

Уважаемые студенты!

- Изучите теоретический материал;
- Написать краткий конспект;
- По вопросам обращаться 072-1098278 или hvastov@rambler.ru
- Фотоотчёт конспекта прислать в течение 3 дней со дня получения задания на hvastov@rambler.ru

Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля—Ленца. Мощность электрического тока. Полупроводники. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Полупроводниковый диод. Полупроводниковые приборы.

План

1. **Работа и мощность электрического тока.**
2. **Закон Джоуля – Ленца.**
3. **Полупроводники. Собственная и примесная проводимости полупроводников.**
4. **Полупроводниковый диод. Полупроводниковые приборы.**

При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает **работу**.

За время t по цепи протекает заряд $q = It$. Работа электростатических сил при перемещении единичного заряда равна разности потенциалов $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ между начальной (1) и конечной (2) точками однородного участка. Величину $U_{12} = \Delta\varphi_{12}$ принято называть **напряжением** на участке цепи 1–2.

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2)q = UIt$$

где U – напряжение, I – сила тока в цепи, t – время протекания тока.

Эту работу называют **работой электрического тока**.

Работа электрического тока в СИ выражается в **джоулях** [Дж].

Используя закон Ома для участка цепи для работы тока можно получить формулы:

$$A = I^2Rt \quad A = U^2t/R$$

При протекании тока по участку цепи, обладающему сопротивлением, энергия электрического тока преобразуется во внутреннюю энергию проводника – в тепло. Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит название **закона Джоуля–Ленца**.

Работа A электрического тока I , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением R , преобразуется в тепло Q , выделяющееся на проводнике.

$$Q = A = I^2Rt$$

Мощность показывает, какая работа совершается за единицу времени.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока A к интервалу времени t , за которое эта работа была совершена:

$$P = \frac{A}{t} = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

Мощность электрического тока в СИ выражается в **ваттах** [Вт].

Внешняя цепь может представлять собой не только проводник с сопротивлением R , но и какое-либо устройство, потребляющее мощность, например, электродвигатель постоянного тока. В этом случае под R нужно понимать **эквивалентное сопротивление нагрузки**. Энергия, выделяемая во внешней цепи, может частично или полностью преобразовываться не только в тепло, но и в другие виды энергии, например, в механическую работу, совершаемую электродвигателем. Поэтому вопрос об использовании энергии источника тока имеет большое практическое значение.

Полная мощность источника, то есть работа, совершаемая сторонними

$$P_{\text{ист}} = \mathcal{E}I = \frac{\mathcal{E}^2 R}{R+r}$$

силами за единицу времени, равна

$$P = RI^2 = \mathcal{E}I - rI^2 = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$$

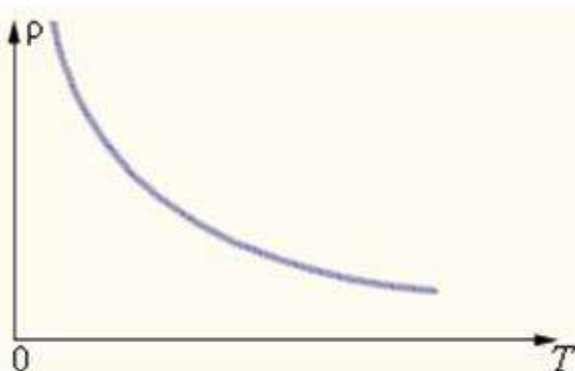
Во внешней цепи выделяется мощность

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}} \quad \eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}} = 1 - \frac{r}{R+r} = \frac{R}{R+r}$$

Отношение $\frac{P}{P_{\text{ист}}}$ равно $\frac{R}{R+r}$ называется **коэффициентом полезного действия источника**.

По значению удельного электрического сопротивления **полупроводники** занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений.

Качественное отличие полупроводников от металлов проявляется прежде всего в зависимости удельного сопротивления от температуры. С понижением температуры сопротивление металлов падает. У полупроводников, напротив, с понижением температуры сопротивление возрастает и вблизи абсолютного нуля они практически становятся изоляторами.



