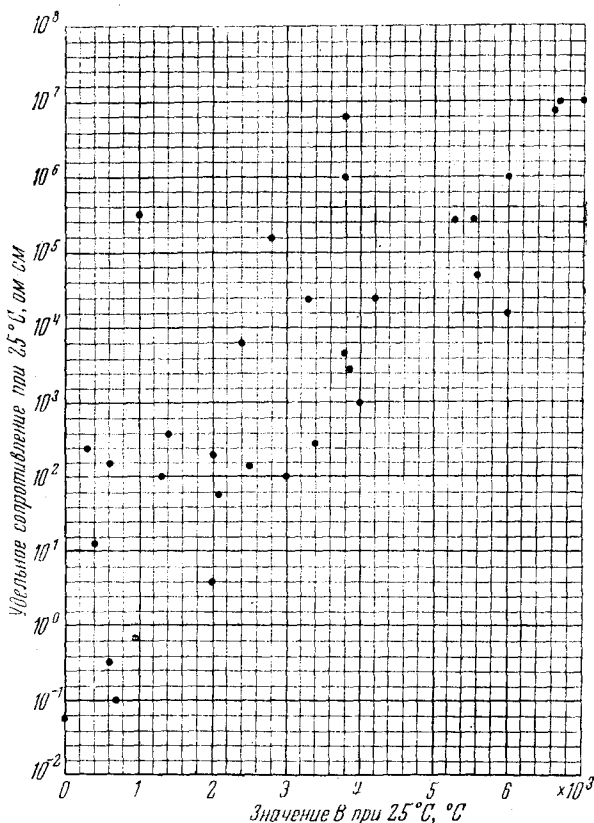


Рис. 7. График зависимости  $\lg r$  от  $B$  для различных полупроводников. (Величина  $B$  — согласно уравнению (4) — пропорциональна температурному коэффициенту сопротивления  $\alpha$ .)

В связи с тем, что токи и напряжения для различных термисторов охватывают большой интервал значений, удобнее строить график зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$ . На рис. 9 изображён такой график для тех же самых данных, что и на рис. 8. Величина возрастания температуры термистора сверх температуры окружающей среды отмечается для различных точек кривой на рис. 9 точно

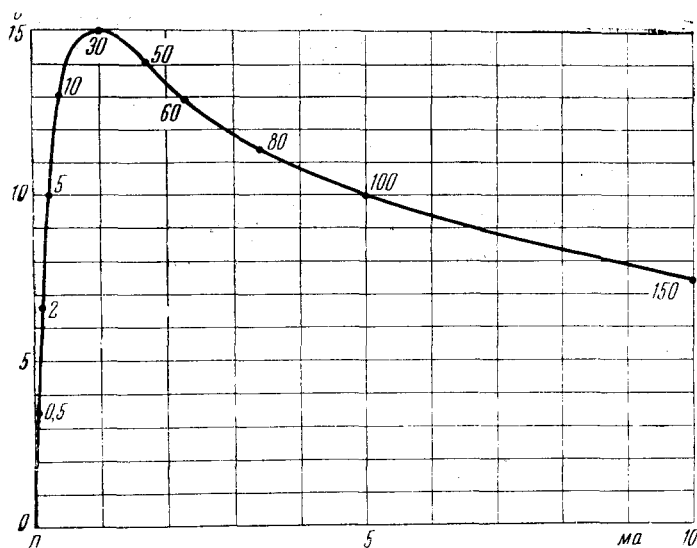


Рис. 8. Статическая вольт-амперная характеристика типичного термистора. Числа на кривой определяют выраженное в  $^{\circ}\text{C}$  значение разности температур термистора и окружающей среды.

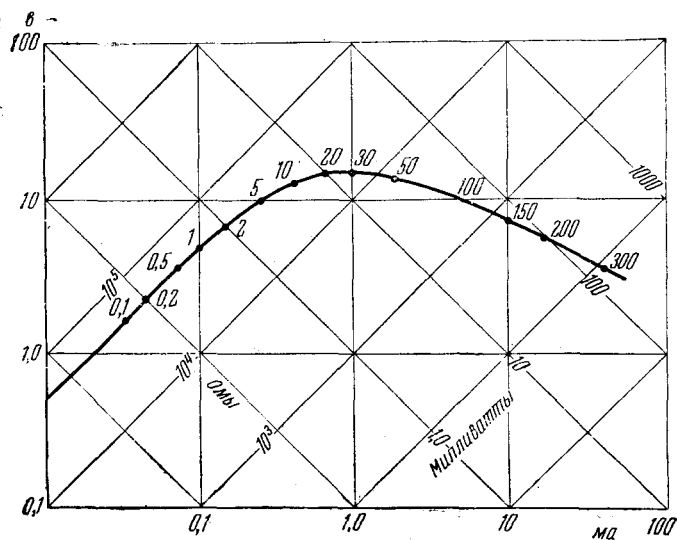


Рис. 9. График зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  (соответствующий тем же данным, что и рис. 8). Диагональные линии соответствуют различным значениям сопротивления и мощности.

так же, как и на рис. 8. На логарифмическом графике прямые линии, проведённые под углом в  $+45^\circ$ , соответствуют различным значениям сопротивления, а линии под углом в  $-45^\circ$  — различным значениям мощности.

Для отдельного термистора кривая зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  смещается при изменении постоянной рассеяния  $C$  так, как показано на рис. 10. Изменить же эту постоянную можно, меняя давление окружающего термистор газа, меняя среду или меня степень

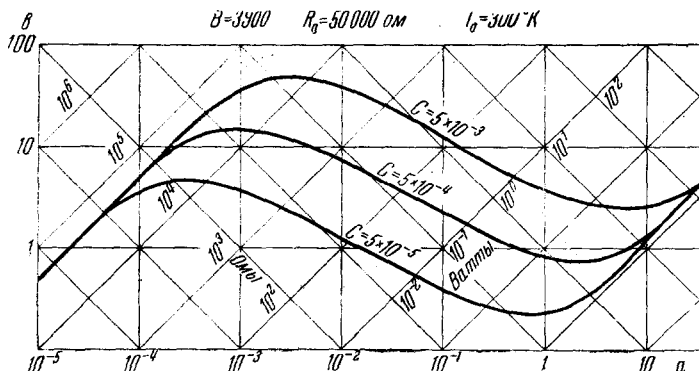


Рис. 10. Кривые зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$ , построенные для трёх различных значений постоянной рассеяния  $C$ . Кривые эти соответствуют постоянным (приведённым в верхней части рисунка) значениям  $B$ ,  $R_0$  и  $T_0$ .

термической связи термистора с окружающей его средой. Значение  $C$  для отдельного термистора можно легко определить по кривой зависимости  $V$  от  $I$  (рис. 8 или 9). Для любой точки кривой отношение  $\frac{V}{I}$  равно сопротивлению, а произведение  $V \cdot I = W$  — рассеиваемой мощности. Значения сопротивления пересчитываются с помощью задаваемой уравнением (2) зависимости  $R$  от  $T$  на температуру. Затем строится график зависимости  $W$  от  $T$ . Для термисторов, большая часть тепла у которых рассеивается, величина  $W$  будет возрастать с увеличением  $T$  линейно, и, следовательно,  $C$  остаётся постоянной величиной. Для термисторов же, укреплённых на тонких проволоках в вакууме,  $W$  будет расти быстрее, чем  $T$ , и  $C$  с повышением температуры  $T$  будет увеличиваться. Для термисторов обычных размеров и формы отношение  $C$  к площади поверхности меняется в неподвижном воздухе в зависимости от величины и формы от 1 до 40  $\text{мвт}/^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2$ .

Для использования термистора необходимо знать, сколько ватт будет рассеяно прежде, чем сопротивление уменьшится на 1%. Эту величину можно назвать чувствительностью к мощности. Она равна отношению  $\frac{C}{\alpha \cdot 100}$  и в неподвижном воздухе изменяется приблизи-

тельно от 1 до  $10 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$ . Значения как  $C$ , так и чувствительности к мощности возрастают с увеличением скорости движения воздуха, окружающего прибор. На зависимости  $C$  от давления газа и скорости движения его основано использование термисторов в качестве манометров и анемометров или приборов для измерения потока. Заметим, что на рис. 10 каждая кривая при смещении вдоль ли-

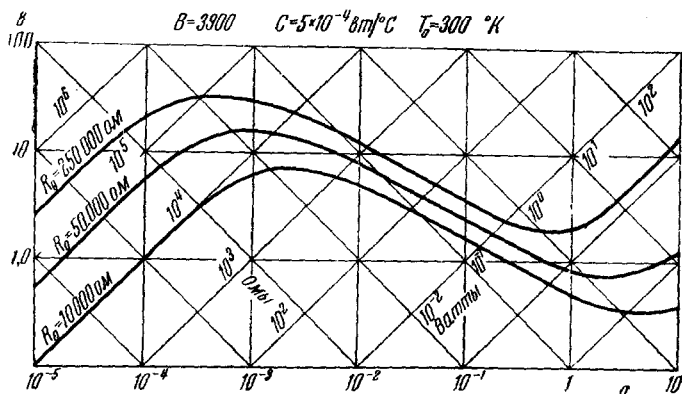


Рис. 11. Кривые зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  при температуре окружающей среды, построенные для трёх различных значений сопротивления  $R_0$ . Кривые построены для постоянных значений  $B$ ,  $C$  и  $T_0$ , указанных в верхней части рисунка.

нии постоянного сопротивления может быть совмещена с любой другой. На рис. 11 изображено семейство кривых зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  при различных значениях  $R_0$  и неизменных значениях  $B$ ,  $C$  и  $T_0$ . Условия эти можно осуществить, меняя — для того, чтобы изменить  $R_0$  — длину и ширину термистора, а также плотность составляющего его вещества и сохраняя в то же время неизменной площадь поверхности. Если бы сопротивление изменялось за счёт изменения температуры  $T_0$  окружающей среды, то полученные в результате кривые очень мало отличались бы от изображённых. Заметим, что каждую кривую можно совместить с любой другой, перемещая её вдоль линии постоянной мощности.

