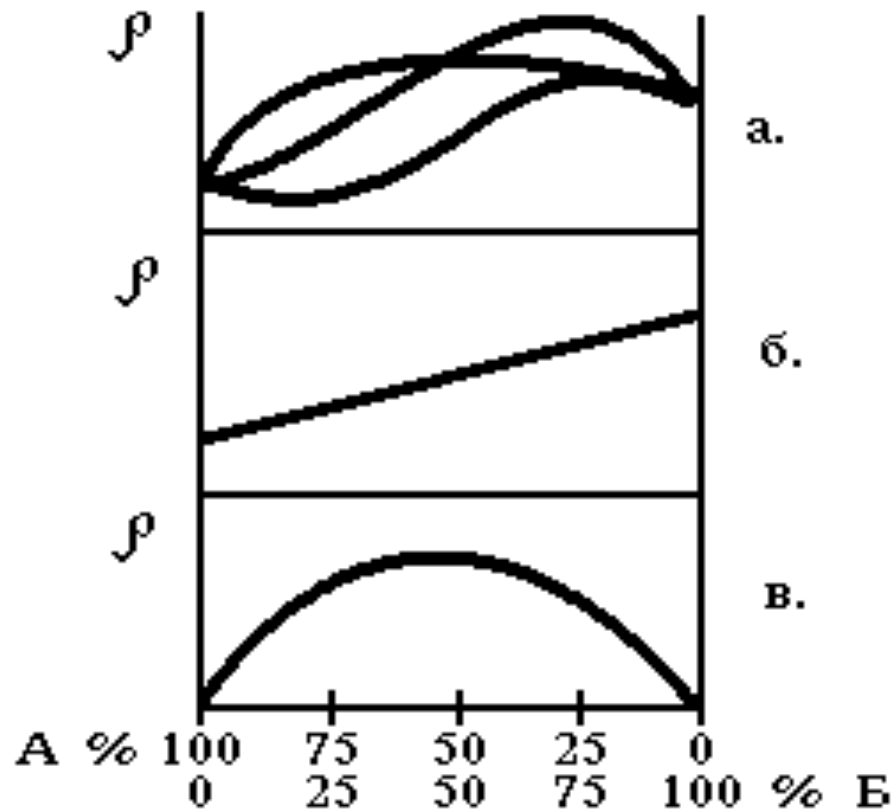


# **Электрические характеристики сплавов**

- Металлические сплавы обычно представляют *механическую смесь* исходных металлов, *твердый раствор* или *химические (интерметаллические) соединения*. Зависимость удельного сопротивления для двойных сплавов в относительных единицах в функции от процентного содержания компонентов показаны на рисунке :
- а - различные варианты систем непрерывных твердых растворов металлов А и Б;
- б - механическая смесь двух металлов;
- в - правило Курнакова Нордгейма для остаточного сопротивления изоэлектронных металлов (принадлежащих к одной группе периодической системы).

# Зависимость удельного сопротивления сплавов от соотношения компонентов



# Полупроводники

- *Полупроводники* при комнатной температуре занимают по удельному сопротивлению, имеющему значения  $10^{-6} - 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , промежуточное положение между металлами и диэлектриками. По ширине запрещенной зоны к полупроводникам относят вещества, ширина запрещенной зоны которых лежит в диапазоне **0.1 - 3.0 эВ**.
- Приведенные данные следует считать ориентировочными, так как они относятся к нормальным условиям, но могут сильно отличаться в зависимости от температуры.
- Удельная проводимость полупроводников в сильной степени зависит от вида и количества содержащихся в них примесей и дефектов. Для них характерна чувствительность к свету, электрическому и магнитному полю, радиационному воздействию, давлению и др.

# Основные параметры полупроводников

- Из электрофизических параметров важнейшими являются: *удельная электрическая проводимость* (или величина обратная ей - *удельное электрическое сопротивление*), *концентрация электронов и дырок*, *температурные коэффициенты удельного сопротивления*, *ширина запрещенной зоны*, *энергия активации примесей*, *работы выхода*, *коэффициента диффузии носителей заряда* и другие. Для некоторых применений важны *коэффициент термо-ЭДС* и *коэффициент термоэлектрического эффекта*, *коэффициент Холла* и т.п.