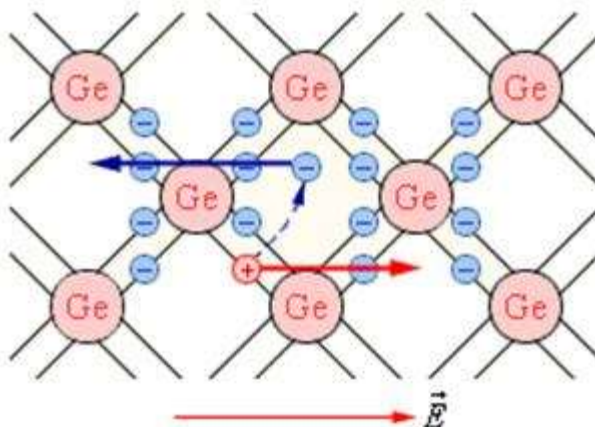
Зависимость удельного сопротивления ρ чистого полупроводника от абсолютной температуры T .

Полупроводниками называются вещества, удельное сопротивление которых убывает с повышением температуры.

Такой ход зависимости $\rho(T)$ показывает, что у полупроводников концентрация носителей свободного заряда не остается постоянной, а увеличивается с ростом температуры. Механизм электрического тока в

полупроводниках нельзя объяснить в рамках модели газа свободных электронов. Объяснение явлений, наблюдаемых в проводниках, возможно на основе законов квантовой механики. Рассмотрим качественно механизм электрического тока в полупроводниках на примере германия (Ge).

Атомы германия имеют четыре слабо связанных электрона на внешней оболочке. Их называют **валентными электронами**. В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь между атомами в кристалле германия является **ковалентной**, то есть осуществляется парами валентных электронов. Каждый валентный электрон принадлежит двум атомам.



Валентные электроны в кристалле германия гораздо сильнее связаны с атомами, чем в металлах; поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках на много порядков меньше, чем у металлов. Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей. Такой кристалл электрического тока не проводит. При повышении температуры некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Тогда в кристалле возникнут **свободные электроны** (электроны проводимости). Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые не заняты электронами.

*Вакансии, которые не заняты электронами получили название **дырок**.*

Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле. При заданной температуре полупроводника в единицу времени образуется определенное количество **электронно-дырочных пар**.

В то же время идет обратный процесс – при встрече свободного электрона с дыркой, восстанавливается электронная связь между атомами германия. Этот процесс называется **рекомбинацией**.

Рекомбинация – восстановление электронной связи между атомами.

Электронно-дырочные пары могут рождаться также при освещении полупроводника за счет энергии электромагнитного излучения.

В отсутствие электрического поля электроны проводимости и дырки участвуют в хаотическом тепловом движении.

Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые

ведут себя как положительно заряженные частицы. Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного I_n и дырочного I_p токов: $I = I_n + I_p$

Электрическим током в полупроводниках называется направленное движение электронов к положительному полюсу, а дырок к отрицательному.

Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна концентрации дырок: $n_n = n_p$. Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (то есть без примесей) полупроводников. Он называется **собственной электрической проводимостью** полупроводников.

Собственной электрической проводимостью полупроводников называется электронно-дырочный механизм проводимости, который проявляется только у чистых (то есть без примесей) полупроводников.

При наличии примесей электропроводимость полупроводников сильно изменяется.

Примесной проводимостью называется проводимость полупроводников при наличии примесей.

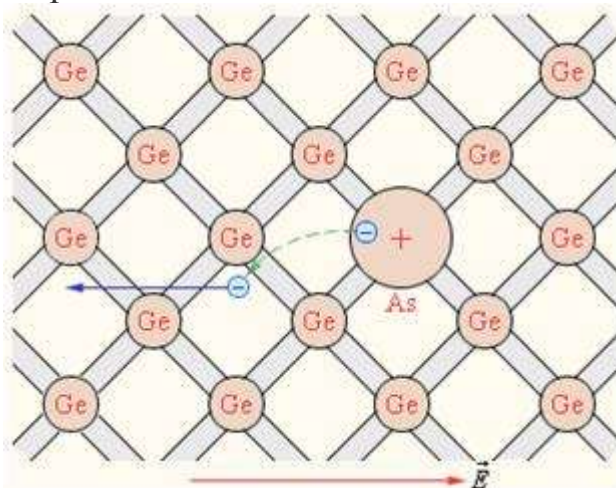
Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.

Различают два типа примесной проводимости – **электронную** и **дырочную** проводимости.

1. **Электронная проводимость** возникает, когда в кристалл полупроводника вводится примесь с большей валентностью.

Например, в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пятивалентные атомы мышьяка, As.

На рисунке показан пятивалентный атом мышьяка, оказавшийся в узле кристаллической решетки германия. Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия. Пятый валентный электрон оказался лишним; он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным. Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, расположенный в узле кристаллической решетки.



Донорской примесью – называется примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла.

В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов. Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз. Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.

