

Плазма — полностью или частично ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. средние плотности положительных ρ_+ и отрицательных ρ_- зарядов одинаковы по модулю: $\rho_+ = |\rho_-|$



1. Какова природа электрического тока в газах?
2. Как можно увеличить электрическую проводимость газов?
3. Какой разряд называют несамостоятельным?
4. Какой разряд называют самостоятельным?
5. Какие виды самостоятельного разряда вы знаете? Приведите примеры их использования.
6. Что такое плазма? Как её можно получить?



§ 37. Электрический ток в полупроводниках. Собственная и примесная проводимости полупроводников

Полупроводники — широкий класс как неорганических, так и органических веществ в твёрдом или жидком состоянии. Полупроводники обладают многими замечательными свойствами, благодаря которым они нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Каковы особенности строения полупроводников?

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещённости. Удельное сопротивление полупроводников находится в пределах от 10^{-6} до 10^8 Ом·м (при $T = 300$ К), т. е. во много раз меньше, чем у диэлектриков, но существенно больше, чем у металлов. В отличие от проводников удельное сопротивление полупроводников резко убывает при увеличении температуры, а также изменяется при изменении освещения и введении сравнительно небольшого количества примесей. К полупроводникам относят ряд химических элементов (бор, углерод, кремний, германий, фосфор, мышьяк, сурьма, сера, селен, теллур и др.), множество оксидов и сульфидов металлов, а также других химических соединений.

Изучить свойства полупроводников можно на опытах. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, полупроводника и миллиамперметра (рис. 215). Из опыта следует, что

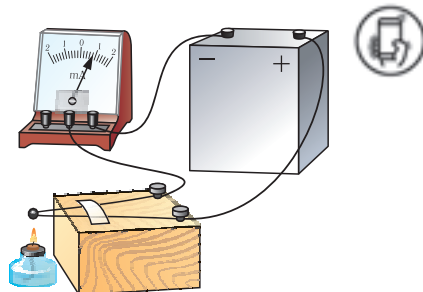


Рис. 215

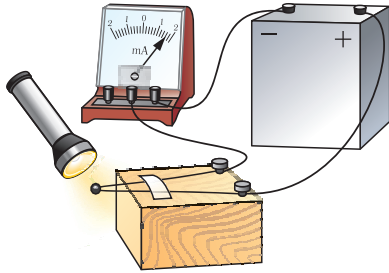


Рис. 216

при нагревании полупроводника сила тока в цепи возрастает. Возрастание силы тока обусловлено тем, что при увеличении температуры сопротивление полупроводника уменьшается.

Проведём ещё один опыт. Изменяя освещённость поверхности полупроводника, наблюдаем изменение показаний миллиамперметра (рис. 216). Результаты наблюдений означают, что при освещении поверхности полупроводника его сопротивление уменьшается.

Таким образом, уменьшить сопротивление полупроводника можно, либо нагревая его, либо воздействуя электромагнитным излучением, например освещая его поверхность.

Природа электрического тока в полупроводниках. Экспериментально установлено, что при прохождении электрического тока в полупроводниках, как и в металлах, никаких химических изменений не происходит, т. е. перенос заряда при прохождении тока не сопровождается переносом вещества. Это свидетельствует о том, что свободными носителями электрического заряда в полупроводниках, как и в металлах, являются электроны.

Рассмотрим механизм проводимости полупроводников на примере кристалла германия Ge, валентность атомов которого равна четырём.

Атомы германия на внешней оболочке имеют четыре сравнительно слабо связанных с ядром валентных электрона. При этом каждый атом кристалла связан с четырьмя соседними атомами ковалентными связями. Два соседних атома объединяют два своих валентных электрона (по одному от каждого атома), которые образуют электронную пару. Поэтому все валентные электроны атома германия участвуют в образовании ковалентных связей. На рисунке 217 изображена плоская схема пространственной решётки кристалла германия. При температуре, близкой к абсолютному нулю, ковалентные связи германия достаточно прочны, поэтому свободные электроны отсутствуют и германий является диэлектриком.

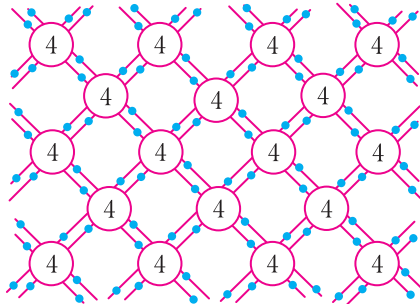


Рис. 217

Для того чтобы разорвать ковалентную связь и сделать электрон свободным, кристаллу германия необходимо сообщить некоторую энергию, например, нагревая кристалл или облучая его поверхность. При этом часть электронов получает энергию, достаточную для того, чтобы покинуть атомы и стать свободными.