- К фундаментальным параметрам относятся *плотность,*
- *постоянная кристаллической решетки,*
- *коэффициент теплопроводности,*
- *температура плавления и др.*

- **Бинарные соединения** - соединения  $A_3B_5$  классифицируют по металлоидному элементу. Различают *нитриды, фосфиды и антимониды*. Особое место среди них занимает *арсенид галлия*, отличающийся большой шириной запрещенной зоны (**1.4 эВ**) и высокой подвижностью электронов (**0.85 м<sup>2</sup>/(в · с)**). Он используется для изготовления приборов, работающих при высоких температурах и высоких частотах, для *инжекционных лазеров, светодиодов, туннельных диодов, диодов Ганна, транзисторов, солнечных батарей* и других приборов. Широко применяются *антимонид индия, фосфид галлия, антимонид галлия*.

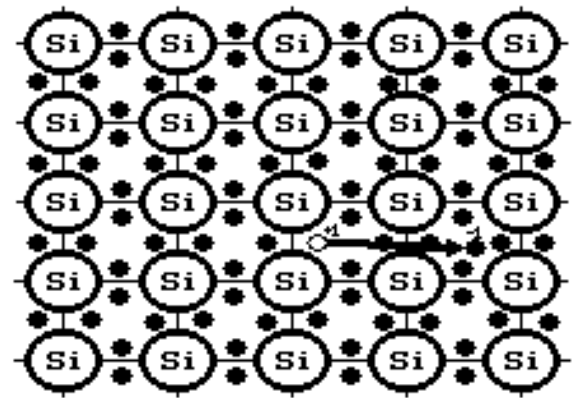
- Соединения  $A_2B_6$ , к которым относятся халькогениды цинка, кадмия, ртути, сульфиды, селениды, теллуриды применяются для изготовления фоторезисторов, высоковольтных датчиков Холла, в инфракрасной технике, для создания промышленных люминофоров и другие.



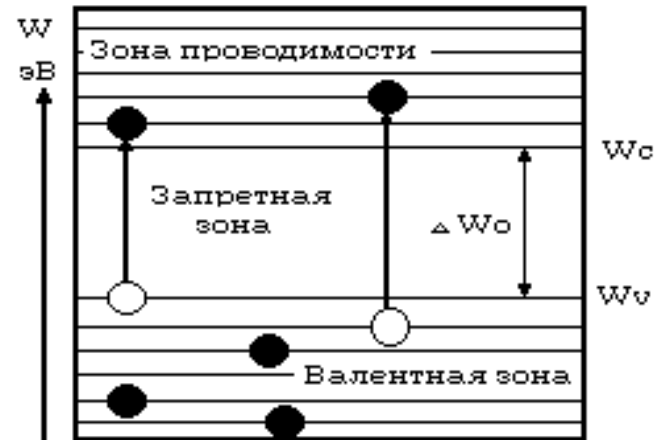
# Собственные и примесные полупроводники, типы носителей заряда. Собственная проводимость

- Свободными носителями заряда в полупроводниках как правило, являются *электроны*, возникающие в результате ионизации атомов самого полупроводника (*собственная проводимость*) или атома примеси (*примесная проводимость*). В некоторых полупроводниках носителями заряда могут быть *ионы*. На рисунке показана атомная модель кремния и энергетическая диаграмма собственного полупроводника, в котором происходит процесс генерации носителей заряда.

- Атомная модель кремния



- При абсолютном нуле зона проводимости пустая, как у диэлектриков, а уровни валентной зоны полностью заполнены. Под действием избыточной энергии  $W_0$ , появляющейся за счет температуры, облучения, сильных электрических полей и т.д., некоторая часть электронов валентной зоны переходит в зону проводимости. Энергия  $W_0$  в случае беспримесного полупроводника, равна ширине запрещенной зоны и называется *энергией активации*. В валентной зоне остается свободное энергетическое состояние, называемое *дыркой*, имеющей единичный положительный заряд.