Рис. 12 представляет семейство кривых зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  для 8 различных значений  $B$  (значения  $C$ ,  $R_0$  и  $T_0$  остаются неизменными). В отличие от кривых рис. 10 и рис. 11, каждая из которых может быть получена из любой другой путём смещения последней вдоль соответствующей оси, каждая кривая на рис. 12 является особой, отличной от других. Для каждой кривой на этом рисунке существуют предельные значения омического сопротивления для слабых и для сильных токов. При  $B=0$  значения этих сопротивлений становятся равными друг другу. При увеличе-

нии  $B$  логарифм отношения двух предельных сопротивлений возрастает пропорционально  $B$ . Заметим также, что кривые, которым соответствуют значения  $B > 1200^\circ \text{K}$ , имеют максимум. При больших значениях  $B$  положение этого максимума соответствует малой

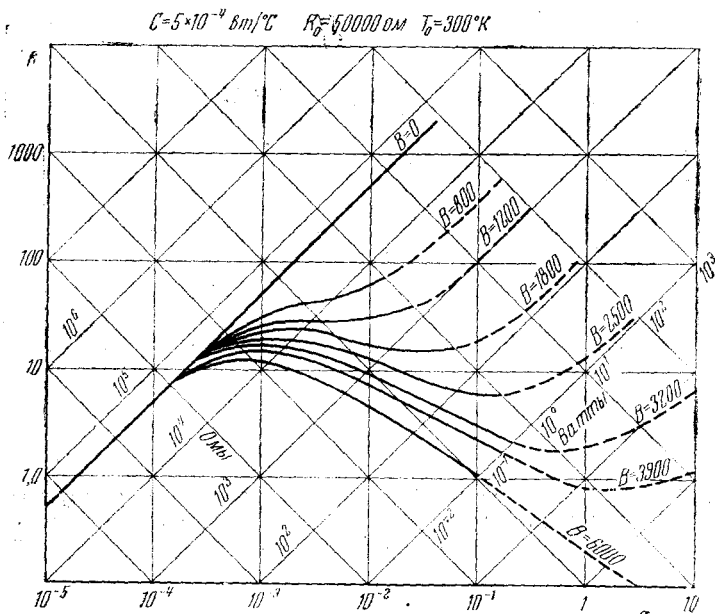


Рис. 12. Кривые зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$ , соответствующие восьми различным значениям  $B$  и неизменным значениям  $R_0$ ,  $C$  и  $T_0$ .

мощности и, следовательно, небольшому значению разности температур  $(T - T_0)$ . Последнее логически вытекает из формулы  $W = C(T - T_0)$ . При уменьшении  $B$  положение максимума напряжения  $V_m$  соответствует всё более возрастающим значениям мощности или температуры. При значениях  $B < 1200^\circ \text{K}$  максимум отсутствует.

Кривые на рис. 10—12 относятся к идеальному случаю, когда соединённое последовательно с термистором сопротивление равно нулю, а температурные ограничения не учитываются. В действительности же всегда имеется какое-то небольшое сопротивление (например, сопротивление вводов), последовательно соединённое с термистором, и, следовательно, части кривых, соответствующие малым сопротивлениям, могут и не наблюдаться. В случае же высокой мощности температура может достичь такого значения, что термистор начнёт разрушаться; тем самым ограничиваются пределы наблюдения. Пунктирные части кривых на рис. 12 соответствуют тем областям, наблюдения в которых невозможны. Точное положение пунктирных частей кривых будет, конечно, зависеть от кон-

струкции рассматриваемого термистора; принимаются во внимание также предельные значения температуры, по достижении которых могут стать слишком большими эффекты старения.

Кривые на рис. 9—12 рассчитывают с помощью следующих уравнений:

$$R = R_0 e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right)} = \frac{V}{I}, \quad (10)$$

$$W = C(T - T_0) = V \cdot I. \quad (11)$$

Постоянные  $R_0$ ,  $T_0$ ,  $B$  и  $C$  для этих кривых точно установлены. Значения же температуры  $T_m$ , мощности  $W_m$ , сопротивления  $R_m$ , напряжения  $V_m$  и тока  $I_m$ , соответствующие максимуму кривых зависимости напряжения от тока, определяются из следующих уравнений, в которых за независимый параметр принимают  $T_m$ . Дифференцируя по  $I$  уравнения (10) и (11) и приравнявая производные к нулю, получаем уравнение

$$T_m^2 = B(T_m - T_0), \quad (12)$$

решение которого имеет вид:

$$T_m = \frac{B}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_0}{B}} \right). \quad (13)$$

Максимуму на рис. 10—12 соответствует знак минус, минимуму — знак плюс. Заметим, что  $T_m$  является функцией только  $B$  и  $T_0$  и не зависит от  $R$ ,  $R_0$  или  $C$ .

Из уравнений (4), (10) и (11) следует, что:

$$-\alpha_m(T_m - T_0) = 1, \quad (14)$$

$$W_m = C(T_m - T_0), \quad (15)$$

$$R_m = R_0 e^{-\frac{T_m}{T_0}} = R_0 e^{-1} \left[ 1 - \frac{(T_m - T_0)}{T_0} + \frac{1}{2} \frac{(T_m - T_0)^2}{T_0^2} - \dots \right], \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_m &= \left[ CR_0(T_m - T_0) e^{-\frac{T_m}{T_0}} \right]^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left\{ CR_0(T_m - T_0) e^{-1} \left[ 1 - \frac{(T_m - T_0)}{T_0} + \frac{1}{2} \frac{(T_m - T_0)^2}{T_0^2} - \dots \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} I_m &= \left[ \frac{C}{R_0}(T_m - T_0) e^{\frac{T_m}{T_0}} \right]^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left\{ \frac{C}{R_0}(T_m - T_0) e \left[ 1 + \frac{(T_m - T_0)}{T_0} + \frac{1}{2} \frac{(T_m - T_0)^2}{T_0^2} + \dots \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

До сих пор рассмотрение ограничивалось условиями установившегося режима, когда подводимая к термистору мощность равна мощности, рассеиваемой им, и температура остаётся постоянной. Однако во многих случаях важно рассмотреть и неустановившиеся условия, когда температура или другие величины, являющиеся функциями температуры, изменяются со временем. Следующий пример является элементарным случаем, иллюстрирующим общие понятия и постоянные величины, содержащиеся в подобных задачах: массивный термистор нагревают приблизительно до  $150\text{--}200^\circ\text{C}$ ,

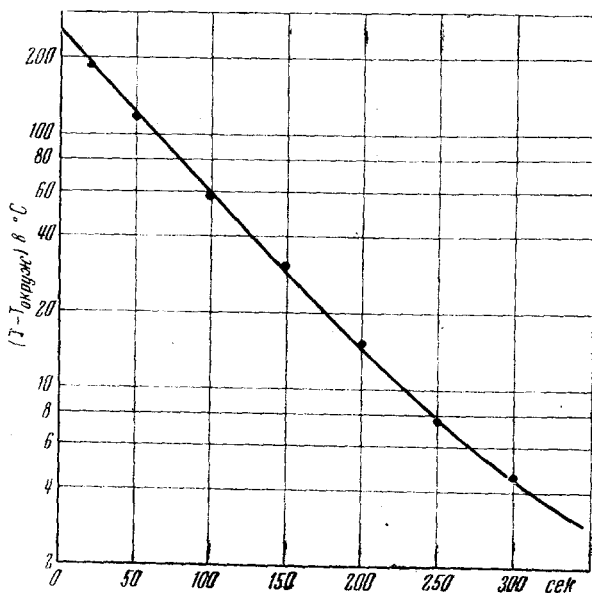


Рис. 13. Характеристика охлаждения массивного термистора:  $\lg(T - T_{\text{окруж}})$  как функция времени.

заставляя его работать в области, довольно далёкой от пика вольт-амперной характеристики. В момент времени  $t = 0$  в схему подаётся постоянный ток, настолько малый, что произведение  $I^2 R$  представляет всегда исчезающе малую величину. Затем измеряется напряжение на термисторе, как функция времени. Исходя из этого, вычисляют сопротивление и температуру. На рис. 13 представлен график зависимости  $\lg(T - T_{\text{окруж}})$  от  $t$  для стержневого термистора из материала № 1, длина которого равна приблизительно  $1,2\text{ см}$ , диаметр —  $0,3\text{ см}$  и вес —  $0,38\text{ г}$ . В течение некоторого времени  $\Delta t$  рассеивается  $C(T - T_{\text{окруж}})\Delta t$  джоулей; в результате температура понижается на величину  $\Delta T$ , определяемую

уравнением:

$$\left. \begin{aligned} \text{или} \quad & -H\Delta T = C(T - T_{\text{окр}})\Delta t \\ & (T - T_{\text{окр}}) = -\frac{H}{C} \frac{\Delta T}{\Delta t}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где  $H$  — теплоёмкость в джоулях на  $^{\circ}\text{C}$ . Решением этого уравнения является выражение:

$$(T - T_{\text{окр}}) = (T_0 - T_{\text{окр}}) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (20)$$

в котором  $T_0 = T$  при  $t = 0$ , а

$$\tau = \frac{H}{C}, \quad (21)$$

где величина  $\tau$  выражается в секундах. Величина  $\tau$  обычно называется постоянной времени.

Согласно уравнению (20), график зависимости  $\lg(T - T_{\text{окр}})$  от  $t$  даёт прямую линию с наклоном, равным  $-\frac{\tau}{2,303}$ . Если  $H$  и  $C$  мало меняются с температурой, то и  $\tau$  будет мало меняться с  $T$  и  $t$ . Линия не будет в точности прямой, но наклон её для любых значений  $t$  или  $(T - T_{\text{окр}})$  будет давать соответствующие этому  $T$  значения  $\tau$  (или  $\frac{H}{C}$ ). Как указывалось выше, величину  $C$  можно определить по графику зависимости рассеиваемой мощности от температуры. Для данного термистора крутизна этой кривой увеличивалась с возрастанием температуры, т. е. увеличивалась и величина  $C$ . В таблице I приводятся соответствующие различным

Таблица I

Значения  $C$ ,  $\tau$ ,  $H$ , как функции  $T$  для термистора примерно 1,2 см длиной, 0,3 см в диаметре и 0,38 г весом изготовленного из материала № 1.  $T_{\text{окр}} = 24^{\circ}\text{C}$

$T (^{\circ}\text{C})$	$C \left( \frac{\text{вт}}{\text{град. C}} \right)$	$\tau (\text{сек})$	$H \left( \frac{\text{дж}}{\text{град. C}} \right)$	$h \left( \frac{\text{дж}}{2 \cdot \text{град. C}} \right)$
44	0,0037	76	0,28	0,75
64	0,0037	74	0,27	0,72
84	0,0038	71	0,27	0,71
104	0,0037	69	0,26	0,68
124	0,0038	68	0,26	0,67
144	0,0038	67	0,26	0,67
164	0,0039	67	0,26	0,69
184	0,0041	66	0,27	0,71
204	0,0042	66	0,28	0,73

температурам значения  $C$ ,  $\tau$  и  $H$  для находящегося в воздухе образца.

