

## Электрический ток в средах.

*Ток в металлах.*

У атомов металлов небольшое количество валентных электронов, которые довольно легко теряются атомами и становятся общими, коллективными для всего образца. Носителями тока в металлах и являются коллективные электроны. За направление тока принимается направление, противоположное движению коллективных электронов. Зависимость силы тока от напряжения (ВАХ – вольт-амперная характеристика) характеризуется законом Ома. Носители тока участвуют одновременно в тепловом и дрейфовом (во внешнем поле) движениях. Чистые металлы имеют свойство увеличивать сопротивление с ростом температуры:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T); \quad \Delta T = T - T_0,$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление металла при абсолютной температуре  $T_0$ ;  $\rho$  – удельное сопротивление металла при абсолютной температуре  $T$ ;  $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$ ; абсолютная температура измеряется в Кельвинах  $[T] = \text{К}$ ,  $\alpha$  – ТКС – термический коэффициент сопротивления  $[\alpha] = \text{К}^{-1}$ .

Существуют справочные таблицы ТКС материалов.

Линейная температурная зависимость сопротивления металлов нарушается в области очень низких температур. При температуре близкой к 5 К сопротивление металлов резко уменьшается практически до нуля. *Сверхпроводимость* металлов при низких температурах, как и количественное описание движения носителей тока в металлах, объясняется законами квантовой физики.

Сверхпроводники не выделяют тепла. Сверхпроводимость нарушается сильным магнитным полем.

*Ток в жидкостях.*

Жидкости, как и твердые тела, по способности проводить заряды классифицируются на проводники, полупроводники и диэлектрики. ТКС жидких проводников принимает отрицательные значения. Носителями тока в жидких проводниках (растворы или расплавы электролитов: кислот, щелочей, солей) являются положительно и отрицательно заряженные ионы (исключение – ртуть, жидкий металл – электроны). ВАХ жидких проводников нелинейны и различны для разных жидкостей. Ионы образуются в результате *электролитической диссоциации* – реакции распада нейтральных атомов на ионы во внешнем электрическом поле. При контакте разноименных ионов происходит *рекомбинация* – восстановление нейтрального атома. Внешнее поле в жидкостях создается внесением двух электродов (положительно заряженный – анод, отрицательно заряженный – катод). В результате окислительно-восстановительной реакции (электролиз) на электродах выделяется вещество. Отрицательные ионы электролита осаждаются на аноде, положительные ионы электролита осаждаются на катоде. Масса электролита определяется первым законом Фарадея:

$$m = k \cdot I \cdot t,$$

где  $m$  - масса вещества, выделяющегося на электроде  $[m] = \text{кг}$ ;  
 $k$  - электрохимический эквивалент (величина табличная)  $[k] = \text{кг/Кл}$ ;  
 $I$  - сила тока  $[I] = \text{А}$ ;  $t$  - время реакции  $[t] = \text{с}$ .

Электрохимический эквивалент может быть вычислен на основании второго закона Фарадея:

$$k = \frac{m_{\text{иона}}}{q_{\text{иона}}} = \frac{M}{N_A \cdot n \cdot e},$$

$M$  - молярная масса  $[M] = \text{кг/моль}$ ;  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  - постоянная Авогадро;  $n$  - валентность;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - модуль заряда электрона.

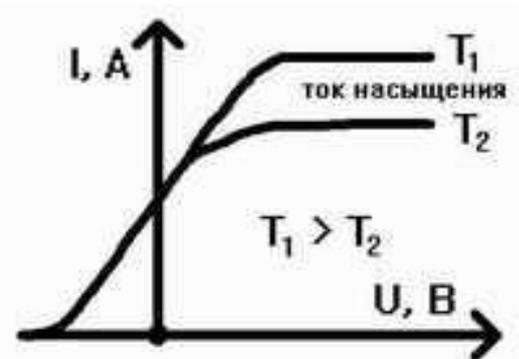
*Ток в вакууме.*

Вакуум - состояние разряженного газа, при котором средняя величина свободного пробега его частиц неограниченно возрастает.