- Для собственного полупроводника концентрация носителей определяется шириной запрещенной зоны и значением температуры по уравнению Больцмана

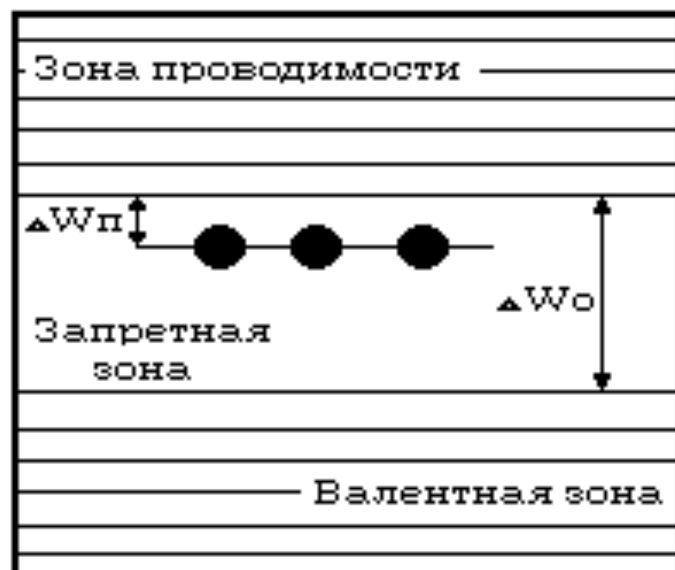
$$n = \text{const} \cdot \exp(-\Delta W_0 / 2kT)$$

- $0 < kT, \Delta W_0$  ,  $1/\text{м}^3$  ,

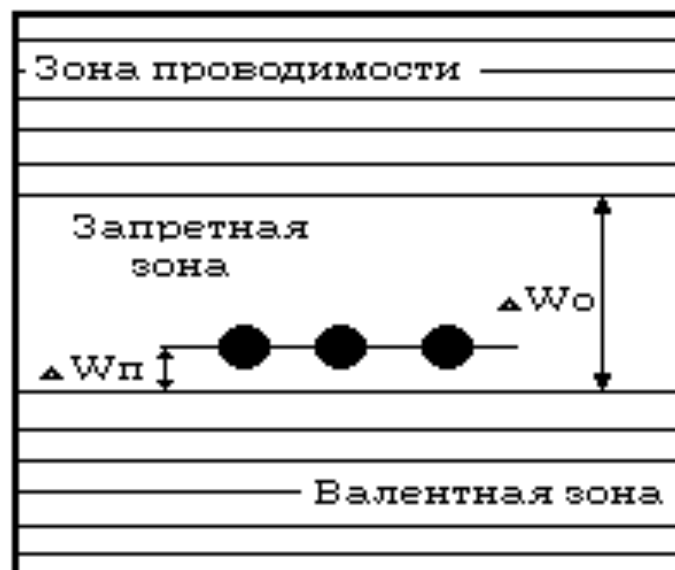
- то есть при переброс через запрещенную зону возможен. В собственном полупроводнике концентрация электронов  $n_i$  равна концентрации дырок  $p_i$  , . Подвижность носителей заряда представляет скорость, приобретаемую свободными электронами или ионами в электрическом поле единичной напряженности  $u = v/E$

- ,  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

- *Примесная проводимость.* Поставка электронов в зону проводимости и дырок в валентную зону может быть за счет примесей, которые могут ионизоваться уже при низкой температуре. Энергия их активации значительно меньше энергии, необходимой для ионизации основных атомов вещества. Примеси, поставляющие электроны в зону проводимости, занимают уровни в запретной зоне вблизи дна зоны проводимости. Они называются *донорными*. Примеси, захватывающие электроны из зоны проводимости, располагаются на уровнях в запретной зоне вблизи потолка валентной зоны и называются *акцепторными*.



