

# **Элементная база электронных устройств**

# Современные электронные устройства разрабатываются на основе полупроводниковых материалов (ППМ)

ППМ – это широкий класс материалов с удельным сопротивлением  $\rho = 10^8 - 10^{-6}$  Ом\*м. Наиболее распространенными являются кремний Si и германий Ge. По своим электрическим свойствам ППМ занимают промежуточное место - между **проводниками** и **диэлектриками**.

**Медь** (проводник):  $\rho = 17 \cdot 10^{-9}$  Ом·м;

**Кремний** (полупроводник):  $\rho = 2 \cdot 10^3$  Ом·м.

**Полиэтилен** (диэлектрик):  $\rho = 10^{15}$  Ом·м;

Электропроводность **ППМ**: зависит от **температуры**, **концентрации примесей**, **воздействия светового и ионизирующего излучений**.

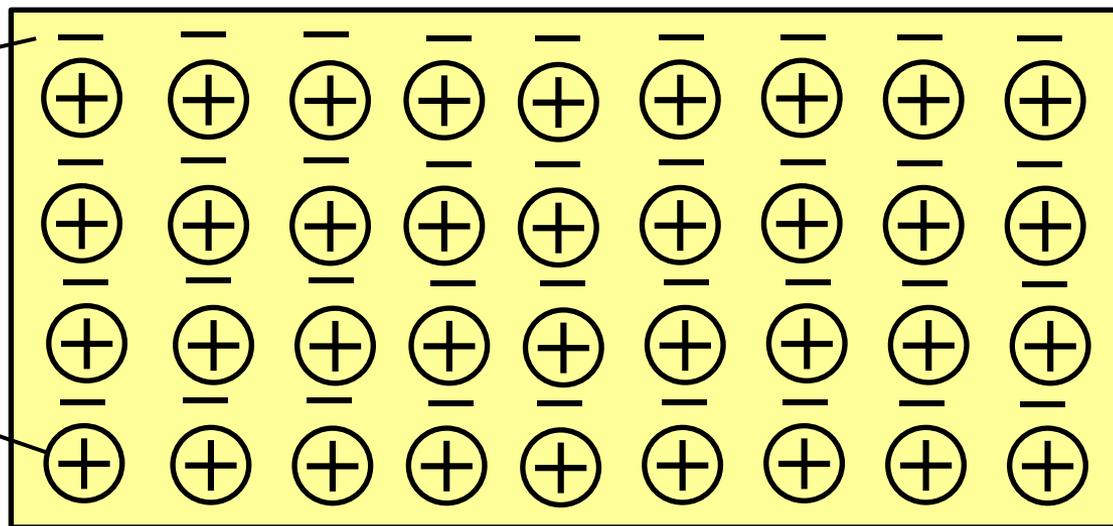
## Примесные полупроводники

При добавлении в четырехвалентный полупроводник (Si) пятивалентного элемента (фосфор P) в структуре примесного полупроводника появляются свободные электроны, при этом атомы фосфора становятся неподвижными положительными ионами.

Такой полупроводник называют полупроводником с электронной проводимостью или полупроводником **n-типа**.

Свободный электрон

Неподвижный ион



## Примесные полупроводники

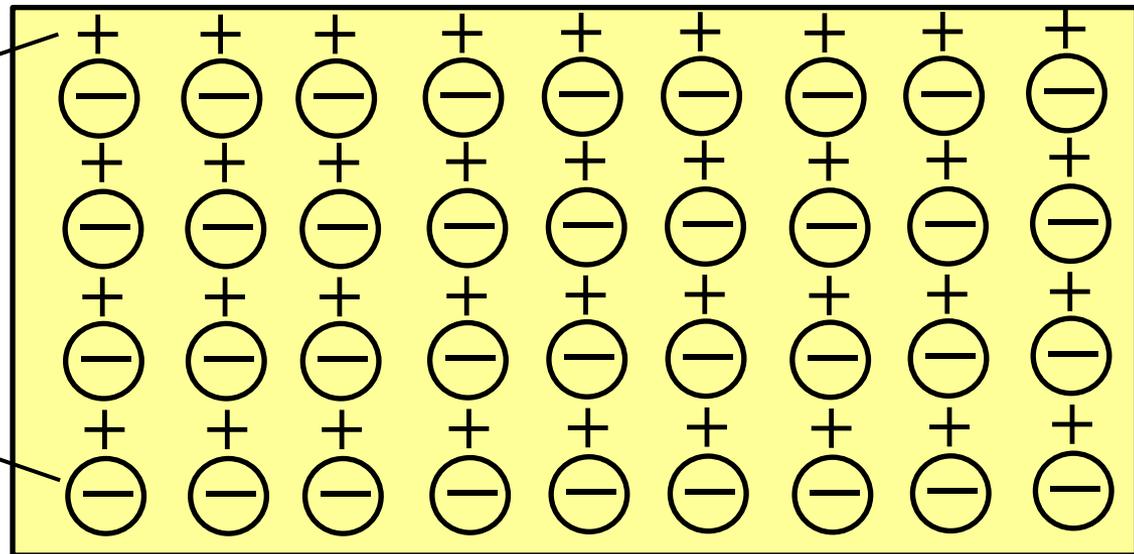
При добавлении в четырехвалентный полупроводник (Si) трехвалентного элемента (индий In) в структуре примесного полупроводника образуются положительные подвижные заряды - «дырки», при этом атомы индия становятся неподвижными отрицательными ионами.

