

это вариантное место оно блуждает хаотически по кристаллу. В электрическом поле движение дырки приобретает направленность: электроны во время переходов будут преимущественно смещаться против поля, сама же дырка будет двигаться по полю, подобно носителю положительного заряда (эстафетное движение электронов сводится к движению дырки).

Полупроводники, обладающие преимущественно электронной проводимостью, называются *полупроводниками типа n* (negativ — отрицательный), а полупроводники, обладающие дырочной проводимостью, — *типа p* (positiv — положительный).

§ 36. Применения полупроводников

Термисторы. Как уже было указано, с повышением температуры электропроводность всех полупроводников (в отличие от электропроводности металлов) резко возрастает, что является результатом увеличения с ростом температуры концентрации электронов проводимости. В первом приближении для небольшого интервала температур зависимость электропроводности σ от температуры для полупроводников может быть выражена формулой

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\omega}{kT}},$$

где k — постоянная Больцмана и ω — энергия, необходимая для перевода электрона в зону проводимости (энергия активации). Вблизи абсолютного нуля все полупроводники становятся хорошими изоляторами. Опыт показывает, что у некоторых полупроводников при повышении температуры на 1° электропроводность увеличивается на 3—6%, а при повышении на 10° — приблизительно на 75%.

Высокая чувствительность сопротивления полупроводников к изменению температуры позволяет применять их в разнообразных областях техники.

Приборы, основанные на сильной зависимости величины сопротивления полупроводника от температуры, называются *термисторами*.

Для изготовления термисторов используются оксидные полупроводники, обладающие значительной величиной отрицательного температурного коэффициента сопротивления, например смеси двуокиси титана и окиси магния, окиси никеля в соединении с окислами марганца и др. Термисторы изготавливают в виде цилиндрических стержней, трубок, прямоугольных столбиков, бусинок или тонких нитей. Для предохранения от механических повреждений их заключают в баллончики из стекла, керамики или металла (конечно, с изоляцией от него).

К числу основных параметров термистора относятся: 1) сопротивление его при комнатной (20°C) температуре (у разных образцов оно колеблется от тысячи омов до мегома); 2) величина температурного коэффициента сопротивления (в процентах на градус) при той же комнатной температуре; 3) тепловая инерция, измеряемая временем, в течение которого сопротивление термистора изменяется до определенной величины; 4) максимально допустимая эксплуатационная температура; 5) теплостойкость и ряд других параметров.

Термисторы различают по назначению и конструкции.

Измерительные термисторы применяются для измерения температур и влажности воздуха. В этих приборах ток, проходящий через термистор, столь мал что не вызывает сколько-нибудь заметного его разогрева; величина разогрева термистора меняется только вследствие изменения температуры окружающей среды.

Конструктивное оформление измерительных термисторов весьма разнообразно, в зависимости от назначения. Часто встречаются «бусиновые» термисторы, представляющие собой очень маленькую бусину (размером не более точки от остро отточенного карандаша), сделанную из полупроводника и помещенную в тонкую стеклянную трубку. Диаметр трубки около 3 мм, длина около 7—8 мм. Малые размеры такого термистора резко снижают инерционность прибора и позволяют применять его для измерения температур малых объектов; они получили широкое применение и в медицинской практике для измерения температур в различных органах и тканях; их применяют и для измерения температуры в потоках газов и жидкостей для изме-

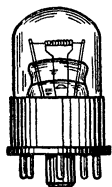


Рис. 120.
Термистор
косвенного
подогрева.

рения влажности воздуха и т. п.

Кроме измерительных термисторов, употребляются: *термисторы прямого подогрева*, отличающиеся тем, что сопротивление их меняется за счет джоулева тепла, и *термисторы с косвенным подогревом*, в которых полупроводник нагревается значительно выше температуры окружающей среды при помощи постороннего источника тепла (например, подогревной обмоткой) (рис. 120).