Энергетическая диаграмма полупроводника, содержащего донорные примеси



Энергетическая диаграмма полупроводника, содержащего акцепторные примеси

- Примеси с энергией являются оптимальными. Их относят к «мелким» примесям. Мелкие уровни определяют электропроводность полупроводников в диапазоне температур **200-400 К**, «глубокие» примеси ионизируются при повышенных температурах. Глубокие примеси, влияя на процессы рекомбинации, определяют фотоэлектрические свойства полупроводников. С помощью глубоких примесей можно компенсировать мелкие.

# Зависимость подвижности носителей заряда от температуры

- Подвижность носителей заряда в полупроводниках зависит от температуры, так как тепловое хаотическое колебание частиц мешает упорядоченному движению. Основные причины, влияющие на температурную зависимость подвижности это *рассеяние* на:
  - тепловых колебаниях атомов или ионов кристаллической решетки;
  - на атомах или ионах примесей;
  - на дефектах решетки (пустых узлах, искажениях, связанных с внедрением иновалентных ионов, дислокациями, трещинами и т.д.).



- При низких температурах преобладает рассеяние на примесях и подвижность изменяется согласно выражению
- $\mu = a \cdot T^{3/2}$  ,
- где  $a$  - параметр полупроводника.

# Зависимость концентрации носителей заряда от температуры

- Для *собственного* полупроводника концентрация свободных носителей заряда в зависимости от температуры определяется выражением:
- ,  $n = A \cdot \exp(-\Delta W_0/2kT)$
- где  $n$  - концентрация носителей заряда;  
- ширина запрещенной зоны;  $k$  - постоянная Больцмана;  $A$  - константа, зависящая от температуры.

- Для *примесных* полупроводников:
- ,  $n_1 = B \cdot \exp(\Delta \cdot W_n / 2kT)$
- где  $\Delta W_n$  - энергия ионизации примеси; B - константа, не зависящая от температуры.

# Зависимость удельной проводимости от температуры

- Характер этой зависимости в полулогарифмических координатах показан на рисунке . В области собственной проводимости удельная проводимость полупроводника зависит от температуры согласно выражению:

- $$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-\Delta W_0 / 2kT}$$

- В области примесной электропроводности удельная проводимость определяется выражением:

- $$\gamma_n = \gamma_1 \cdot e^{-\Delta W_n / 2kT}$$

# Время жизни носителей заряда и диффузионная длина

- В каждом полупроводнике носители имеют некоторое среднее время жизни, так как генерируемые носители заряда могут рекомбинировать, встречаясь между собой и с различными дефектами решетки. характеризует время жизни неосновных (и неравновесных) носителей заряда, появляющихся, например, при воздействии на образец светом (условие равновесия) характеризует равновесные носители заряда при данной температуре. Время жизни определяется по формуле:

- $\tau = \frac{S}{V_T}$
- где  $V_T$  — тепловая скорость носителей заряда,  $S$  — сечение захвата,  $n_0$  — концентрация ловушек.

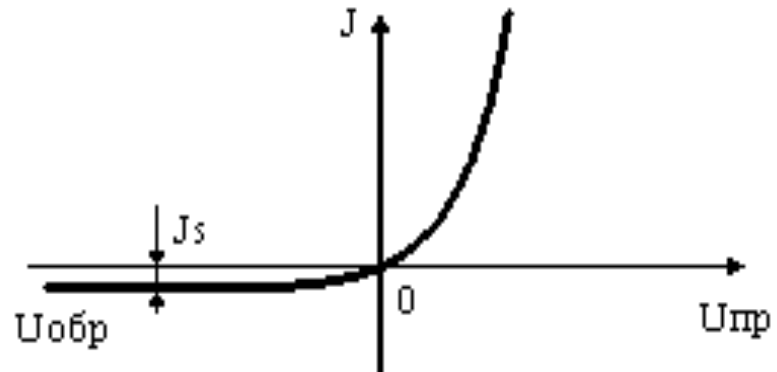
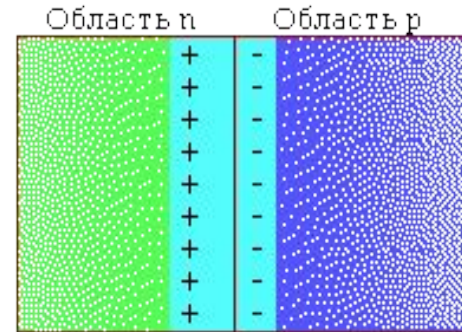
- Значения  $\tau_n$  и  $\tau_p$  могут находиться в зависимости от типа полупроводника, носителей, температуры и других факторов в диапазоне от  $10^{-16}$  до  $10^{-2}$  с.