Такой полупроводник называют полупроводником с дырочной проводимостью или полупроводником

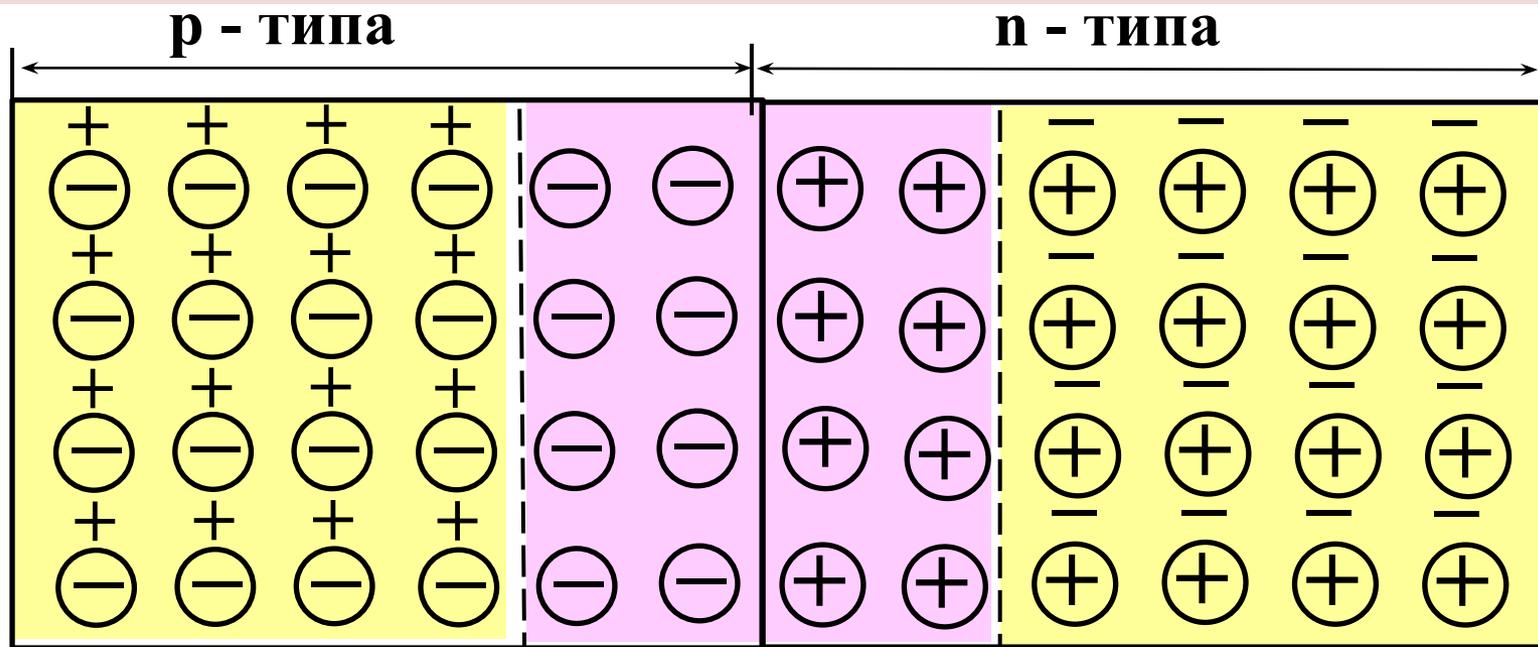
**р-типа.**

Свободная  
дырка

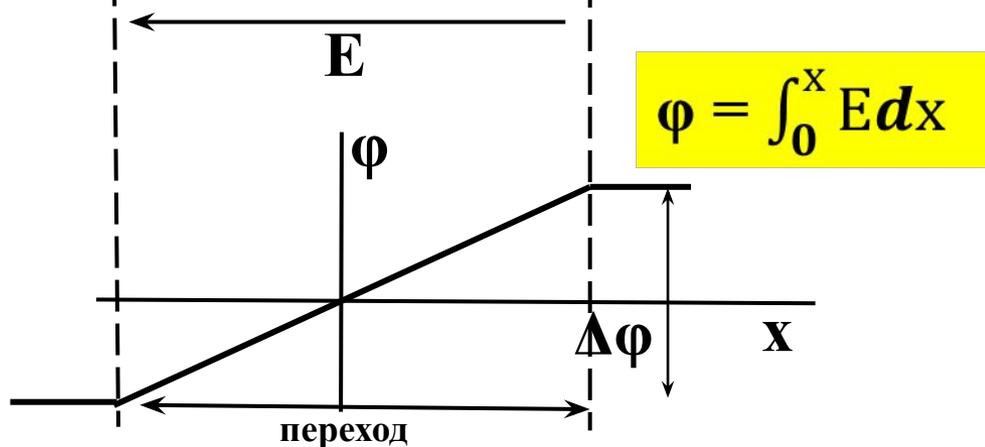
Неподвижный  
ион