С помощью термисторов прямого подогрева решают следующие задачи:

1) осуществляют стабилизацию напряжения при не слишком больших колебаниях его и при небольших величинах тока (например, в телеграфных линиях). При увеличении напряжения на термисторе ток I в нем растет, что приводит к нагреву, а значит, и к уменьшению сопротивления R термистора; в итоге падение напряжения на термисторе $\Delta V = IR$ остается приблизительно постоянным;

2) поддерживают постоянство сопротивлений электрических цепей. При этом используют то, что термисторы имеют отрицательный температурный коэффициент, тогда как остальные элементы схемы, обычно изготавливаемые из металла, имеют положительный температурный коэффициент. Поэтому при последовательном соединении металлического проводника и термистора можно так подобрать величины их сопротивлений, что изменения температуры (вызванные током или внешними причинами) практически не повлияют на их суммарное сопротивление;

3) заменяют движковые реостаты; при прохождении тока по термистору он нагревается, что автоматически уменьшает его сопротивление;

4) создают «выдержку времени». Часто бывает необходимо, чтобы ток в цепи нарастал постепенно. Конструируют термисторы, нагревание которых током и в связи с этим падение их сопротивления до необходимой величины продолжают нужной промежуток времени (от миллисекунды до нескольких минут).

Термисторы с косвенным подогревом и термисторы специальной конструкции также находят широкое применение в технике: например для сигнализации о перегреве отдельных частей машины; о недостаточной смазке; об изменении уровня жидкости в резервуарах; о повышении температуры выше заданного предела в различных местах самолета, корабля или здания и во многих других случаях.

Фотосопротивления. Переход электронов полупроводника в зону проводимости может вызываться не только повышением температуры, но также и непосредственно поглощением фотона (внутренний фотоэффект; § 54).

Энергия фотонов зависит только от частоты света и выражается формулой $\epsilon = h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек есть постоянная Планка. Например, для желтого света энергия фотона составляет около 2 эв. Для большого числа полупроводников этой энергии вполне достаточно для перебрасывания электронов в зону проводимости. Существуют даже такие полупроводники, у которых энергия переброса электронов равна всего нескольким десятым электрон-вольта; на сопротивление этих полупроводников влияют не только видимые, но и далекие инфракрасные лучи.

Приборы, основанные на изменении сопротивления полупроводников в зависимости от освещенности, называются *фотосопротивлениями* (рис. 121).

В видимой области спектра наиболее употребительными полупроводниками для фотосопротивлений являются: селен, германий, сернистый кадмий и сернистый галлий; для инфракрасной же части употребляются сернистый, селенистый и теллуристый свинец.

Зависимость фототока от величины светового потока Φ , называемая световой характеристикой фотосопротивления, имеет нелинейный характер. В большинстве случаев эту зависимость можно выразить формулой

$$I = \gamma \Phi^n,$$

где $n > 0$ и всегда меньше единицы. γ называется *интегральной чувствительностью* фотосопротивления и показывает величину фототока при световом потоке, равном единице (измеряется в микроампер-люменах).

На рис. 122 представлена световая характеристика для фотосопротивлений ФС-А1 (сернисто-свинцовые), выпускаемых нашей промышленностью.

Из световой характеристики следует, что интегральная чувствительность фотосопротивления убывает с возрастанием светового потока. Например, чувствительность селеновых фотосопротивлений падает от 800—1000 мка/лм при слабых освещенностях до 100—200 мка/лм при сильных световых потоках. Нелинейность зависимости I

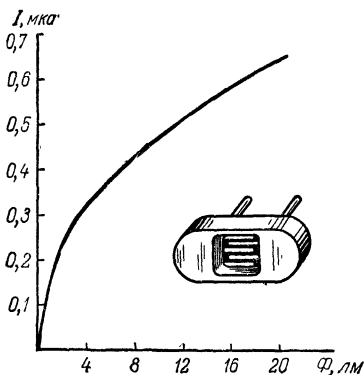


Рис. 122. Световая характеристика ФС-А1.

от Φ является одной из причин, ограничивающих применение фотосопротивлений в ряде областей.

Вольт-амперные характеристики фотосопротивлений имеют линейный характер.