В кристалле германия с примесью мышьяка есть электроны и дырки, ответственные за собственную проводимость кристалла. Но основным типом носителей свободного заряда являются электроны, оторвавшиеся от атомов мышьяка. В таком кристалле $n_n \gg n_p$.

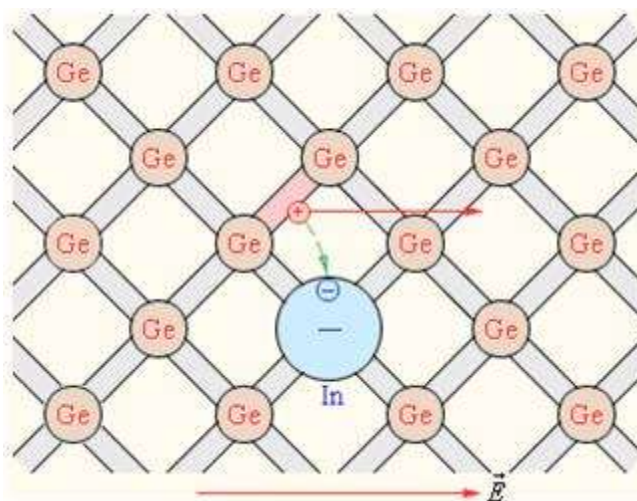
Проводимость, при которой основными носителями свободного заряда являются электроны называется электронной.

Полупроводник, обладающий электронной проводимостью, называется полупроводником n-типа.

2. **Дырочная проводимость** возникает, когда в кристалл полупроводника введена примесь с меньшей валентностью.

Например, в кристалл германия введены трехвалентные атомы In.

На рисунке показан атом индия, который создал с помощью своих валентных электронов ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия. На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия.



Акцепторной примесью – называется примесь из атомов с валентностью меньшей, чем валентность основных атомов полупроводникового кристалла, способных захватывать электроны.

В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки). На

эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.

Наличие акцепторной примеси резко снижает удельное сопротивление полупроводника за счет появления большого числа свободных дырок. Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника: $n_p \gg n_n$.

Проводимость, при которой основными носителями свободного заряда являются дырки, называется дырочной проводимостью.

Полупроводник с дырочной проводимостью называется полупроводником р-типа.

Следует подчеркнуть, что дырочная проводимость в действительности обусловлена перемещением по вакансиям от одного атома германия к другому электронов, которые осуществляют ковалентную связь.

Зависимость электропроводности полупроводников от температуры и освещенности

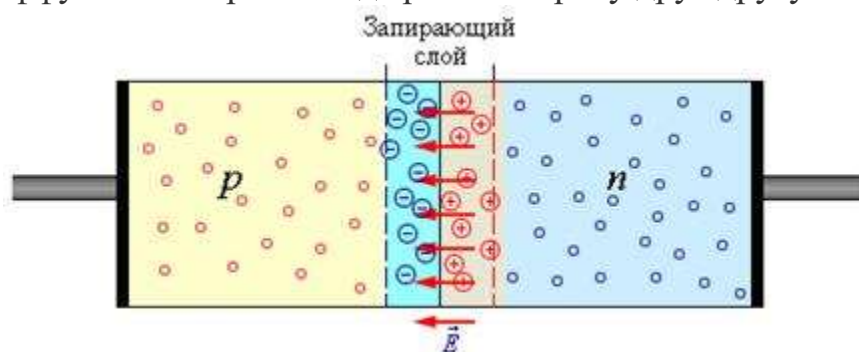
1. **У полупроводников с ростом температуры подвижность электронов и дырок падает, но это не играет заметной роли, так как при нагревании полупроводника кинетическая энергия валентных электронов возрастает и наступает разрыв отдельных связей, что приводит к увеличению числа свободных электронов, т. е. росту электропроводности.**
2. **При освещении полупроводника в нем появляются дополнительные носители, что приводит к повышению его электропроводности.** Это возникает в результате того, что свет вырывает электроны из атома и при этом одновременно возрастает число электронов и дырок.

В современной электронной технике полупроводниковые приборы играют исключительную роль. За последние три десятилетия они почти полностью вытеснили электровакуумные приборы. В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.

Электронно-дырочный переход (или п-р-переход) – это граница соприкосновения двух полупроводников с разными типами проводимости.