Когда термистор нагревается проходящим по нему током, условия несколько усложняются, так как в этом случае мощность  $I^2R$  будет функцией времени. В любой момент времени из цикла нагревания выделявшаяся тепловая энергия будет определяться суммой рассеиваемой мощности, равной  $C(T - T_{\text{окр}})$  и мощности, идущей на повышение температуры, равной  $H \frac{dT}{dt}$ . Величина выделяющейся тепловой энергии будет зависеть от условий в схеме. В схеме, подобной изображённой в верхнем углу рис. 14, изменение тока

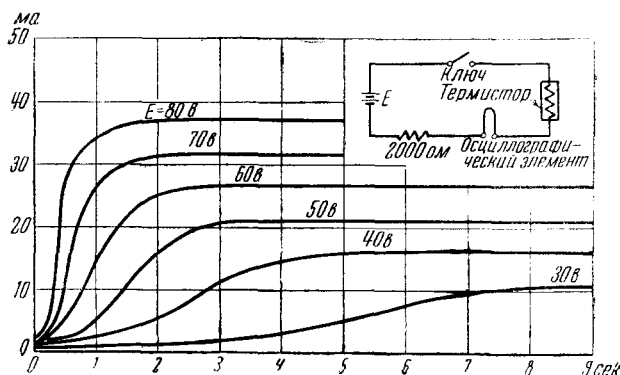


Рис. 14. Кривые, характеризующие изменение тока со временем в изображённой на рисунке схеме при шести различных значениях напряжения батареи.

со временем характеризуется шестью кривыми для шести значений напряжения батареи  $E$ . Если при определённом значении тока в схеме действует реле, то можно получить значительный диапазон значений задержек времени.

При изменении температуры окружающей среды вид этого семейства кривых изменится, и там, где требуются более точные задержки времени, необходимо регулировать температуру окружающей среды или уравнивать её. Значения  $H$ ,  $C$  и  $\tau$  могут быть изменены, так как в широких пределах можно менять размеры и форму термисторов и теплопроводность окружающей среды.

Так, например, постоянная времени  $\tau$  может меняться приблизительно от  $10^{-3}$  сек до 10 мин, т. е. приблизительно в миллион раз.

Одной из наиболее важных является характеристика старения термистора, показывающая насколько постоянным во времени остаётся его сопротивление при данной температуре. Для

того чтобы получить стабильный термистор необходимо следующее:

1) в качестве исходных материалов выбирать только те полупроводники, которые обладают чисто электронной проводимостью;

2) выбирать полупроводники, не изменяющиеся химически при повышении температуры под воздействием газовой среды;

3) выбирать полупроводники, нечувствительные к примесям, могущим появиться в процессе изготовления термистора или при использовании его;

4) так обрабатывать служащие исходным материалом полупроводники, чтобы степень дисперсности критических примесей

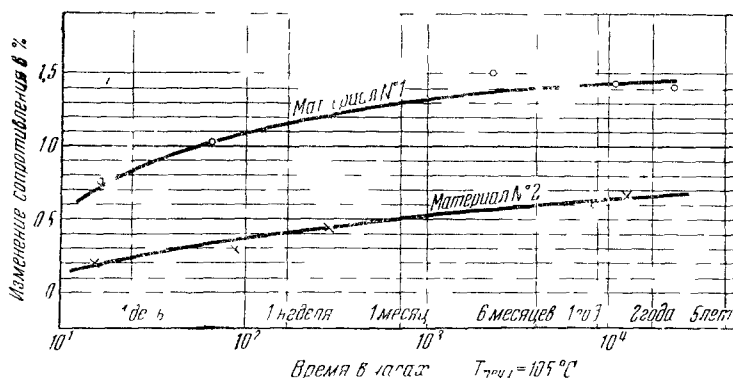


Рис 15 Характеристики старения термисторов, изготовленных из материалов №№ 1 и 2 и состаренных в печи при  $105^\circ\text{C}$ . График зависимости (выраженного в процентах) возрастания сопротивления от времени (в логарифмическом масштабе)

была равновесной или же, чтобы равновесие при рабочих температурах достигалось очень медленно;

5) делать такие контакты, которые прочно спекались бы с прибором, имели коэффициент расширения, приблизительно равный коэффициенту термического расширения полупроводника, и были достаточно устойчивыми в той газообразной среде, в которой будет находиться термистор;

6) в некоторых случаях покрывать термистор тонким слоем стекла или другого непроницаемого для газов и жидкостей материала, имеющего подходящий коэффициент расширения;

7) в течение нескольких дней или недель провести так называемое предварительное искусственное старение, подвергая термистор воздействию температур, несколько превышающих рабочие

При соблюдении этих условий можно добиться весьма хорошей стабильности.

Рис. 15 представляет собой характеристики старения изготовленных из материалов № 1 и № 2 дисков с серебряными контактами и припаянными вводами (диаметр дисков равен 19,05 мм). Непосредственно после изготовления у этих дисков измерили сопротивление, затем «состарили» их в печи при температуре, равной  $105^{\circ}\text{C}$ , и периодически измеряли сопротивление при  $24^{\circ}\text{C}$ . Кривая выраженного в процентах изменения сопротивления по сравнению с его начальным значением вычерчена как функция логарифма времени пребывания в печи. Следует заметить, что большая часть старения имеет место в первый же день или неделю. Если эти диски подвергнуть процессу предварительного старения в течение недели или месяца, а последующее изменение сопротивления относить к величине сопротивления, полученной по окончании этого процесса, то они старились бы примерно лишь на 0,2% в год. В термисторе-термометре это изменение сопротивления соответствовало бы смещению шкалы температур на  $0,05^{\circ}\text{C}$ . Термисторы же, установленные в откачанной трубке или же покрытые тонким слоем стекла, стареют ещё меньше изображённых на рисунке. Для некоторых применений такая высокая стабильность термисторов несущественна и нет надобности подвергать их специальной обработке. При более высоких температурах используются термисторы с хорошими характеристиками старения.

Прессованные стержни из материала № 1 испытывали на стабильность, подвергая их в течение 2 месяцев воздействию температуры, равной  $300^{\circ}\text{C}$ . Типичные образцы старились на величину, равную 0,5—1,5% их начального сопротивления. Подобные термисторы в течение 700 температурных циклов (каждый из которых длился полчаса) подвергались воздействию температуры попеременно то в  $+300^{\circ}\text{C}$ , то в  $-75^{\circ}\text{C}$ . Сопротивление типичных образцов менялось при этом меньше, чем на 1%. В некоторых применениях термисторов в результате малых изменений температуры возникают малые, усиливающиеся затем мощными усилителями, изменения напряжения на термисторе. Если одновременно случайно изменится и сопротивление, хотя бы на  $1 \cdot 10^{-6}$  своей величины, то напряжение на термисторе также изменится на величину, прямо пропорциональную току. Это меняющееся напряжение называют шумом или — так как оно зависит от тока — шумом тока. Для получения наилучшего соотношения между сигналом и шумом необходимо, чтобы в рабочих условиях шум тока был меньше шума, обусловленного тепловыми флуктуациями напряжения<sup>7, 8</sup>. Для изготовления бесшумных образцов необходимо особое внимание обращать на сырьё, размеры мельчайших частиц, степень спекания, способ создания контактов и вообще на любые фазы процесса, в результате которых в поверхности могли бы возникать трещины или щели. Все вышеописанные термисторы нагревались или протекающим по ним током, или благодаря изме-

нениям окружающей температуры. В термисторах же с косвенным подогревом температура и сопротивление регулируются главным образом мощностью, подводимой к нагревателю, находящемуся в термическом контакте с термистором.

Примером образца такого типа может служить изготовленный из материала № 2 шарик диаметром в 0,038 см, вставленный в небольшой стеклянный цилиндр приблизительно 0,38 см длиной и 0,076 см диаметром. Небольшая нагревательная катушка из нихрома, сопротивление которой равно  $\bullet 100$  см, наматывается на цилиндр и оплачивается стеклом. На рис. 16 изображен график

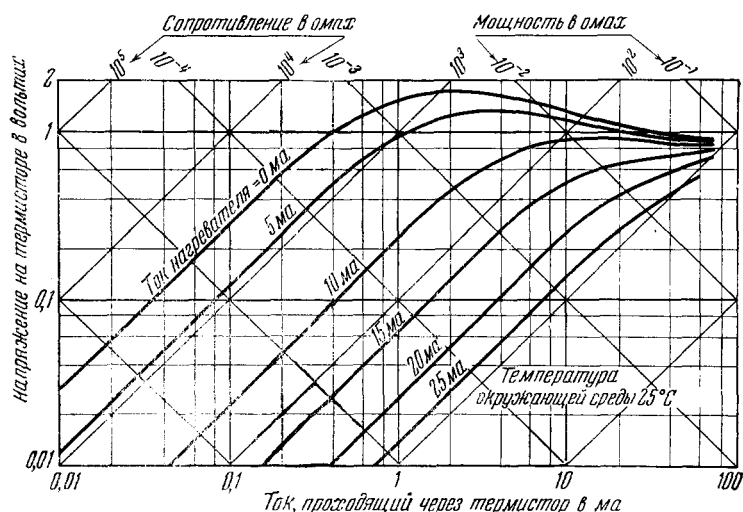


Рис. 16. Кривые зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  термистора с косвенным подогревом, построенные для шести различных значений тока нагревателя. Значения сопротивления и мощности даются диагональными линиями.

зависимости  $\lg V$  от  $\lg I$  для элемента, изготовленного в виде шарика, при различных значениях тока нагревателя. Этим способом можно менять сопротивление шарика от 3000 ом, приблизительно до 10 ом. Термисторы с косвенным подогревом используются обычно там, где можно электрически изолировать друг от друга регулируемую и регулирующую цепи, и подводить к нагревателю с постоянным сопротивлением энергию от регулирующей цепи.

## II. ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИСТОРОВ

Исключительная многосторонность, малые размеры и прочность термисторов послужили причиной того, что спустя лишь пять лет после первого опыта применения термисторов в области связи, их в большом количестве начали использовать в радиосхемах.

В дальнейшем термисторы нашли себе ещё и другие важные применения. К числу важнейших из них относятся регуляторы температуры, задерживающие устройства, автоматические регуляторы усиления в усилителях с обратной связью, ограничители громкости и приборы для измерения мощности УВЧ.

Поразительно, что такая многосторонность может быть обусловлена характером зависимости сопротивления от температуры. И тем не менее, именно эта зависимость создаёт очень выгодное нелинейное соотношение между током и напряжением. Последнее же, наряду с возможностью изготавливать чувствительные элементы самых различных форм и размеров, является причиной того, что термисторы применяются в самых разнообразных областях. Важнейшие применения термисторов, а именно — элементы электрических цепей и измерительные и регулирующие приборы — следует рассматривать, группируя их по основным характеристикам: зависимости сопротивления от температуры, напряжения от тока и тока от времени (динамическая зависимость).

### Зависимость сопротивления от температуры

В первой части отмечалось, что температурный коэффициент сопротивления термисторов является отрицательным, а по величине при комнатной температуре в несколько раз превышает температурный коэффициент сопротивления обычных металлов. У обычно используемого термисторного материала № 1 температурный коэффициент при 25°С равен  $-4,4\%$  на °С, т. е. больше чем в 10 раз превосходит температурный коэффициент меди, равный при этой же температуре  $+0,39\%$  на °С. Сопротивление изготовленного из этого материала элемента электрической цепи при 0°С в 9 раз больше, чем при 50°С. Укажем для сравнения, что сопротивление медного провода при 50°С в 1,21 раз больше его значения при 0°С.