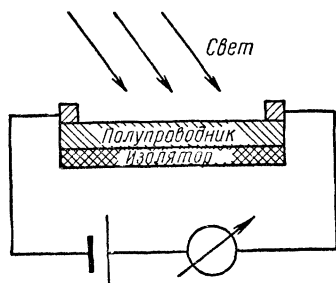


Рис. 121. Схема фотосопротивления

Все фотосопротивления обладают инерционностью; это значит, что фототок достигает своего значения в цепи фотосопротивления не мгновенно, а лишь через некоторый промежуток времени τ . Также и спадание фототока до нуля после прекращения освещения происходит не сразу. Инерционность полупроводниковых фотосопротивлений делает их малопригодными в случаях высокочастотной пульсации светового потока.

Фотосопротивления получили широкое применение в автоматике, в управлении техническими процессами на расстоянии. Ими пользуются также для сортировки изделий по их окраске или по размерам.

Ограничители перенапряжений (варисторы). Опыт показывает, что при несильных электрических полях (до нескольких сотен вольт на сантиметр) закон Ома для полупроводников остается справедливым; однако при сильных полях наблюдаются заметные отступления от него. Так, для германия отступления от закона Ома начинаются уже при $E_k = 900$ в/см, для кремния — при $E_k = 2500$ в/см. Эти поля называются критическими. Значение их зависит от природы полупроводника, температуры и концентрации примесей.

Исходя из формулы закона Ома $I = \sigma E$ и учитывая, что $I = env$, получаем $\sigma = \frac{env}{E} = enu$, где u — подвижность электронов, т.е. средняя добавочная скорость, которую приобретают электроны в поле с $E = 1$ в/см. Из указанного выражения для σ следует, что закон Ома должен выполняться лишь в том случае, если подвижность u и концентрация n носителей тока остаются постоянными при изменениях E . Тогда плотность тока будет пропорциональна напряженности поля, как и должно быть по закону Ома. Следовательно, отступление от закона Ома, наблюдаемое в полупроводниках, связано с влиянием сильных полей на подвижность и концентрацию электронов.

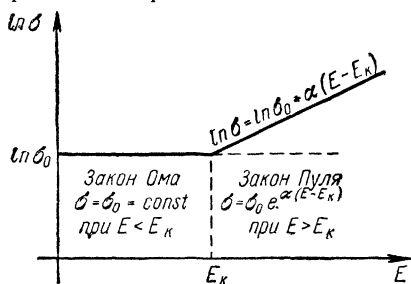


Рис. 123. Зависимость электропроводности полупроводников от напряженности поля.

Теория электропроводности полупроводников действительно показывает, что при увеличении E свыше определенного значения должно наблюдаться увеличение подвижности электронов и рост их концентрации. Последнее зависит от того, что 1) сильное поле изменяет энергетическое состояние электрона в атоме, вследствие чего энергия, которую нужно затратить для перебрасывания электрона в зону проводимости, уменьшается; 2) в сильных полях свободный электрон приобретает энергию, достаточную для ионизации атома решетки или атома примеси, что приводит к увеличению концентрации электронов проводимости.

Эмпирически зависимость электропроводности полупроводника от напряженности поля выражается законом Пуля:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha(E-E_k)},$$

здесь α — коэффициент, зависящий от температуры, E_k — критическое поле. На рис. 123 приведен график этого закона.

Полупроводниковые сопротивления, проводимость которых резко возрастает при увеличении напряженности электрического поля, получили название *варисторов*.

Варисторы из карбида кремния (86%) и связки применяются в виде дисков (*вилитовые диски*) в разрядниках, защищающих высоковольтные линии электропередач от грозовых перенапряжений. Схема вентильного разрядника показана на рис. 124. Он состоит из искровых промежутков, соединенных последовательно с вилитовым сопротивлением. Провод высокого напряжения через разрядник соединен с землей. Пока напряжение на проводе не превышает определенной величины, провод надежно изолирован от земли искровыми промежутками и сопротивлением полупроводника. При появлении перенапряжения, например от удара молнии, происходит пробой искровых промежутков и вилитовое сопротивление попадает под большое напряжение. Его сопротивление резко падает, и большой импульс тока уходит в землю. После исчезновения перенапряжения весь разрядник оказывается под рабочим напряжением провода, при котором сопротивление вилита вновь возрастает, ограничивая ток в землю, в результате чего электрическая дуга в искровых промежутках гаснет, разрядник автоматически отключает линию электропередачи от земли и вновь может принять новую волну перенапряжения.