В полупроводнике *n*-типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n_n \gg n_p$). В полупроводнике *p*-типа основными носителями являются дырки ($n_p \gg n_n$). При контакте двух полупроводников *n*- и *p*-типов начинается процесс диффузии: дырки из *p*-области переходят в *n*-область, а электроны, наоборот, из *n*-области в *p*-область. В результате в *n*-области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В *p*-области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом, на границе полупроводников образуется

двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу.



Запирающий слой – это пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости.

Запирающий слой обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями запирающее напряжение U_z , приблизительно равное 0,35 В для германиевых n - p -переходов и 0,6 В для кремниевых.

n - p -переход обладает свойством односторонней проводимости.

Если полупроводник с n - p -переходом подключен к источнику тока так, что **положительный полюс источника соединен с n -областью**, а отрицательный – с p -областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает. Дырки в p -области и электроны в n -области будут смещаться от n - p -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через n - p -переход практически не идет. Напряжение, поданное на n - p -переход в этом случае называют **обратным**. Весьма незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, то есть наличием небольшой концентрации свободных электронов в p -области и дырок в n -области.

Если n - p -переход соединить с источником так, чтобы **положительный полюс источника был соединен с p -областью**, а отрицательный с n -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать n - p -переход, создавая ток в **прямом** направлении. Сила тока через n - p -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Полупроводниковый диод.

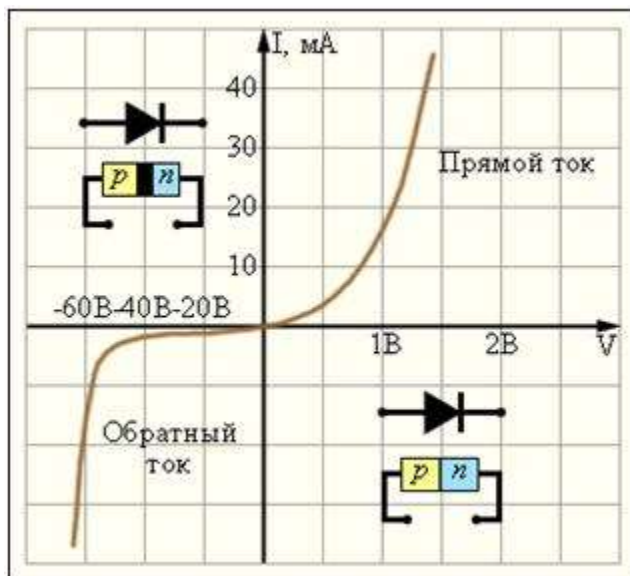
Способность n - p -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются **полупроводниковыми диодами**.

Полупроводниковыми диодами – называются полупроводниковые приборы с одним n - p -переходом.

Полупроводниковые диоды изготавливаются из кристаллов кремния или германия. При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом

проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости.

Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода приведена на рисунке.



Вольт-амперная характеристика кремниевого диода.

На графике использованы различные шкалы для положительных и отрицательных напряжений.

Полупроводниковые диоды обладают многими преимуществами по сравнению с вакуумными диодами – малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность. Существенным недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их параметров от температуры. Кремниевые диоды, например, могут удовлетворительно работать только в диапазоне температур от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. У германиевых диодов диапазон рабочих температур несколько шире.

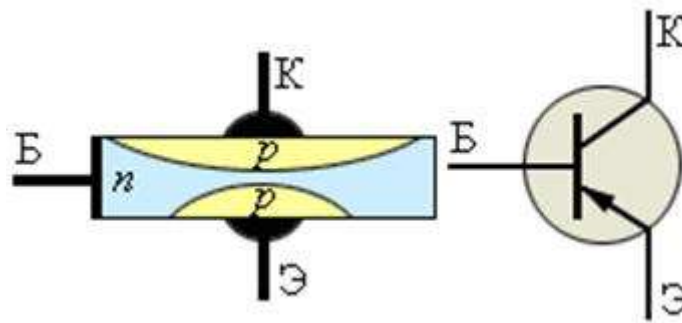
Полупроводниковые диоды используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный.

Транзистор.

Транзисторами – называются полупроводниковые приборы с двумя n - p -переходами.

Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний. Транзисторы бывают двух типов: p - n - p -транзисторы и n - p - n -транзисторы.