# Основные эффекты в полупроводниках и их применение

- С точки зрения применения в электротехнике к важнейшим относятся *эффекты выпрямления,*
- *усиления (транзисторный эффект),*
- *Холла,*
- *Ганна,*
- *фотоэлектрический,*
- *термоэлектрический.*

# Электронно-дырочный p-n переход.

- Выпрямительными свойствами обладает лишь p-n переход и контакт полупроводника с другими металлами. p-n переход представляет собой границу, отделяющую друг от друга области с дырочной и электронной проводимостью в примесном полупроводнике. Переход должен быть непрерывным. На рисунке показан нерезкий p-n переход для разомкнутой цепи.



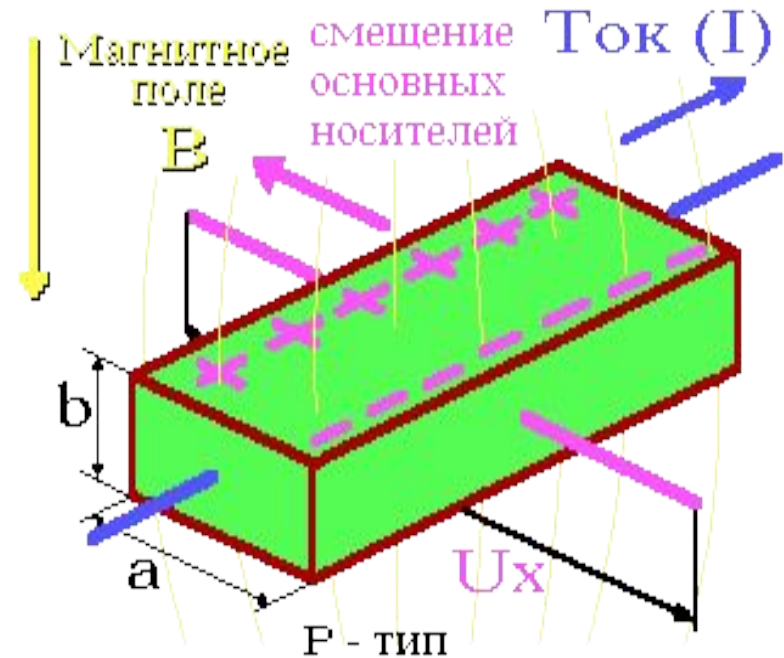


- В цепи с переменным электрическим полем **p-n** переход работает как выпрямитель. На рисунке показана вольтамперная характеристика **p-n** перехода, которая описывается выражением
- $J = J_s \cdot (e^{qU/kT} - 1)$
- где  $J_s$  - ток насыщения (при обратном включении **p-n** перехода этот ток равен обратному току); **U** - приложенное напряжение. При комнатной температуре

$$q/kT = 40 \text{ В}^{-1}$$

# Эффект Холла

- *Эффект Холла* заключается в возникновении ЭДС Холла на гранях полупроводникового бруска с током, помещенного в магнитное поле. Величина ЭДС Холла определяется векторным произведением тока и магнитной индукции. На рисунке изображен случай дырочного полупроводника. Знак ЭДС Холла легко определить по правилу левой руки. Отогнув в сторону большой палец, найдем направление смещения основных носителей заряда для данного типа полупроводника.