Характеристика зависимости сопротивления термисторов от температуры делает возможным использование их в качестве чувствительных термометров, регуляторов температуры и компенсаторов влияния изменений температуры окружающей среды на другие элементы электрических схем.

### Термометрия

Применение термисторов для измерения температуры логически вытекает из основных принципов термометрии сопротивления. Однако большая величина температурного коэффициента у термисторов позволяет получить новый (высший) порядок чувствительности. Это наряду с малыми размерами, простотой и прочностью термисторов даёт возможность использовать их для самых разнообразных температурных измерений. Предназначенные для этой

цели термисторы-термометры обладают высокой стабильностью, хорошей—вплоть до  $300^{\circ}\text{C}$  и превосходной—при более умеренных температурах. Подвергнутый хорошему искусственному старению термистор, в течение двух месяцев применявшийся для прецизионных измерений температуры при различных её значениях (вплоть до  $100^{\circ}\text{C}$ ), сохранял неизменной свою градуировку с точностью  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Стабильность термисторов-термометров можно считать (так как разработка этого вопроса ещё продолжается) приближающейся к стабильности прецизионных платиновых термометров. Как правило, термисторы используют в обычных мостовых или иных схемах, служащих для измерения сопротивления. Для того чтобы сопротивление термистора-термометра определялось исключительно температурой окружающей среды, необходимо, как и во всяком термометре сопротивления, поддерживать измеряющий ток настолько малым, чтобы он не производил заметного нагревания. Так как термисторы обычно обладают более высоким сопротивлением, чем металлические термометры сопротивления или термопары, то, в отличие от последних, сопротивление вводов, как правило, не является помехой. Это даёт возможность помещать чувствительный к изменению температуры элемент на некотором расстоянии от связанной с ним измерительной схемы. В результате термисторы-термометры можно применять самыми разнообразными способами, например, оказывается возможной передача показаний температуры к контрольным пунктам по проводам.

Таблица II  
Зависимость сопротивления от температуры  
для типичного термистора-термометра

$T (^{\circ}\text{C})$	Сопротивление (ом)	Температурные коэффициенты	
		$B (^{\circ}\text{C})$	$\alpha (\% \text{ на } 1^{\circ}\text{C})$
-25	580 000	3780	-6,1
0	145 000	3850	-5,2
25	46 000	3920	-4,4
50	16 400	3980	-3,8
75	6 700	4050	-3,3
100	3 200	4120	-3,0
150	830	4260	-2,4
200	305	4410	-2,0
275	100	4600	-1,5

В таблице II приведены характеристики типичного термистора-термометра.

В качестве чувствительного термометра этот термистор с простым мостом Уитстона и с гальванометром, чувствительность которого равна  $2 \cdot 10^{-10} \text{ а/мм}$ , будет легко отмечать изменение температуры на  $0,0005^{\circ}\text{C}$ . Для сравнения заметим, что минимальное изменение температуры, определяемое прецизионным платиновым термометром сопротивления с требующимся для него мостом специального типа (например, мостом Мюллера), будет при том же самом гальванометре равно  $0,003^{\circ}\text{C}$ .

Для этого термистора постоянная рассеяния\*) в неподвижном воздухе приблизительно равна  $4 \frac{\text{мвт}}{^\circ\text{C}}$ .

Термическая постоянная времени в неподвижном воздухе приблизительно равна 70 сек. Размеры термистора: диаметр приблизительно равен 2,794 мм, длина приблизительно равна 13,716 мм.

Некоторые из используемых в термометрии типов термисторов изображены на рис. 17. В число их включены образцы, пригодные

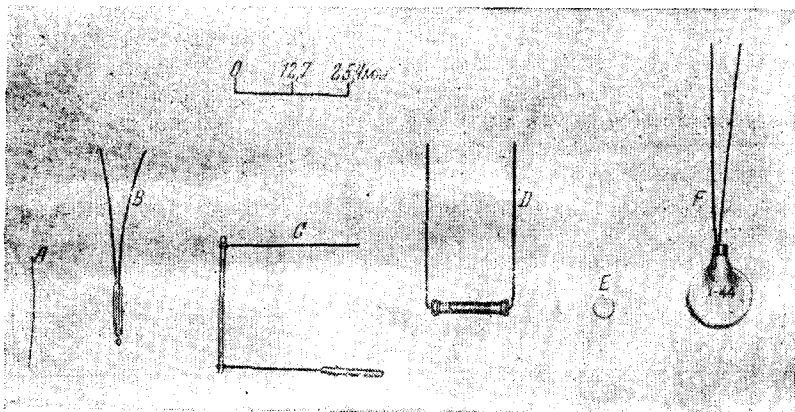


Рис. 17. Некоторые типы термисторов, которые применяются как термометры сопротивления.

для применений столь различных, как внутривенная термометрия крови и измерение температуры сильно перегруженного ротора. Буквой *A* на рис. 17 отмечен крошечный шарик со временем реакции в воздухе, меньшим 1 сек; буквой *B* — образец типа зонда, используемый для измерений в потоках газа и в жидкостях; буквой *C* — метеорологический термометр, используемый для автоматической радиопередачи данных о погоде с аэростатов свободного полёта; буквами *D* — образец, сделанный в виде стержня, *E* — диск или шарик, применяемый в шарике металлического термометра. Такие диски припаивают к металлическим пластинам, чтобы связать малое тепловое сопротивление с объектом, температуру которого необходимо измерить. Буквой *F* обозначен большой, покрытый краской, диск для применения во влажных средах. Характеристики этих типов термисторов приводятся в таблице III.

\*) Постоянная рассеяния представляет отношение подводимой мощности в ваттах, рассеиваемой в термисторе, к создающемуся в результате этого повышению температуры в  $^\circ\text{C}$ . Постоянная времени равна времени, необходимому для изменения температуры термистора на 63% от разности между начальным значением его температуры и температурой окружающей среды.

Таблица III

## Термисторы-термометры

Температура (в °C)	A	B	C	D	E	F
	Номинальное сопротивление в омах					
-25	—	—	87500	610000	—	13000
0	5000	325000	37000	153000	490	3200
25	2000	100000	18000	48500	175	950
50	900	33000	9700	17300	71	340
75	460	13000	5500	7100	32	145
100	250	6000	3700	3400	16	70
150	95	1600	—	870	4,5	—
200	—	500	—	—	1,6	—
300	—	80	—	—	—	—
Температурный коэффициент $\alpha$ при 25° C (в % на 1° C)	-3,4	-4,4	-2,8	-4,4	-3,8	-4,4
Максимальная допустимая температура (в °C)	150	300	100	150	200	100
Постоянная рассеяния С (в мвт на 1° C) в неподвижном воздухе	0,1	1	7	7	—	20
В неподвижной воде	—	7	—	—	—	—
Термическая постоянная времени (в сек) в неподвижном воздухе	1	30	25	60	—	—
В неподвижной воде	—	4	—	—	—	—
Тип	шарик	зонд	стержень	стержень	диск	диск
Размеры в дюймах: диаметр	0,015	0,1	0,05	0,15	0,2	0,56
толщина (или длина) (без вводов)	0,02	0,6	1,2	0,7	0,1	0,31

Температуру недоступных (движущихся или слишком горячих для контактной термометрии) объектов можно определять, фокусируя их излучение посредством эллиптического зеркала на подходящем термисторе. Такой термистор может иметь вид тонкой чешуйки, укрепленной на твердой опоре. Преимуществами его по сравнению с термопарой и болометром сопротивления являются более благоприятное значение сопротивления, прочность и большой температурный коэффициент сопротивления. Можно сделать термистор столь небольшого размера, что в связи с уменьшением теплоемкости изменения в его сопротивлении будут совпадать с изменениями температуры. У термисторов-чешуек постоянные времена могут меняться от 1 миллисекунды до 1 сек. Для измерения малых изменений сопротивления чешуйки необходимы чувствительные измерительные приборы (или усилители на электронных лампах), так как величина падающей на термистор мощности излучения может быть очень малой. Там, где нет быстрых изменений температуры, можно применять термисторы с большими значениями постоянной времени и с более простым устройством схемы.

### Регулирование температуры

Использование термисторов для регулирования температуры тесно связано с применением их в качестве измеряющих температуру приборов. В идеальном регулирующем температуру элементе чувствительность к изменениям температуры должна быть высокой, а сопротивление должно иметь при этой температуре подходящее для используемой схемы значение. Вызванное нагреванием схемы повышение температуры регулирующего элемента должно быть небольшим, а стабильность его градуировки — хорошей. Форма и размеры чувствительного элемента определяются несколькими факторами, а именно: имеющимся в распоряжении пространством, требующейся скоростью реакции на изменения температуры и значением рассеиваемой в элементе регулирующей схемы мощности, необходимым для управления реле, моторами и электронными лампами.

Благодаря своей высокой температурной чувствительности термисторы являются весьма многообещающими в качестве регулирующих элементов. Стабильность и возможность применения их при сравнительно высоких температурах привели, например, к использованию стержневого термистора в управляющем устройстве авиадвигателя<sup>9</sup>. Термистор, установленный в шарике стандартного термометра диаметром в 6,35 мм, работал приблизительно при 275° С. Он был соединен с дифференциальным реле и управляющим мотором авиационной двадцативосьми-вольтовой системы постоянного тока. Рассеиваемая в термисторе мощность равнялась

2 ваттам. Сопротивление типичного термистора при такой высокой температуре месяцами сохранялось неизменным с точностью до  $\pm 1,5\%$ . Соответствующее изменение в градуировке равнялось приблизительно  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Было разработано несколько других аналогичных конструкций, использующих то же самое управляющее устройство с другими термисторами, предназначенными для работы как при более высокой, так и при более низкой температурах. Типичные термисторы, используемые при более низких температурах, сохраняли свою градуировку неизменной с точностью до нескольких десятых градуса. Вообще, при использовании термисторов в электронно-ламповых схемах, в них рассеивается меньшая мощность, чем при использовании их в схемах релейных. Это обеспечивает меньшее повышение температуры термистора и, следовательно, более точную регулировку. При расчёте может быть учтено среднее значение этого повышения температуры; различные варианты установок нуждаются в индивидуальной градуировке для того, чтобы исправлять ошибки, когда они велики. Поправки могут быть различными в зависимости от того, являются ли они результатом происходящих время от времени изменений теплопроводности окружающей среды или возникают при переходе от одной установки к другой. Чем больше рассеиваемая в термисторе мощность, тем больше для данного изменения теплопроводности величина абсолютной ошибки в значении регулируемой температуры. Это следует из соотношения:

$$\Delta T = \frac{W}{C}, \quad (22)$$

где  $\Delta T$  — повышение температуры,  $W$  — рассеиваемая мощность и  $C$  — постоянная рассеяния, зависящая от термической связи с окружающей средой.