Нейтральный атом, которому принадлежал освободившийся электрон, становится положительно заряженным ионом, а в ковалентных связях образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют *дыркой* (рис. 218).

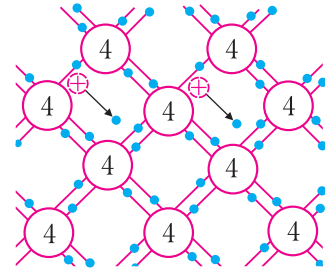


Рис. 218



Интересно знать

Дырочная проводимость в действительности обусловлена «эстафетным» перемещением по вакансиям от одного атома кристалла полупроводника к другому электронов, которые осуществляют ковалентную связь. Дырок как положительных зарядов, существующих реально, в действительности нет. Тем не менее представление о них является хорошей физической моделью, которая даёт возможность рассматривать электрический ток в полупроводниках на основе законов физики.

Дырки считают подвижными носителями положительного заряда, который равен модулю заряда электрона.

При наличии внешнего электрического поля на беспорядочное движение свободных электронов и дырок накладывается их упорядоченное движение, т. е. возникает электрический ток. Причём движение свободных электронов происходит в направлении, противоположном направлению напряжённости \vec{E} внешнего электрического поля, а движение дырок совпадает с направлением напряжённости \vec{E} поля (рис. 219).

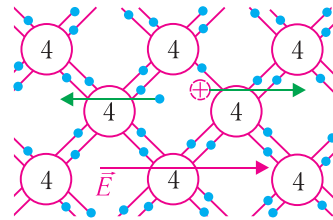


Рис. 219

Проводимость, обусловленную движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике, называют *собственной проводимостью* полупроводника.

Примесная проводимость полупроводников. Изменить свойства полупроводников можно не только нагреванием или воздействием электромагнитного



излучения, но и добавлением в чистый полупроводник примесей. Тогда в полупроводнике наряду с собственной проводимостью возникает примесная проводимость.

Проводимость, обусловленную наличием примесей в полупроводнике, называют *примесной проводимостью* полупроводника.

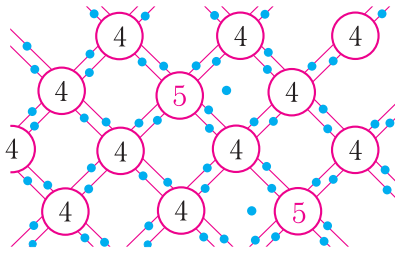


Рис. 220

Рассмотрим механизм этой проводимости на примере кристалла германия Ge, содержащего примесь атомов мышьяка As, валентность которых равна пяти.

Четыре валентных электрона атома мышьяка образуют ковалентные связи с соседними атомами германия (рис. 220). Пятые электроны атомов мышьяка не задействованы в образовании ковалентных связей и могут свободно перемещаться, почти как электроны в металлическом проводнике.

Проводимость такого кристалла будет преимущественно электронной. Дырки, образующиеся в результате разрыва отдельных ковалентных связей между атомами германия, являются неосновными носителями электрического заряда, так как их концентрация мала по сравнению с концентрацией свободных электронов. Такие полупроводники называют *электронными полупроводниками* или *полупроводниками n-типа* (от лат. *negativ* — отрицательный).



Теперь рассмотрим механизм примесной проводимости полупроводника на примере кристалла германия Ge, содержащего примесь атомов индия In, валентность которых равна трём.

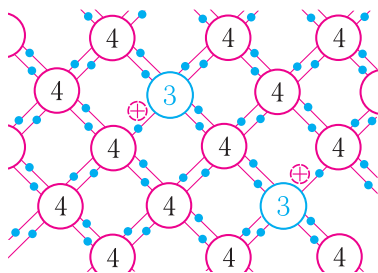


Рис. 221

Валентные электроны атома индия образуют ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия (рис. 221). На образование связи с четвёртым атомом германия у атома индия электрона нет. Поэтому возле каждого атома индия одна из ковалентных связей будет незаполненной, т. е. возникает дырка. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. Но при этом дырка образуется на том месте, где до этого находился электрон.

В результате введения такой примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются дырки. Проводимость такого кристалла будет преимущественно дырочной. Свободные электроны, которые возникают за счёт собственной проводимости полупроводника, являются неосновными носителями электрического заряда, так как их концентрация мала по сравнению с концентрацией дырок. Такие полупроводники называют *дырочными полупроводниками* или *полупроводниками p-типа* (от лат. *positiv* — положительный).