- Рассчитывается ЭДС Холла по формуле:
- $U_x = R_x \cdot (I \cdot B/b)$
- где  $R_x$  - постоянная Холла  $R_x = - A/(n \cdot q)$  - для n-полупроводника  $R_x = - B/(p \cdot q)$  - для p-полупроводника, n и p концентрации электронов и дырок); A и B - коэффициенты, значения которых от **0.5** до **2.0** для различных образцов. В сильных полях или для вырожденных полупроводников **A=B=1.0**. Для монокристаллических образцов с совершенной структурой  $A=B=1$

.

- Наиболее часто датчики Холла изготавливают на основе *селенида и теллурида ртути* ( $HgTe, HgSe$ ), *антимонида индия* ( $InSb$ ) и других полупроводниковых материалов в виде тонких пленок или пластинок. С их помощью возможно измерение магнитной индукции или напряженности магнитного поля, силы тока и мощности, а при подведении к контактам переменных напряжений - и преобразование сигналов. По измерению ЭДС Холла можно определить знак носителей заряда, рассчитать их концентрацию и подвижность.

# Эффект Ганна

- **Эффект Ганна** - относится к эффектам сильного поля и заключается в появлении *высокочастотных колебаний электрического тока* при воздействии на полупроводник электрического поля высокой напряженности. Впервые этот эффект наблюдался на арсениде галлия **GaAs** и **фосфиде индия InP**. На основе этого эффекта разработаны приборы, генерирующие в диапазоне частот до сотен гигагерц.

# Фотоэлектрический эффект

- При облучении полупроводников светом в них можно возбудить проводимость. Фототок с энергией  $\nu$  большей или равной ширине запрещенной зоны переводит электроны из валентной зоны в зону проводимости. Образующаяся при этом пара электрон-дырка является свободной и участвует в создании проводимости.

- На рисунке показана схема образования фотоносителей в собственном, донорном и акцепторном полупроводниках.