По той же самой причине температура, определяемая термометром сопротивления, погружённым в движущуюся среду, будет зависеть от скорости потока, если чувствительный к температуре элемент работает, будучи на несколько градусов теплее окружающей его среды.

Расчёт термистора для термостата с вентиляционной трубой можно проводить (поскольку это связано с повышением температуры) следующим образом:

- 1) определить рассеиваемую мощность (величина её зависит от выбранной схемы и от требуемого значения предельной чувствительности);
- 2) оценить допустимое повышение температуры термистора, предполагаемое изменение скорости воздуха и необходимую точность регулировки температуры;
- 3) решить уравнение (22) относительно постоянной рассеяния и выбрать термистор, размеры и конструкция которого соответ-

ствуют величине этой постоянной при номинальной скорости воздуха.

В том случае, когда для данной цели подходит несколько типов термисторов, выбор одного из них определяется требуемым значением постоянной времени.

### Компенсаторы

Естественным и очевидным применением термисторов является использование их для компенсации обусловленных колебаниями температуры окружающей среды изменений сопротивления электрических цепей. Простым примером этого может служить компенсация изменений сопротивления линии из медного провода, которое увеличивается приблизительно на 0,4% на градус Цельсия. Достаточно было бы включить последовательно с этой линией термистор, имеющий сопротивление, равное приблизительно 0,1 части сопротивления меди, и температурный коэффициент, равный —4% на 1° С, чтобы компенсировать изменения сопротивления линии в небольшом интервале температур. На практике, однако, параллельно (а иногда последовательно) с компенсирующим термистором включают омическое сопротивление так, чтобы изменения сопротивления такой комбинации были почти равны по величине и противоположны по знаку изменениям сопротивления цепи, компенсируемым в результате в широком интервале температур (см. рис. 18).

По рис. 18 видно, как с помощью термистора (сопротивление которого при 25° С равно 566 ом), включенного параллельно с омическим сопротивлением в 445 ом, можно компенсировать изменения сопротивления медной обмотки (равного 1000 ом при 25° С). Вместе с компенсатором обмотка в интервале температур от —25° С до +75° С сохраняет постоянное значение сопротивления с точностью до  $\pm 1,6\%$ , равное 1250 ом. Сопротивление одной меди меняется в этом же интервале температур от 807,5 до 1192,5 ом, т. е. на  $\pm 19\%$  по отношению к среднему его значению. Общее же сопротивление цепи при наличии компенсатора увеличивается при максимальном значении температуры лишь на 1,6%. Такое незначительное возрастание сопротивления объясняется тем, что компенсирующий термистор обладает большим температурным коэффициентом сопротивления. Характеристики такого термистора являются настолько стабильными, что за 10 лет сопротивление его изменилось бы меньше, чем на 1%, если бы даже он находился при любой — вплоть до 100° С температуре. Рис. 15 представляет характеристики старения типичных термисторов, годных для использования в компенсаторах. Эти кривые включают и те изменения, которые происходят в течение периода старения (несколько дней) при производстве термисторов.

так что старение, имеющее место при использовании термистора, представляет лишь часть общего старения. Во многих схемах, предназначенных для работы при строгих допусках и вместе с тем при больших изменениях окружающей температуры, значение сопротивления одного (или нескольких) элемента схемы может изменяться с температурой в недопустимых пределах. Результирующее изменение сопротивления часто можно уменьшить, включив в соответствующем месте схемы простой термистор. Это оказывается особенно эффективным, если схема содержит электронно-ламповые усилители.

В этом случае уничтожаются частотные и амплитудные изменения в схемах связи и предотвращаются обусловленные изменениями температуры ошибки в показаниях приборов. Изменение индуктивности катушки, вызванное изменением

магнитных характеристик вещества сердечника с температурой, предотвращается насыщением катушки постоянным током, величина которого регулируется непосредственно сопротивлением вставленного в сердечник термистора.

Этим методом величина магнитного потока постоянного тока регулируется так, что индуктивность катушки оказывается независимой от температуры.

При расчёте компенсатора необходимо обратить внимание на обеспечение того, чтобы и термистор и компенсируемый элемент подвергались воздействию одинаковой температуры. Необходимо учесть величину рассеиваемой в термисторе мощности и ограничить её значением, которое не будет создавать значительного повышения температуры термистора над температурой окружающей среды.

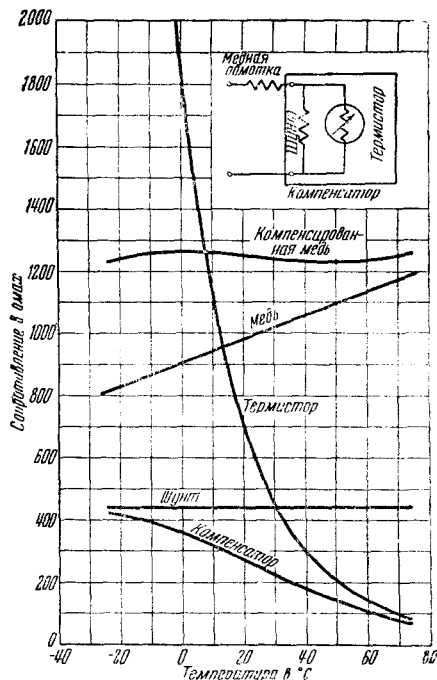


Рис. 18. Компенсация обусловленных температурными колебаниями изменений сопротивления медного проводника с помощью термистора.

### Вольт-амперные характеристики

На рис. 9 была изображена нелинейная по форме статическая характеристика типичного термистора, связывающая значения напряжения, тока, сопротивления и мощности. Часть кривой справа от максимального значения напряжения имеет отрицательную крутизну, что может быть использовано в электрических схемах. При малой рассеиваемой мощности указанная характеристика начинается со значения сопротивления, приблизительно равного 50 000 *ом*. Дополнительное рассеивание мощности повышает температуру термистора и уменьшает его сопротивление. При максимальном значении напряжения сопротивление уменьшается до 17 000 *ом*, т. е. приблизительно до  $\frac{1}{3}$  своего «холодного» значения, а рассеиваемая мощность становится равной 13 *мвт*. Когда рассеиваемая мощность достигает 100 *мвт*, сопротивление становится равным приблизительно 300 *ом*. Характеристики зависимости сопротивления от мощности дают возможность использовать термисторы в качестве чувствительных приборов для измерения мощности и как автоматически изменяющиеся сопротивления для регуляторов амплитуды на выходе генераторов и усилителей. Нелинейность вольт-амперной характеристики позволяет также использовать термисторы как регуляторы напряжения, регуляторы громкости, экспандеры, приборы дистанционного управления и бесконтактные переключатели. Чтобы термисторы можно было с одинаковым успехом применять для этих целей в цепях как постоянного, так и переменного токов, их (за исключением двух ранних типов) изготавливают исключительно из неполяризующихся полупроводников.

### Приборы для измерения мощности

В испытательных установках, в диапазоне сверхвысоких и ультравысоких частот, термисторы широко применяются как измеряющие мощность элементы. Особые преимущества используемых для этого термисторов заключаются в том, что их можно сделать небольшими по размерам и имеющими малую электрическую ёмкость, их можно сильно перегружать (причём градуировка остаётся неизменной) и, наконец, их легко можно проградуировать мощностью постоянного тока или низкочастотной мощностью. Термистор для измерения мощности используется как поглощающее мощность замыкающее сопротивление в передающих линиях типа Лехера и волноводного или коаксиального типов. Разработаны методы монтажа, которые уменьшают отражение высокочастотной энергии от оконечной нагрузки до исчезающе малых значений и обеспечивают точное измерение мощности в обширном диапазоне частотного спектра. Согласно техническим условиям, тер-

термистор включается в одно из плечей моста Уитстона и подвергается воздействию низкочастотной энергии или энергии постоянного тока, пока его сопротивление не достигнет рабочего значения (например, 125  $\text{ом}$  или 250  $\text{ом}$ ) в отсутствии мощности, которую требуется измерить. Эта измеряемая в дальнейшем мощность уменьшает сопротивление термистора, мост становится неуравновешенным, и отклонение от равновесия фиксируется измерительным прибором моста. Для описываемой испытательной

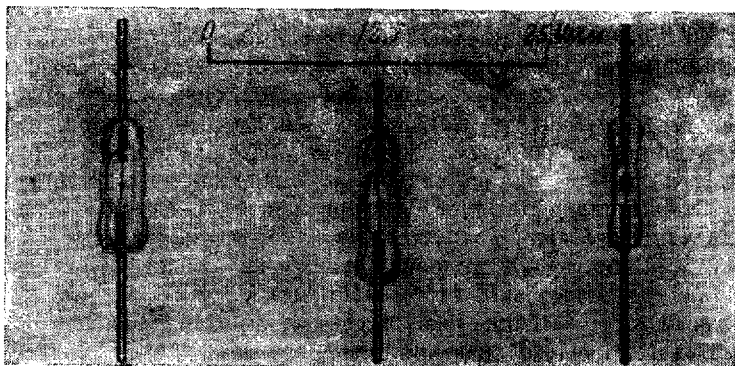


Рис. 19. Используемые для измерения мощности термисторы, изготовленные в виде шариков различных размеров.

установки полная шкала соответствует измеряемой мощности в 1  $\text{мвт}$ , хотя, применяя термисторы-шарики различного размера (как на рис. 19), можно измерять значения мощности от 0,1  $\text{мвт}$  до 200  $\text{мвт}$ .

Непрерывные испытания этих термисторов в рабочих условиях показывают, что они остаются стабильными в течение неопределенно долгого времени. Группа из восьми термисторов-ваттметров, работавших обыкновенно при 10  $\text{мвт}$  и имевших равное 20  $\text{мвт}$  максимальное значение номинальной мощности, находилась в эксплуатации в течение больше чем 3000 часов при 30  $\text{мвт}$  мощности на входе. Их сопротивление при комнатной температуре с точностью до 1,5% осталось равным своему начальному значению, а такая важная характеристика, как чувствительность к мощности, изменилась меньше чем на 0,5%. Когда измеряющие мощность испытательные установки предназначаются для работы при наличии больших колебаний в температуре окружающей среды, необходимо компенсировать изменения температуры термистора. Согласно техническим условиям этого достигают, вводя в схему моста два других термистора. Последние конструируются так, чтобы они были не чувствительны к токам в мосте, но легко

реагировали на изменения окружающей температуры. Один из компенсаторов поддерживает неизменной нулевую точку, а другой — сохраняет градуировку шкалы измерительного прибора независимой от влияния изменения температуры на характеристики измеряющего термистора.