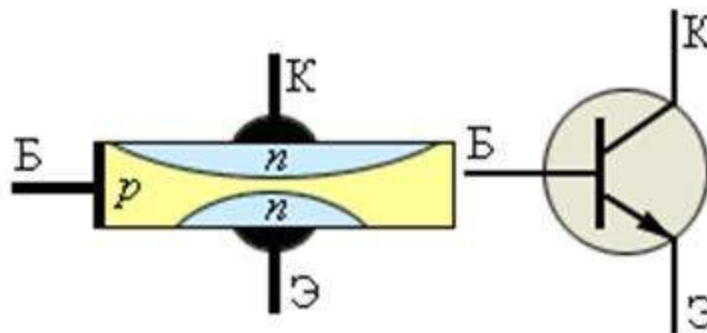
1. **p - n - p -транзисторы.** Германиевый транзистор p - n - p -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, то есть из полупроводника n -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, то есть области с дырочной проводимостью.



Транзистор структуры p–n–p.

Пластинку транзистора называют **базой** (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости – **коллектором** (К), а вторую – **эмиттером** (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.

2. **n–p–n-транзисторы.** В транзисторе n–p–n-типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p-типа, а созданные на ней две области – проводимостью n-типа.



Транзистор структуры n–p–n.

Оба n–p-перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рис. 5 показано включение в цепь транзистора p–n–p-структуры. Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» – в запирающем направлении (цепь коллектора).

Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда – электронов в базе и дырок в коллекторе – переход заперт.

При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток эмиттера $I_э$. Но для дырок, попавших в базу из эмиттера, n–p-переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток коллектора $I_к$. Для того, чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения (рис. 5), то на резисторе R , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать

амплитуду входного сигнала. Следовательно, **транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.**

Однако, такая схема усилителя на транзисторе является неэффективной, так как в ней отсутствует усиление сигнала по току, и через источники входного сигнала протекает весь ток эмиттера $I_э$. В реальных схемах усилителей на транзисторах источник переменного напряжения включают так, чтобы через него протекал только небольшой ток базы $I_б = I_э - I_к$. Малые изменения тока базы вызывают значительные изменения тока коллектора. Усиление по току в таких схемах может составлять несколько сотен.

Применение полупроводниковых приборов.

У полупроводников ярко выражена зависимость электропроводимости от температуры: чем выше температура полупроводника, тем лучше он проводит ток. Приборы, основанные на этом эффекте, называются **термосопротивлениями** или **термисторами**. Термисторы нашли огромное применение в технике, медицине и сельском хозяйстве. Они используются для измерения температуры в различных машинах и агрегатах, всюду, где необходимо поддерживать постоянную температуру и связанные с ней физические величины. С помощью термисторов определяют температуру почвы на различной глубине. Чувствительные термисторы можно вводить непосредственно в кровеносный сосуд. Чувствительность этих приборов настолько велика, что на их основе изготавливают приемники лучистой энергии, называемые болометрами.

В настоящее время полупроводниковые приборы находят широкое применение в радиоэлектронике, так как обладают рядом ценных качеств: большим сроком службы, малыми габаритами, высокой механической прочностью и незначительным потреблением энергии.

Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы – диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. – размером в несколько микрометров.

Применение полупроводников совершило революцию в радиотехнике. Радиодетали стали настолько миниатюрными, что появилась возможность изготавливать типографским способом так называемые микромодули. Микромодули представляют собой тонкие листики, на которых отпечатаны диоды, триоды, сопротивления, индукционные катушки и другие элементы радиосхем. Используя различные комбинации микромодулей, можно изготавливать радиоустройства с заранее заданными параметрами.

Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие **микроэлектроники**, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов – сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле.

Микросхема размером в 1 см^2 может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов.

Применение микросхем привело к революционным изменениям во многих областях современной электронной техники. Это особенно ярко проявилось в области электронной вычислительной техники. На смену громоздким ЭВМ, содержащим десятки тысяч электронных ламп и занимавшим целые здания, пришли персональные компьютеры.

Полупроводники приобретают все большее значение, обогащая физику, химию, биологию и другие науки. Исследование полупроводников еще не завершено, и сегодня невозможно в полной мере предсказать развитие физики полупроводников

Литература:

1. Основная:
 - 1.1. Мякишев Г.Я. Физика: Учебник для 10 класса общеобразовательных организаций: базовый уровень/ Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под Н.А. Парфентьевой – 2-е изд. - М: Просвещение, 2016.
 - 1.2. Рымкевич А.П., **“Сборник задач по физике”** – Москва, 2004р.
2. Дополнительная:
 - 1.1. „Естествознание: учебное пособие”. Саенко О.Е., Трушина Т.П., Арутюнян О.В. М.: КНОРУС, 2014.-368с.
 - 1.2. **„Элементарный учебник физики”**; под ред. Г.С. Ландсберга – Москва, 1986р