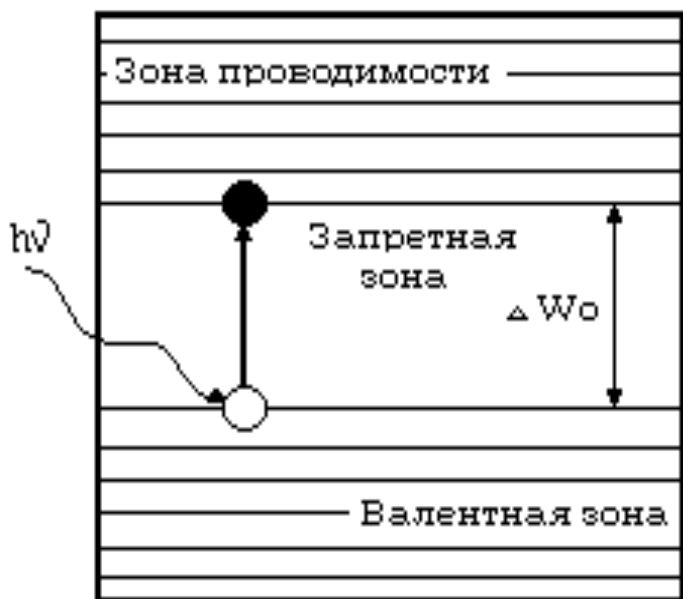


Схема образования фотосистемы в собственном полупроводнике

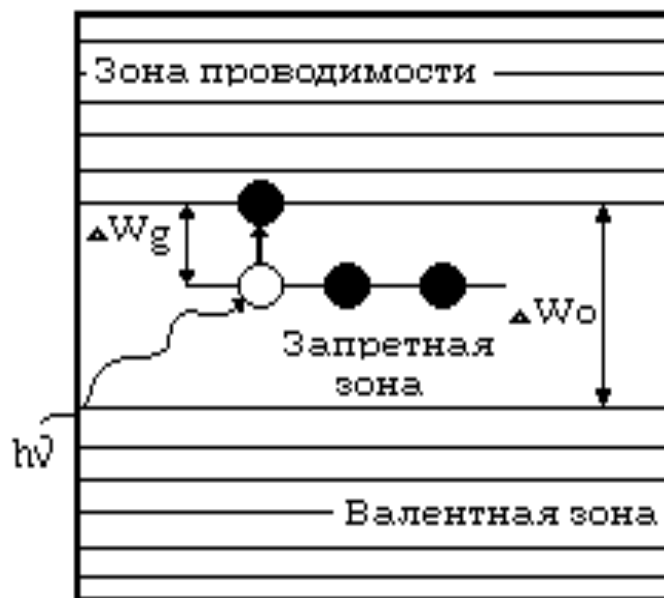


Схема образования фотосистемы в донорном полупроводнике

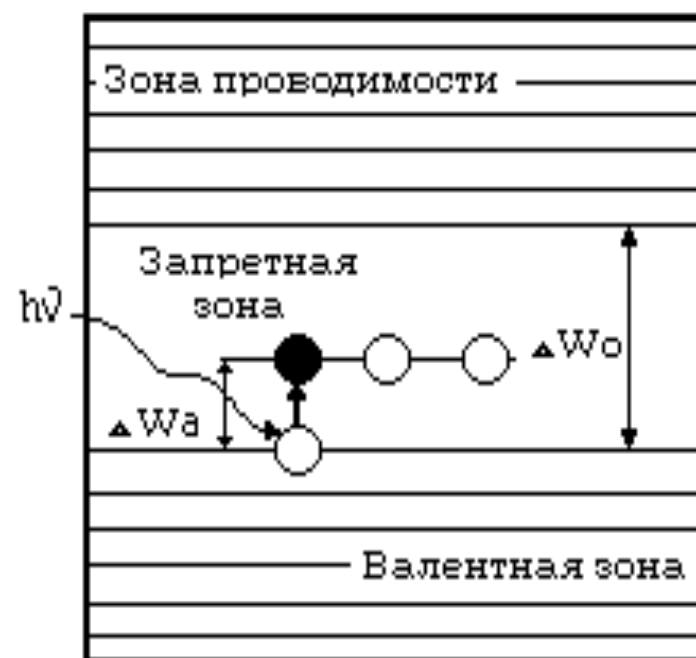


Схема образования фотосистемы  
в акцепторном полупроводнике



Таким образом, если  $h\nu < \Delta W_0$  - для собственных полупроводников,  $h\nu < \Delta W_n$  - для примесных полупроводников, то появляются добавочные носители тока и проводимость повышается. Эта добавочная проводимость называется фотопроводимостью. Основная проводимость, обусловленная тепловым возбуждением носителей тока называется темновой проводимостью. Из приведенных формул можно определить минимальную частоту  $\nu_0$  или максимальную длину волны  $\lambda_0$ , при которой свет возбуждает фотопроводимость  $\rho_0 = c \cdot h / \Delta W_0$  и  $\rho_0 = c \cdot h / \Delta W_n$ .

- Наиболее чувствительные фотосопротивления изготавливаются из **сернистого кадмия (CdS)** и **сернистого свинца (PbS)**. Используются и другие полупроводниковые материалы. Единственным материалом для интегральных датчиков является кремний.
- Полупроводники используются, в том числе, и в *оптоэлектронных устройствах: светодиодах, лазерах, фотодетекторах (датчиках), солнечных батареях, фильтрах.*

# *Термо-ЭДС*

- *Термо-ЭДС* в полупроводниках, как и в металлах возникает под действием разности температуры. Основой преобразователей тепловой энергии в электрическую являются термоэлементы, составленные из последовательно включенных полупроводников *p* и *n*-типов. Большая
- термо-ЭДС полупроводников позволяет использовать их в качестве эффективных преобразователей тепловой энергии в электрическую.