#### Автоматический регулятор амплитуды генератора

Мичэм<sup>10</sup> и Шефер и Уайз<sup>11</sup> применили термисторы для стабилизации амплитуды как низко-, так и высокочастотных генераторов. Эти схемы генерируют вследствие наличия положительной обратной связи у электронной лампы. Схема обратной связи представляет мост, в котором по крайней мере одно плечо содержит термистор, нагреваемый выходной мощностью генератора. Благодаря этому обратная связь зависит по фазе и амплитуде от выходной мощности, и имеется только одно значение сопротивления термистора, которое уравнивает мост и уменьшает амплитуду колебаний до нуля. Очевидно, что нет смысла в стремлении выполнить это условие, и рабочая точка отличается от него как раз настолько, чтобы мост оставался слегка не уравновешенным, а колебания на выходе достигали заранее определённого постоянного значения. Генераторы, амплитуда колебаний которых определяется нелинейностью термистора, имеют много преимуществ по сравнению с генераторами, амплитуда которых ограничивается нелинейностью электронных ламп. Клирфактор на выходе оказывается меньшим, а характеристики работы гораздо меньше зависят от электронной лампы и от колебаний в подводимом напряжении. Тепловая инерция термистора должна быть достаточной для того, чтобы препятствовать изменению его сопротивления при частоте генерации. Это условие легко выполняется для всех (вплоть до малых долей герца) частот. Рис. 20 изображает термистор, часто используемый для регулировки генератора, и его статическую характеристику. Этот термистор оказывается годным для генераторов с частотами порядка 100 гц. Подобные же типы термисторов разработаны для более низких частот и других значений сопротивления и мощности.

Там, где высокая температурная чувствительность термистора в регуляторе генератора оказывается невыгодной, прибегают к термостатированию его вместе с нагревателем или к использованию компенсирующей термисторной цепи, подобной изображённой на рис. 21.

#### Автоматический регулятор усиления в усилителе

Так как сопротивление термисторов подходящей конструкции заметно меняется с величиной мощности, рассеиваемой на них или на тесно связанных с ними нагревателях, такие термисторы

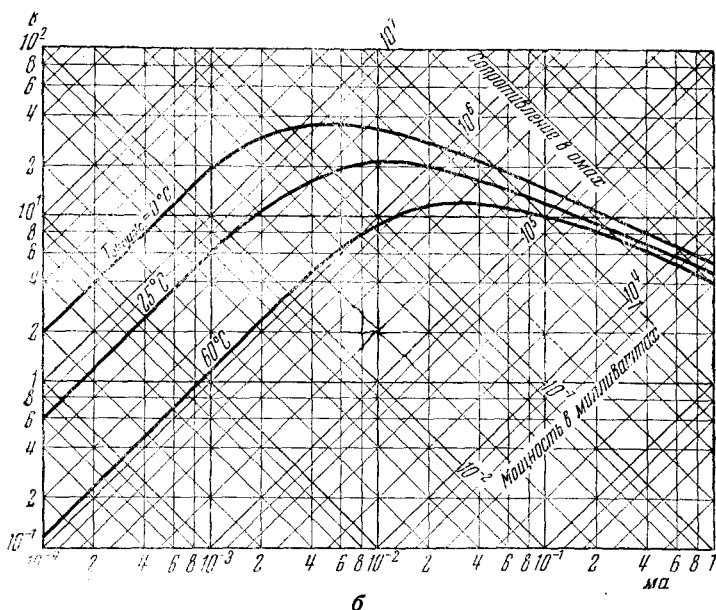
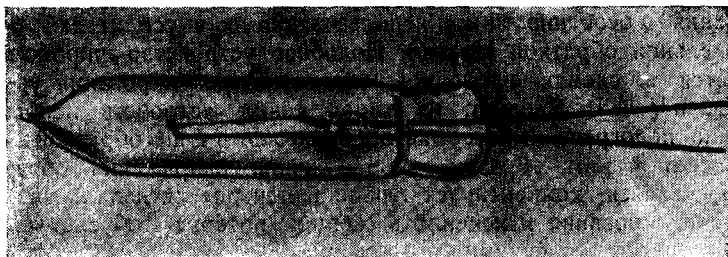


Рис. 20. *а* — Термистор, используемый для регулировки амплитуды. Длина стеклянного баллона равна 38,1 мм. *б* — Характеристика установившегося режима, полученная для изображённого на рис. *а* термистора, используемого для регулировки амплитуды.

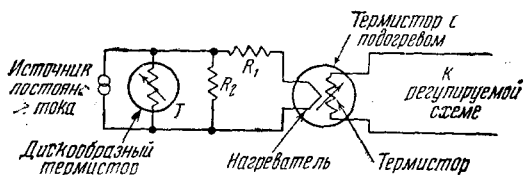


Рис. 21. Схема, в которой для компенсации влияния изменений температуры окружающей среды на регулирующий термистор используется вспомогательный дискообразный термистор.

оказались очень ценными в качестве автоматических регуляторов усиления (в особенности при использовании их в усилителях с отрицательной обратной связью). Подобное устройство широко применяется в схемах проводной связи для регулирования уровня передачи<sup>12, 13, 14</sup>. В одном из типов таких устройств непосредственно подогреваемый термистор включают в цепь обратной связи усилителя таким образом, что величина напряжения обратной связи, меняясь, компенсирует любое изменение сигнала на выходе. Для регулирования изменений в общих потерях, обусловленных атмосферными условиями и другими факторами, усиление каждого усилителя передающей системы непрерывно регулируется этим устройством так, что устанавливается постоянный во времени уровень передачи от начала до конца канала. Именно таким образом регулируется усиление в широко используемой в настоящее время передающей системе типа К-2. В этой системе изменения потерь при передаче, вызванные колебаниями температуры, оказываются неодинаковыми в различных частях полосы пропускания. В определённых трансляционных пунктах вдоль передающей линии потери регулируются двумя дополнительными термисторными регуляторами усиления, устроенными так, что крутизна характеристики пропорциональна частоте, а выпуклость её достигает максимума при некоторой определённой частоте. Эти термисторы нагреваются своими нагревателями, приводимыми в действие энергией, зависящей от амплитуды отдельных контрольных сигналов, которые специально для этого посылаются с передаточного пункта.

В приборах такого типа термистор реагирует как на изменение температуры окружающей среды, так и на проходящий через него ток. Там, где это имеет значение, можно, используя подогревный термистор (подобный изображённому на рис. 21), уничтожить реакцию на изменение окружающей температуры. Нагреватель включают во вспомогательную цепь, содержащую термистор, компенсирующий изменения температуры. Эта цепь устроена так, что при любом значении температуры окружающей среды мощность, подводимая к нагревателю термистора, регулирующего усиление, как раз достаточна для того, чтобы регулировать и поддерживать неизменным значение температуры вблизи регулирующего усиления термистора.

В другом интересном типе термисторного регулятора усиления используется подогревный термистор с нагревателем, управляемым мощностью на выходе усилителя, и с термистором во входной цепи, как указано на рис. 22. При таком устройстве обратная связь является скорее тепловой, чем электрической связью. Подобным термистором регулируется широкополосная передающая система типа L-1. К этой системе подводится ток контрольной частоты, и ток этой же частоты, посылаемый четырёхполосником.

в регулятор, приводит в действие нагреватель термистора, делая возможной плавную и непрерывную регулировку усиления.

Используя подогревные термисторы с различными характеристиками, можно защитить от перегрузок изображённый на рис. 22 контур с нагрузкой. Чувствительность и сопротивление термистора выбираются для этого такими, чтобы термистор образовал шунт

со столь большим сопротивлением, чтобы его влияние на усилитель было ничтожным при любом значении мощности на выходе, соответствующем нормальному режиму. Если же мощность на выходе превышает нормальное значение, то термистор нагревается и сопротивление его уменьшается. Он шунтирует вход усилителя и ограничивает, таким образом, выходную мощность. Выбор термистора с соответствующим значением постоянной времени даёт возможность задержать начало эффекта ограничения на любое время приблизительно от одной секунды до нескольких минут.

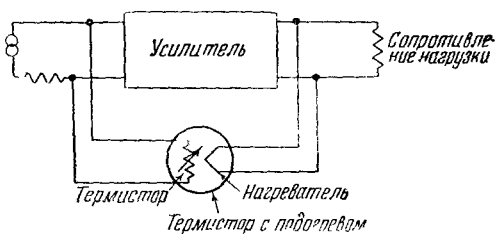


Рис. 22. Схема «тепловой» обратной связи для регулирования усиления. Эта схема используется также в качестве предохраняющей от перегрузок.

### Регуляторы и ограничители

Группа родственных применений термисторов основана на их нелинейной вольт-амперной характеристике установившегося режима. К таким применениям относятся регулятор напряжения, ограничитель громкости звука, компрессор и экспандер. Компрессор и экспандер представляют собой устройства для изменения диапазона амплитуд сигналов. Назначением компрессора является уменьшение диапазона амплитуд, тогда как экспандер увеличивает его. На рис. 23 кривая 1 представляет статическую характеристику типичного термистора с отрицательной крутизной справа от максимального значения напряжения. Кривая 2 изображает характеристику омического сопротивления  $R$  с положительным и постоянным значением крутизны. Кривая 3 соответствует характеристике, получаемой для последовательно соединённых термистора и омического сопротивления. На значительной части её напряжение почти не зависит от тока. Это обуславливает возможность создания регулятора или ограничителя напряжения. Если используют омическое сопротивление большей величины (кривая 4), то последовательное соединение его с термистором даёт в результате кривую 5 — характеристику компрессора. В этих

применениях термисторный регулятор включают параллельно с сопротивлением нагрузки так, что в схеме, изображённой на рис. 23,

$$E = E_0 = E_1 - I R_{\text{вх}}. \quad (23)$$

Здесь  $E$  — падение напряжения на термисторе и омическом сопротивлении  $R$ ,  $E_0$  — напряжение на выходе, а  $E_1$ ,  $I$  и  $R_{\text{вх}}$  — входное напряжение, ток и сопротивление.

Если термистор и омическое сопротивление, с ним связанное, включить последовательно с генератором и нагрузочным сопротивлением, то получится экспандер и

$$E_0 = E_1 - E. \quad (24)$$

Когда соединённое последовательно с термистором омическое сопротивление  $R$  увеличивается, диапазон амплитуд уменьшается, и обратно.