От теории к практике

Какой проводимостью будет обладать германий при введении в него небольшого количества фосфора? галлия? сурьмы?



Техническое применение полупроводников. Приборы, работа которых основана на свойстве полупроводников изменять своё сопротивление при изменении температуры, называют *термисторами* или *терморезисторами*.

Терморезисторы (рис. 222) используют для защиты телефонных станций и линий от токовых перегрузок, для пускозащитных реле компрессоров холодильников, поджига люминесцентных ламп, подогрева дизельного топлива; в различных электронагревательных устройствах: нагревательных решётках тепловентиляторов, сушилках для обуви.

Приборы, работа которых основана на свойстве полупроводников изменять своё сопротивление при изменении освещённости их поверхности, называют *фоторезисторами* или *фотосопротивлениями* (рис. 223). Их используют для регистрации слабых потоков света, при сортировке и счёте готовой продукции, для контроля качества и готовности самых различных деталей; в полиграфической промышленности для обнаружения обрывов бумажной ленты, контроля количества листов бумаги, подаваемых в печатную машину; в медицине, сельском хозяйстве и других областях.

Широкое применение находят полупроводниковые диоды, которые являются основными элементами выпрямителей переменного тока и



Рис. 222

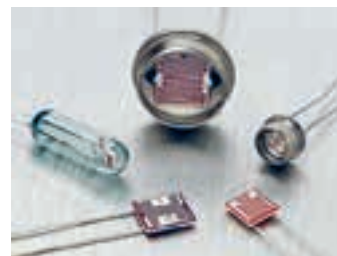


Рис. 223

детекторов электромагнитных сигналов. С помощью полупроводниковых диодов можно осуществить непосредственное превращение энергии электромагнитного излучения в электрическую энергию. Такие диоды называют фотодиодами (рис. 224).

В электрических устройствах (схемах) используют транзистор — прибор, предназначенный для усиления, генерации, преобразования и коммутации сигналов в электрических цепях.

Светоизлучающий диод (светодиод) — это полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию непосредственно в световое излучение. Он представляет собой миниатюрный полупроводниковый диод, помещённый в прозрачный корпус (рис. 225). Используя светодиоды, изготавливают, например, светодиодные светильники (рис. 226).



Рис. 224



Рис. 225



Рис. 226

От теории к практике

1. Для сортировки и счёта деталей широко применяют фоторезисторы. Каким свойством полупроводников можно объяснить действие этого прибора?

2. На рисунке 227 представлены графики зависимости силы тока от напряжения для терморезистора. Какой из графиков соответствует более низкой температуре терморезистора? Определите сопротивление терморезистора при более высокой температуре.

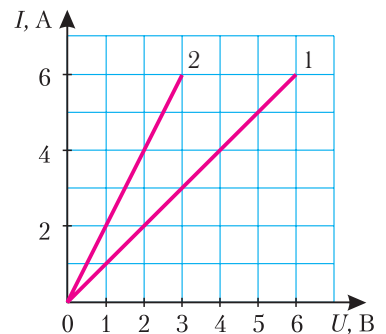


Рис. 227

Из истории физики

В 2000 г. уроженцу Беларуси Жоресу Ивановичу Алфёрову (1930–2019) совместно с американскими учёными Гербертом Кремером и Джеком Килби была присуждена Нобелевская премия по физике за «исследование полупроводниковых гетероструктур, лазерных диодов и сверхбыстрых транзисторов».



Электрический ток в полупроводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов и дырок

Проводимость полупроводника

Собственная: обусловлена движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике

Примесная: обусловлена наличием примесей в полупроводнике

Примеси поставляют свободные электроны без возникновения равного им количества дырок (электронные полупроводники или полупроводники *n*-типа)

Примеси приводят к образованию дырок без увеличения числа свободных электронов (дырочные полупроводники или полупроводники *p*-типа)



1. Каково строение полупроводников (на примере кристалла германия)?
2. Какова природа электрического тока в полупроводниках?
3. Объясните механизм собственной проводимости полупроводников.
4. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры? освещённости?
5. Что называют примесной проводимостью полупроводников?
6. При каком условии в примесном полупроводнике возникает электронная проводимость? Приведите примеры.
7. При каком условии в примесном полупроводнике возникает дырочная проводимость? Приведите примеры.
8. Приведите примеры использования полупроводниковых приборов.