Собственных носителей тока в вакууме нет. Возможно внесение носителей в вакуум извне. Примером накачки носителей в вакуум может являться термоэлектронная эмиссия - испускание электронов с поверхности металлов в нагретом состоянии. ВАХ тока в вакууме нелинейна, зависит от температуры металла, с которого происходит эмиссия электронов. Вакуумная двухэлектродная лампа, имеющая указанную ВАХ и обладающая односторонней проводимостью называется вакуумным диодом. Электроны в диоде разгоняются до скоростей, определяемых формулой:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U,$$

где  $m$  - масса электрона,  $e$  - модуль заряда электрона,  $v$  - скорость электронов,  $U$  - напряжение между катодом и анодом. Существуют многоэлектродные вакуумные лампы, среди которых практическое применение имеет ЭЛТ (электронно-лучевая трубка).



В ЭЛТ используется отклонение электронов электромагнитным полем и свечение люминофорных составов, которыми покрыты экраны трубок, при их бомбардировке электронами. ЭЛТ используются как кинескопы телевизоров, мониторов, осциллографов.

При торможении быстрых электронов возникают жесткие излучения, которые используются в рентгеновской диагностике.

Свойство нагревания тел при попадании на них электронного пучка используется при вакуумной плавке чистых металлов.

Несмотря на существенные недостатки (габариты, механическая хрупкость, высокое рабочее напряжение, недолговечность и дороговизна катодных покрытий) вакуумные приборы по-прежнему находят применение в технике.

#### *Ток в газах.*

Ток в газах называется газовым разрядом. Носителями тока в газах являются ионы и электроны. Ионизация в газах происходит под внешним воздействием (нагревание, излучение и т.д.). После прекращения действия ионизатора, газы восстанавливают электрическую нейтральность (происходит рекомбинация). Разряд, прекращающийся после прекращения

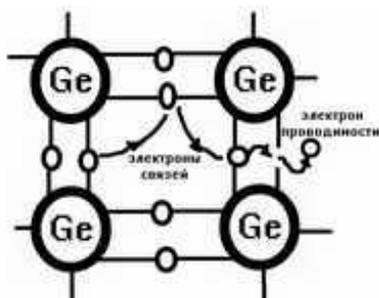


ионизации, называется несамостоятельным. Если разряд не прекращается после прекращения действия ионизатора, то он считается самостоятельным. Причиной возникновения самостоятельного разряда является ударная ионизация (электронная лавина) и эмиссия электронов при бомбардировке

катода положительными ионами. Выделяют четыре типа самостоятельного разряда: тлеющий, дуговой, коронный, искровой.

Отношение числа ионизированных частиц к общему числу частиц газа называется *степенью ионизации*. Высокоионизированный газ с одинаковой плотностью положительных и отрицательных частиц называется **плазмой**. Выделяют высокотемпературную (термическую) и низкотемпературную (ударную) плазму. Частицы плазмы чрезвычайно подвижны, проводимость плазмы увеличивается с ростом степени ионизации. Плазму используют для сварки и резки (плазмотрон). Изучение свойств плазмы и способов ее удержания в лабораторных условиях осуществляется в магнитогидродинамических генераторах (токамак). В состоянии плазмы находится 99% вещества Вселенной.

#### *Ток в полупроводниках.*



Полупроводник – вещество, при низких температурах являющееся диэлектриком, а при высоких температурах – проводником. Чистые полупроводники относятся в основном к IV группе периодической системы химических элементов, пример: Ge, Si. Атомы связаны ковалентно (см. рис.). При повышении температуры некоторые электроны покидают траектории в связях, образуются электроны проводимости. Место некомпенсированного положительного заряда, оставшееся после выхода электрона из связи, называется *дыркой*. На это место перейдет электрон из соседней связи. Будет выглядеть, как будто дырка перемещается по образцу, хотя и не является частицей. Перемещение электронов связей называется

рекомбинацией. Таким образом, собственная проводимость чистого полупроводника является электронно-дырочной.

Величина собственной проводимости невелика, для повышения проводимости в чистый полупроводник вносят примеси.

Внесение в чистый полупроводник 5-ти валентной примеси (например: As) приведет к образованию дополнительных электронов проводимости. Такие примеси называются *донорными*, преобладающая проводимость - электронная, дырки являются не основными носителями. Полупроводник обозначается как негативный (n-типа).