До сих пор предполагалось, что изменение рабочей точки происходит достаточно медленно для того, чтобы следовать по статическим характеристикам. При достаточно быстром изменении рабочая точка отклоняется от кривой статической характеристики и имеет тенденцию перемещаться по пересекающей статическую кривую линии, соответствующей омическому сопротивлению. Тогда при достаточно быстрых колебаниях регулирующее действие может возникать благодаря изменениям величины сопротивления, определяемым эффективным значением рассеиваемой в термисторе мощности. В ограничителях громкости звука термистор рассчитывают на такую скорость реакции, чтобы он оказывал ограничивающее воздействие на изменение громкости звука синлабической или меньшей частоты и не воспроизводил более быстрых

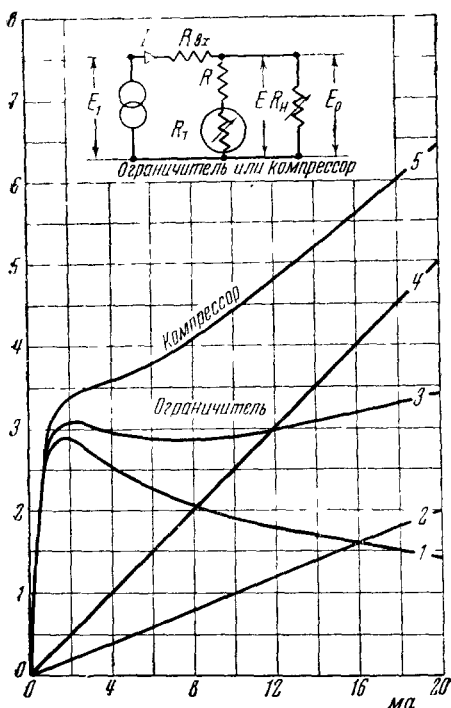


Рис. 23. Характеристики простого термисторного регулятора напряжения; схема ограничителя или компрессора.

деляемым эффективным значением рассеиваемой в термисторе мощности. В ограничителях громкости звука термистор рассчитывают на такую скорость реакции, чтобы он оказывал ограничивающее воздействие на изменение громкости звука синлабической или меньшей частоты и не воспроизводил более быстрых

звуковых колебаний с возникающим, при наличии последних, изменением формы сигнала или нелинейным искажением. Ограничители громкости этого типа могут согласовать большие изменения громкости с отсутствием искажения формы сигнала<sup>13, 15</sup>.

### Переключатели дистанционного управления

Бесконтактные переключатели и реостаты являются естественным добавлением к только что рассмотренным применениям. Термистор используется как элемент схемы, которую нужно регулировать, в то время как величина сопротивления термистора зависит от энергии, которую непосредственным или косвенным путём рассеивает в нём управляющая схема.

Используя преимущества нелинейности статической вольт-амперной характеристики термистора, можно в некоторых применениях обеспечить моментальное и запирающее действия.

### Манометр

Некоторые интересные и полезные применения, такие, как, например, манометры, газоанализаторы, приборы для измерения уровня жидкости, теплопроводности и потока, обладающие высокой чувствительностью и низкой рабочей температурой, основаны на зависимости постоянной рассеяния термистора от теплопроводности среды, в которой он находится. Как видно из рис. 10, при изменении этой постоянной статическая характеристика смещается относительно осей координат. Нежелательную в этих применениях чувствительность термистора к изменениям температуры окружающей среды можно во многих случаях ликвидировать или уменьшить путём введения в измерительную схему второго термистора со сходными характеристиками. Компенсирующий термистор подвергается воздействию той же самой температуры окружающей среды, но воздействие это экранируется влиянием потока или давления газа, которые являются измеряемыми величинами. Два термистора включают в смежные плечи моста Уитстона, который оказывается уравновешенным, когда измеряемое воздействие равно нулю, и выведенным из равновесия, когда эффективная теплопроводность среды возрастает. При измерениях скорости газового потока минимальное значение скорости, которое может быть измерено, ограничивается (как и во всех подобного рода приборах) созданными нагретым термистором конвекционными токами.

Манометр, являющийся наиболее типичным из этих применений, следует описать несколько подробнее. Чувствительный элемент термистора-манометра представляет небольшой шарик 0,508 мм в диаметре, висящий на двух тонких проволочных вводах в полом шарике, соединяемом с помещением, в котором необходимо

измерить давление газа. На рис. 24 приведены вольт-амперные характеристики типичной лабораторной модели манометра, снятые в воздухе при нескольких значениях абсолютного давления от  $10^{-6}$  мм рт. ст. до атмосферного. Рабочая точка находится справа от пика этих кривых. Этот и подобный ему, но находящийся в откачанном баллоне термистор, включают в смежные плечи моста Уитстона (отношение плечей которого равно единице) так, как

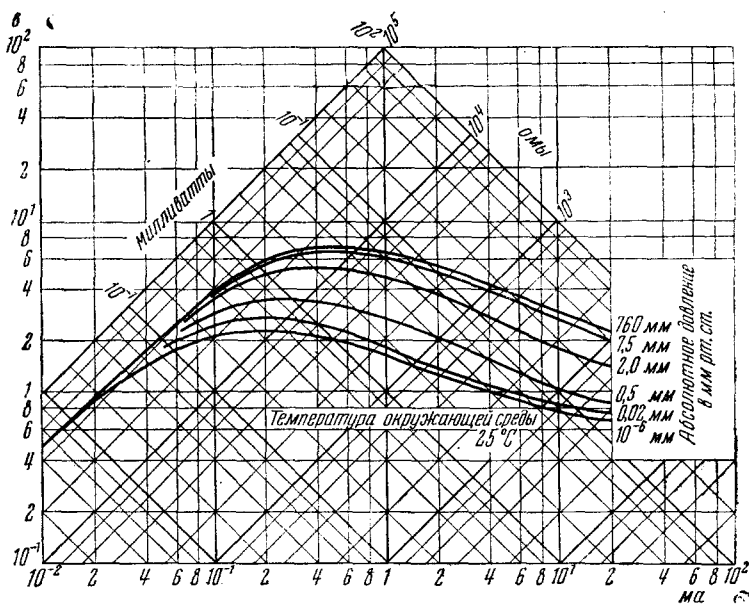


Рис. 24. Характеристики типичного термистора-манометра, иллюстрирующие влияние давления газа на зависимость напряжения от тока и сопротивления от мощности.

показано на схеме рис. 25. Там же приведена градуировка такого манометра. Характеристика смещается, когда используется газ, значение теплопроводности которого отличается от теплопроводности воздуха. Такой манометр считается наиболее подходящим для измерений давления от  $10^{-5}$  до 10 мм рт. ст. Нижний предел измеряемого давления определяется такими условиями опыта, как, например, чувствительность измерительного прибора или способность его сохранять установку нуля в течение достаточно долгого времени при наличии изменений в подаваемом напряжении и в температуре окружающей среды. Верхний предел измерения давления обусловлен тем, что при высоких давлениях напряжение, выводящее мост из равновесия, всё слабее и слабее зависит от давления. Это «насыщение» обусловлено тем, что средняя длина сво-

бодного пробега молекул газа становится малой по сравнению с расстоянием между термистором-шариком и внутренней поверхностью баллона манометра, так что влияние охлаждения становится почти независимым от давления. Особыми преимуществами обладает термистор-манометр при использовании его в газах, которые могут быть теплом разложены на составные части. В этом

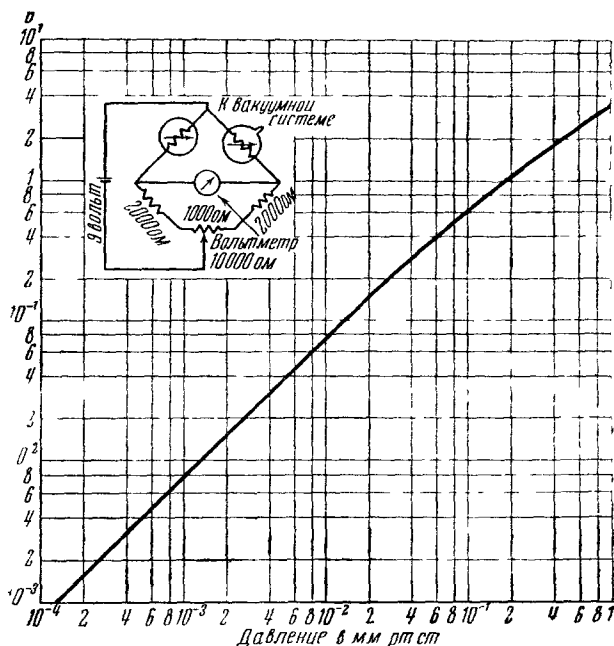


Рис. 25. Рабочая схема и градуировка манометра, использующего термистор, характеристики которого приведены на рис. 24.

случае температура термистора должна превышать температуру окружающей среды не больше чем на  $30^\circ\text{C}$ . В обычных же условиях повышение температуры в вакууме приблизительно до  $200^\circ\text{C}$  допускает измерения в широком интервале значений давления. Специальные модели изготавливаются также и для использования в коррозионных газах. В этих моделях воздействию газа подвергаются лишь стекло и платиновый сплав.

### Задерживающие устройства

В области связи термисторы применяются в основном для получения задержек времени. Физическим обоснованием такого применения является замедленное возрастание тока после подачи напряжения, рассмотренное в первой части статьи для случая

непосредственно нагреваемого термистора. Этот тип работы характеризуется мощностью, управляющей задержкой времени.

Используя соответствующую рабочим условиям и схеме управляющую мощность, можно получать задержки времени от нескольких миллисекунд до нескольких минут. Термисторы также имеют то преимущество перед другими аналогичными приборами, что обладают малыми размерами, лёгким весом, прочностью, неопределённо долгим сроком службы и не имеют контактов, движущихся частей или пневматического управления, требующих осторожного обращения.

Управляемые мощностью задерживающие термисторы лучше всего приспособлены для таких применений, где нет нужды в жёстких допусках на временные интервалы. Для некоторых применений в области связи достаточно, чтобы максимальное и минимальное значения времени относились как 6/1 (в результате одновременного отклонения от номинального значения всех влияющих на задержку времени факторов, а именно: рабочего напряжения на  $\pm 5\%$ , рабочего тока реле на  $\pm 25\%$ , сопротивления реле на  $\pm 5\%$ , изменения температуры окружающей среды от  $20^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$  и таких изменений в термисторе, какие встречаются в образцах одного и того же типа).