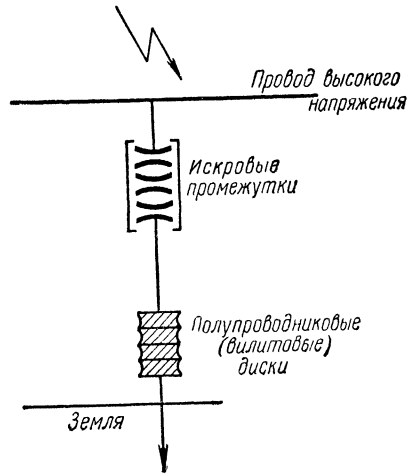


Рис. 124. Схема вентильного разрядника (ограничителя перенапряжения).

Полупроводниковые выпрямители. При контакте некоторых полупроводников иногда обнаруживается униполярная проводимость: ток легко проходит в одном направлении и почти не проходит в обратном. Это имеет место в особенности тогда, когда один из полупроводников обладает электронной проводимостью, другой — дырочной.

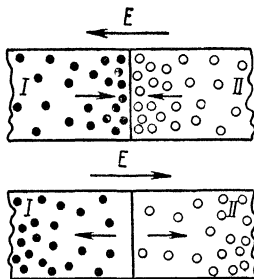


Рис. 125. Схема, поясняющая одностороннюю проводимость контакта двух полупроводников.

При указанных в верхней части рис. 125 направлениях поля электроны в полупроводнике I и дырки в полупроводнике II смещаются к поверхности контакта и электроны переходят из I в II, заполняя дырки. При обратном направлении поля электроны и дырки смещаются от поверхности контакта и электропроводность нарушается. (Приведенное объяснение униполярной проводимости в полупроводниках было развито советским физиком Б. И. Давыдовым.)

Односторонняя проводимость соприкасающихся разнородных проводников применяется в *полупроводниковых выпрямителях*,

например в *купроксных* выпрямителях, где осуществляется контакт между слоем закиси меди на медной шайбе и пластиной свинца, цинка или алюминия (рис. 126). Элементы купроксного выпрямителя соединяют последовательно, прижимая их один к другому при

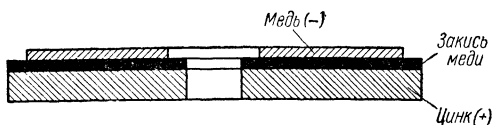


Рис 126 Схематический разрез купроксного выпрямителя.

помощи болта и гаек (рис. 127), причем между отдельными элементами располагают пластины для охлаждения, так как допустимая температура нагрева для такого выпрямителя невелика (около 40°C). Катодом в этих выпрямителях служат медные пластины. Купроксные выпрямители пригодны для напряжений не более 12—15 в на каждый элемент.

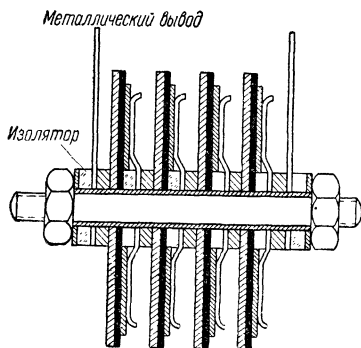


Рис 127 Схема сборки купроксного выпрямителя

На рис. 128 представлен аналогичный элемент *селенового* выпрямителя. На железную шайбу нанесен слой никеля, на нем расположен тонкий слой кристаллического селена толщиной 0,05—0,01 мм; в качестве второго электрода применена пластинка из тройного сплава легкоплавких металлов — кадмия, висмута и олова. Железная никелированная шайба служит анодом.

Вольт-амперная характеристика селенового выпрямителя показана на рис. 129. Допустимое напряжение для этих выпрямителей составляет 20—25 в на элемент при плотности тока до 50 ма/см^2 .