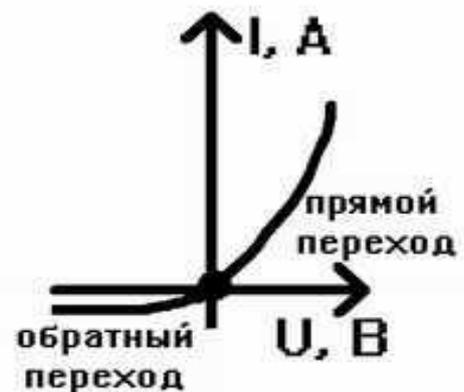
Внесение в чистый полупроводник 3-х валентной примеси (например: In) приведет к образованию дополнительных дырок. Такие примеси называются *акцепторными*, преобладающая проводимость - дырочная, электроны являются не основными носителями. Полупроводник обозначается как позитивный (p-типа).

Контакт двух полупроводников с разным типом проводимости называется p-n переходом.

При включении во внешнюю цепь, так что полупроводник n-типа запитывается отрицательно, а полупроводник p-типа запитывается положительно, образуется прямой p-n переход. Ток прямого p-n перехода велик, так как он обусловлен движением основных носителей тока через зону перехода (см. рис.).

При включении во внешнюю цепь, так что полупроводник n-типа запитывается положительно, а полупроводник p-типа запитывается

отрицательно, образуется обратный p-n переход. Ток обратного p-n



перехода мал, так как он обусловлен движением не основных носителей тока через зону перехода (см. рис.).

Полупроводниковый **диод** – двухэлектродное устройство с одним p-n переходом, обладающее односторонней проводимостью и имеющее указанную выше ВАХ, обладает низким рабочим напряжением и компактностью по сравнению с вакуумным аналогом. Недостатком полупроводниковых приборов является неустойчивость к перепадам температуры, световым и механическим воздействиям.

Широкое применение на практике как усилители по току (или напряжению) находят трехэлектродные полупроводниковые приборы – **транзисторы**.

*Биполярный транзистор* – полупроводниковый триод с двумя p-n переходами (возможны два типа структуры: p-n-p и n-p-n). Электрод прямого перехода называется эмиттер, электрод обратного перехода – коллектор, центральная часть структуры, представляющая собой тончайшую (доля микрон) область для беспрепятственной диффузии носителей тока, называется базой.

*Рабочее состояние транзистора, как усилителя по напряжению:*  
Под действием внешнего поля основные носители тока эмиттера переходят в базу, где очень малая их часть рекомбинирует с основными носителями тока базы. Подавляющая же часть основных носителей тока эмиттера достигают коллекторного перехода. С высокоомной нагрузки в коллекторной цепи можно снимать напряжения, значительно превышающие напряжения эмиттерной (питающей) цепи.

*Рабочее состояние транзистора, как усилителя по току:*

Пополнение основных носителей в базе, происходящее по базовому электроду, вызывает усиление коллекторного тока, поскольку большая часть основных носителей тока эмиттера диффундирует сквозь базу, образуя ток коллекторного перехода. Коэффициент усиления по току:

$$h = \frac{I_{\text{коллектора}}}{I_{\text{базы}}} .$$

ВАХ транзисторов нелинейна. Транзисторы классифицируются по мощности (мощные  $h > 100$  и маломощные). Также транзисторы классифицируются по рабочим частотам (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные).

На практике активно используют полупроводниковые приборы с зависимостью сопротивления от температуры (терморезисторы) и с зависимостью сопротивления от освещенности (фоторезисторы). Данные устройства применяются как электронные реле и управляющие элементы.

Широчайшее применение имеют компактные многоэлектродные полупроводниковые устройства, содержащие большое число элементов (резисторов, конденсаторов и т.д.) в одном корпусе – интегральные схемы. По количеству элементов классифицируются на ИС (интегральные схемы – десятки элементов), БИС (большие интегральные схемы – сотни элементов), СБИС (сверхбольшие интегральные схемы – тысячи элементов). СБИС – основа электронных чипов и процессоров ЭВМ.