После операции задержки управляемому мощностью задерживающему термистору необходимо дать время для того, чтобы остыть перед началом второй операции. Если этого не сделать, то второй интервал задержки будет короче первого. Время же охлаждения зависит от частных условий в схеме и от конструкции термистора, но, как правило, в несколько раз превышает рабочее время выдержки. В телефонных релейных схемах, нуждающихся вскоре после предварительного использования в задерживающей операции, термистор обычно включают так, что он оказывается закороченным контактами реле в течение рабочего интервала задержки. Это позволяет термистору остывать в течение периода времени, когда реле заперто. Если этот период достаточно продолжителен, термистор становится годным для применения, как только выпадает реле. Задерживающие термисторы работали при испытании их на срок службы больше, чем полмиллиона раз, причём изменение в их задерживающем действии было незначительным. Для того чтобы избежать ограничений, связанных с управляемым мощностью задерживающим термистором и вводимых широкими пределами времени выдержки и длительным периодом охлаждения между операциями, был применён замедленный метод охлаждения. В этом устройстве используют два реле, и термистор нагревают до малого значения сопротивления, пропускаемая через него сравнительно сильный ток в течение интервала времени, короткого по сравнению с ожидаемым временем выдержки. Ток тогда автоматически уменьшается до меньшего значения, и

термистор охлаждается до тех пор, пока его сопротивление не возрастет достаточно для того, чтобы ослабить ток ещё больше и выключить работающее реле. Этой частью рабочего цикла объясняется большая часть ожидаемого интервала времени. Вместе с этим устройством термистор оказывается годным для повторного использования немедленно же после завершения интервала выдержки или после любой части его. При правильном выборе рабочего тока и параметров схемы возможные изменения напряжения и окружающей температуры мало влияют на интервал времени. Основной переменной величиной остаётся время охлаждения самого термистора. Для данного образца оно остаётся постоянным, но, как отмечалось выше, может меняться от образца к образцу в зависимости от значений постоянной рассеяния и теплоёмкости. Помимо задерживающих устройств термисторы могут быть использованы в нескольких сходных применениях. Броски тока (напряжения) можно предотвратить с помощью рабочих реле или иной чувствительной к возмущению аппаратуры, включая термистор последовательно с частью схемы, которую необходимо предохранить. В случае броска тока высокое начальное сопротивление термистора сводит этот бросок к малому значению при условии, что он существует достаточно долго для того, чтобы преодолеть тепловую инерцию термистора. С другой стороны, нормальное рабочее напряжение подводится в течение времени, достаточно долгого для того, чтобы уменьшить сопротивление термистора до незначительной величины, так что нормальный рабочий ток потечёт после короткого интервала. Таким образом, термистор даёт возможность схеме точно различать нежелательный сигнал короткой продолжительности и желаемый, более длительный сигнал даже в том случае, когда нежелательный сигнал по напряжению в несколько раз больше желаемого.

#### Генераторы, модуляторы и усилители

Группа применений, уже исследованных в лаборатории, но не используемых в технике, включает генераторы, модуляторы и усилители для диапазона низких и звуковых частот. Если термистор работает в установившемся режиме на участке вольт-амперной характеристики, имеющем отрицательную крутизну, и если небольшое переменное напряжение накладывается затем на постоянное, то будет протекать небольшой переменный ток. Если термистор имеет небольшую постоянную времени  $\tau$  и если приложенная частота достаточно мала, то переменная вольт-амперная характеристика будет следовать кривой состояния установившегося режима и значение  $\frac{dV}{dI}$  будет отрицательным. Когда частота приложенного переменного напряжения возрастает, величина отрицательного сопротивления уменьшается. При некоторой критической частоте  $f_c$

сопротивление равно нулю, а ток сдвинут по фазе относительно напряжения на  $90^\circ$ . Вблизи значения частоты  $f_c$  термистор ведёт себя подобно индуктивности, величина которой порядка генри. Когда частота превышает значение  $f_c$ , сопротивление становится положительным и равномерно возрастает до тех пор, пока не приблизится к величине, соответствующей постоянному току, когда ток и напряжение совпадают по фазе друг с другом.

Критическая частота приближённо определяется выражением  $f_c = \frac{1}{2\tau}$ . Если  $\tau$  является величиной порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  сек, то значение  $f_c$  становится равным 10 000 гц, и вплоть до половины этого значения частоты термистор имеет приблизительно постоянное отрицательное сопротивление. Термисторы с точечным контактом, имеющие такие или ещё более высокие значения критической частоты, изготавливаются во многих лабораториях. Однако пока ни один из них не был сделан достаточно стабильным для того, чтобы найти применение в технике. Было доказано теоретически и экспериментально, что любой прибор с отрицательным сопротивлением можно использовать как генератор, модулятор и усилитель. В дальнейшем термисторы, повидимому, найдут себе применение и в этой области.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Жузе и Б. В. Курчатова, *Phys. Zeits. Sow.* **2**, 453 (1932).
2. A. H. Wilson, *Semiconductors and Metals*, Cambridge, 1939.
3. Ф. Зейтц, *Современная теория твёрдого тела*, Гостехиздат, 1950.
4. Н. Ф. Мотт и Р. У. Герни, *Электронные процессы в ионных кристаллах*, ИЛ, 1950.
5. M. Le-Blanc and H. Sachse, *Phys. Zeits.* **32**, 887 (1931).
6. W. Meyer, *Zeits. f. Physik* **85**, 278 (1933).
7. J. B. Johnson, *Phys. Rev.* **32**, 97 (1928).
8. C. J. Christensen and G. L. Pearson, *Bell. Syst. Techn. J.* **15**, 197 (1936).
9. R. A. Gund, *AIEE Trans.* **64**, 730 (1945).
10. L. A. Meacham, *Proc. IRE* **26**, 1278 (1938).
11. R. L. Shepherd and R. O. Wise, *Proc. IRE* **31**, 256 (1943).
12. J. H. Boffman, *Bell Labor. Record* **20**, № 10, 258 (1942).
13. J. E. Tweeddale, *Western Electric Oscillator*, December 1945, стр. 3 и 34.
14. J. C. Johnson, *Electronic Industries* **4**, 74 (1945, August).
15. J. A. Weller, *Bell Labor. Record* **23**, № 3, 72 (1945).

#### ПОСЛЕСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Работа Беккера, Грина и Пирсона представляет собой самый полный из существующих обзор физических свойств термисторов и их разнообразных технических применений.

Анализируя физические свойства термисторов, авторы исходят из положений зональной теории. Анализ зональной теории посвящён ряд работ советских учёных (Волькенштейна, Давыдова,

Иоффе, Пекара, Френкеля, Адировича и других), но в списке литературы, приложенном в статье, указана лишь одна из этих работ. Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что авторы переведённой статьи полагают зональную теорию непогрешимой, тогда как советскими учёными в ней вскрыт ряд недостатков. Прежде всего зональная теория относится лишь к кристаллическим телам, и представление об электронных зонах становится сомнительным при переходе к телам жидким и аморфным. Но среди полупроводников имеются и аморфные и жидкие соединения, обладающие общими для всех полупроводников свойствами, хотя на них и не распространяются предположения зональной теории.

Стоит также заметить, что согласно зональной теории роль термической обработки сводится к созданию локальных уровней, характеризующих различные дефекты в структуре кристалла; но объяснить зависимость величины проводимости термистора от режима термообработки (например, от температуры и продолжительности отжига) зональная теория не в состоянии.

Наконец, зональная теория пока не может объяснить существования полупроводников с металлическим ходом проводимости.

Более ценной является вторая часть работы, в которой рассмотрены разнообразные технические применения термисторов. В нашей периодической и книжной литературе ещё не описывались такие применения термисторов, как манометры, газоанализаторы, приборы для измерения скорости потока и т. п.

В переведённой статье рассматриваются и эти виды применений, причём приведены соответствующие схемы и характеристики.

Нам кажется, что эти применения термисторов заслуживают серьёзного внимания, и разработка их должна быть продолжена.

Во второй части также не отмечена ни одна из работ наших учёных, посвящённых использованию термисторов в технике.

Стоит добавить, что в настоящее время термисторы применяют как усилители не только в виде лабораторных моделей: разработана технология изготовления так называемых транзисторов—кристаллических усилителей, изготовляемых из германия, являющегося полупроводящим элементом<sup>25, 26</sup>.

В заключение приводим краткий перечень основных работ советских учёных в этой области:

1. Ф. Ф. Волькенштейн, Электропроводность полупроводников, Гостехиздат (1947).
2. Ф. Ф. Волькенштейн, Электронные процессы в реальных кристаллах, УФН 28, вып. 4 (1946).
3. Я. И. Френкель, Современная теория металлических тел, УФН 30, вып. 1—2 (1946).
4. С. И. Пекар, Новый взгляд на электронную проводимость нонных кристаллов, ЖЭТФ 18, вып. 2 (1948).

5. Г. И. Скана ви, Диэлектрическая поляризация и потери в твёрдых неорганических диэлектриках, *Электричество*, № 8 (1947).
6. Б. Т. Коломиец, Термисторы, *Электричество*, № 3 (1947).
7. С. И. Пекар, Кристалл как многоэлектронная проблема и одно-электронное приближение, *ЖЭТФ*, 18, вып. 6 (1948).
8. Л. Д. Ландау и С. И. Пекар, Эффективная масса полярона, *ЖЭТФ* 18, вып. 5 (1948).
9. Я. И. Френкель, Теория электрических контактов между металлами, *ЖЭТФ* 16, вып. 4 (1946).
10. В. А. Архангельская и А. М. Бонч-Бруевич, Изменение проводимости сернистого кадмия при облучении его электронами, *ДАН*, 77, № 2 (1951).
11. Ф. Ф. Волькенштейн, Зонная теория твёрдого тела и пределы её применимости, *УФН* 43, вып. 1 (1951).
12. Я. И. Френкель, Современные представления о природе диэлектриков, *Электричество*, № 8 (1947).
13. С. И. Пекар, Автолокализация электрона в диэлектрической инерционно-поляризующейся среде, *ЖЭТФ* 16, вып. 4 (1946).
14. С. И. Пекар, Локальные квантовые состояния электрона в идеальном ионном кристалле, *ЖЭТФ*, 16, вып. 4 (1946).
15. Б. И. Давыдов и И. Шмушкевич, Теория электронных полупроводников, *УФН* 24, вып. 1 (1940).
16. В. П. Жузе и С. Н. Рывкин, «Экситонный» характер поглощения света и примесная фотопроводимость, *ДАН* 77, № 2 (1951).
17. А. Ф. Иоффе, Полупроводники в современной физике и технике, *Электричество*, № 6 (1939).
18. Я. М. Ксендзов, Электрические свойства  $\text{TiO}_2$ , *ЖТФ* 20, вып. 1 (1950).
19. И. Д. Конозенко, Современные болометры, *ЖТФ* 20, вып. 6 (1950).
20. Б. И. Болтакс, О зависимости коэффициента термоэлектродвижущей силы в полупроводниках, *ЖТФ* 20, вып. 9 (1950).
21. В. И. Пружинина-Грановская, Керамические реостаты и сопротивления, *ЖТФ* 14, вып. 7—8 (1944).
22. В. И. Пружинина-Грановская, Новый тип линейных объёмных сопротивлений «Дефар», *Электричество*, № 11 (1946).
23. М. В. Савостьянова, Мельчайшие частицы металла внутри кристаллической решётки, *УФН* 22, вып. 1 (1939).
24. Б. И. Давыдов, О контактном сопротивлении полупроводников, *ЖЭТФ* 9, вып. 4 (1939).
25. В. С. Вавилов, Усиление токов высокой частоты кристаллическими германиевыми триодами, *УФН* 40, вып. 1 (1950).
26. В. С. Вавилов, Работа кристаллических триодов в области частот 5—25 мГц, *УФН* 42, вып. 3 (1950).