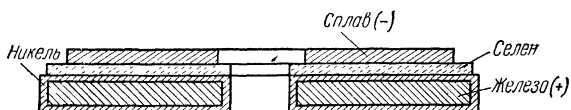


Рис. 128 Элемент селенового выпрямителя.

Униполярная проводимость границы между полупроводником и металлом играет существенную роль в действии так называемых *вентильных элементов* (стр. 267). Выпрямляющее действие, воз-

никающее при контакте двух полупроводников или полупроводника и металла, получило также широкое применение в полупроводниковых диодах и триодах, для изготовления которых применяют чаще всего германий и кремний. Такие полупроводниковые диоды и триоды имеют ряд преимуществ перед ламповыми. Они более прочны, имеют большой срок работы, значительно меньшие габариты. По сравнению с ламповыми полупроводниковые диоды и триоды имеют меньший уровень собственных шумов, больший коэффициент выпрямления и потребляют значительно меньше энергии.

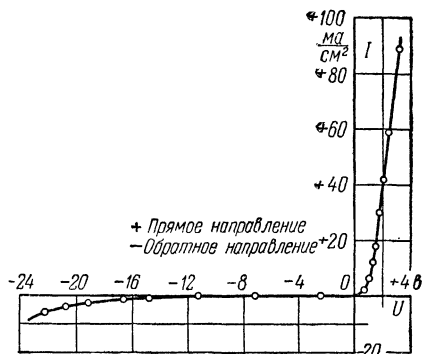


Рис. 129. Вольт-амперная характеристика селенового выпрямителя.

Термоэлектрогенераторы. В полупроводниках кинетическая энергия теплового движения свободных электронов увеличивается пропорционально абсолют-

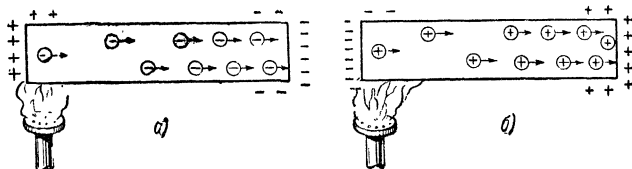


Рис. 130. Термоэлектродвижущая сила в полупроводниках: а — в электронном; б — в дырочном.

ной температуре. Отсюда следует, что если в полупроводнике создать разность температур, то на горячем конце начнется перемещение их (диффузия) в направлении от горячего конца к холодному;

более холодный конец полупроводника зарядится отрицательно, а горячий — положительно, так как он теряет часть электронов, переходящих к холодному концу (рис. 130). В результате появится разность потенциалов между концами полупроводника. В дырочном полупроводнике горячий конец, напротив, заряжается отрицательно, а холодный — положительно.

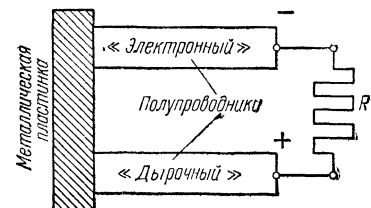


Рис. 131. Полупроводниковый термоэлемент.

Процесс диффузии зарядов, вызванный наличием градиента температуры, будет продолжаться до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не скомпенсирует этот диффузионный поток электрическим током обратного направления. Это равновесие и определяет возникшую термоэлектродвижущую силу.

Обычно полупроводниковый термоэлемент состоит из двух полупроводников разного типа, соединенных металлической пластинкой (рис. 131). В месте

соединения полупроводники нагреваются, а другие концы их охлаждаются воздухом или иным способом и являются полюсами термоэлемента, к которым присоединяется внешняя цепь. Из термоэлементов составляют термоэлектрические батареи.

Величина термоэлектродвижущей силы элемента определяется по формуле

$$\mathcal{E} = (\alpha_1 + \alpha_2)(T_1 - T_2),$$

где α_1 и α_2 —термоэлектродвижущие силы в каждом полупроводнике при разности температур на его концах в 1°C . Коэффициент полезного действия современных полупроводниковых термобатарей составляет 6—7%.

Если пропускать через термоэлемент электрический ток, то наблюдается обратный эффект (явление Пельтье): один из спаев нагревается, а другой—охлаждается. Этим явлением можно воспользоваться для создания полупроводниковых холодильников.