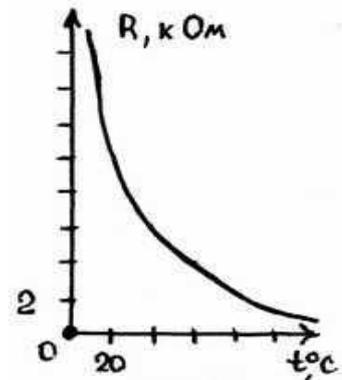
## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### "Ток в металлах."

1. Определить напряженность электрического поля в медном проводе, если плотность тока в нем  $5 \text{ А/мм}^2$ . (Плотностью тока называют отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника.)
2. Алюминиевая проволока при  $0^\circ\text{C}$  имеет сопротивление  $4,25 \text{ Ом}$ . Каково сопротивление этой проволоки при  $200^\circ\text{C}$ ? ТКС алюминия  $0,004 \text{ К}^{-1}$ .
3. На цоколе лампы накаливания с вольфрамовой нитью написано " $120 \text{ В}, 500 \text{ Вт}$ ". Если через эту лампу пропустить ток  $8 \text{ мА}$ , то падение напряжения на ней составит  $20 \text{ мВ}$ ; при этом нить накала практически не нагревается и ее температура  $20^\circ\text{C}$ . Какова температура нити в рабочем состоянии, если ТКС вольфрама  $0,0048 \text{ К}^{-1}$ ?

### "Ток в полупроводниках."

4. Вследствие нагревания сопротивление полупроводника уменьшилось на  $20\%$ . Как в связи с этим изменился ток в нем?
5. На рисунке приведена температурная характеристика термистора. При постоянном напряжении питания термистора  $18 \text{ В}$ , сила тока, проходящего через него в некоторый момент времени, равнялась  $10 \text{ мА}$ , затем  $5 \text{ мА}$ , затем  $2 \text{ мА}$ . Как изменялась температура среды, в которой находился термистор?
6. Последовательная схема, состоящая из фоторезистора и шунта (добавочного сопротивления), питается от напряжения  $30 \text{ В}$ . Фоторезистор осветили, и его сопротивление уменьшилось в  $4$  раза,



а ток схемы изменился с 1 мА до 2 мА. Найдите сопротивление шунта.

*"Ток в вакууме."*

7. Ток насыщения вакуумного диода 50 мА. Сколько электронов вылетает с поверхности катода каждую секунду?

8. В вакуумном диоде электроны ускоряются до энергии 100 эВ. Какова их минимальная скорость у анода?

9. Электрон влетает со скоростью 60000 км/с в плоский конденсатор параллельно его пластинам. Расстояние между пластинами 1 см, длина конденсатора 5 см, разность потенциалов на пластинах 600 В. Найти отклонение электрона сразу за пластинами конденсатора.

*"Ток в жидкостях."*

10. За какое время при электролизе воды выделится 1 г водорода, если сила тока равна 1 А? Сколько за это время выделится кислорода?

11. Никелирование с помощью электролиза металлической пластинки, имеющей площадь поверхности  $48 \text{ см}^2$ , продолжалось 4 часа при силе тока 150 мА. Найдите толщину слоя никеля, если он в данном электролите двухвалентен. Плотность никеля равна  $8,9 \text{ г/см}^3$ .

12. В ванне для никелирования за 2 ч на пластине площадью  $100 \text{ см}^2$  образовалась пленка никеля толщиной 20 мкм. Валентность никеля 2. При какой силе тока проводился электролиз? Плотность никеля  $8,8 \text{ г/см}^3$ ; молярная масса никеля 59 г/моль.

*"Ток в газах."*

13. Какой скорости должны достигать электроны к моменту соударения с молекулами азота, чтобы началась ударная ионизация

азота? Потенциал ионизации молекул азота составляет 14,5 В.

14. Какой должна быть напряженность электрического поля, чтобы при длине свободного пробега 0,5 мкм электрон смог ионизировать атом газа с энергией ионизации 15 эВ?

15. В сухом воздухе при нормальных условиях происходит образование ионов и возникают искровые разряды в присутствии электрического поля с напряженностью более 1 МВ/м. Определить величину электрического заряда, который может быть накоплен на уединенной проводящей сфере радиуса 1 см, находящейся в сухом воздухе.