# Контактные явления на границе полупроводников p и n типа

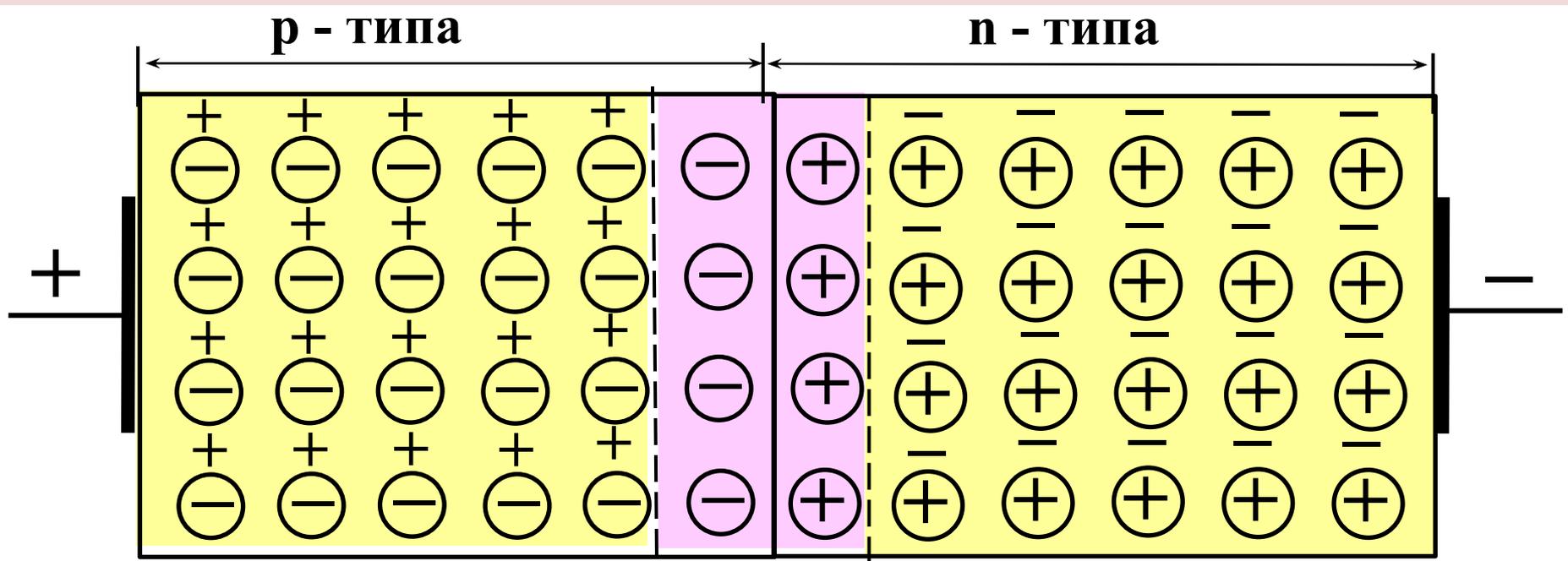


При соединении полупроводников **p** и **n** типов часть дырок диффундирует из **p** области в **n** область, а электронов из **n** в **p** область.

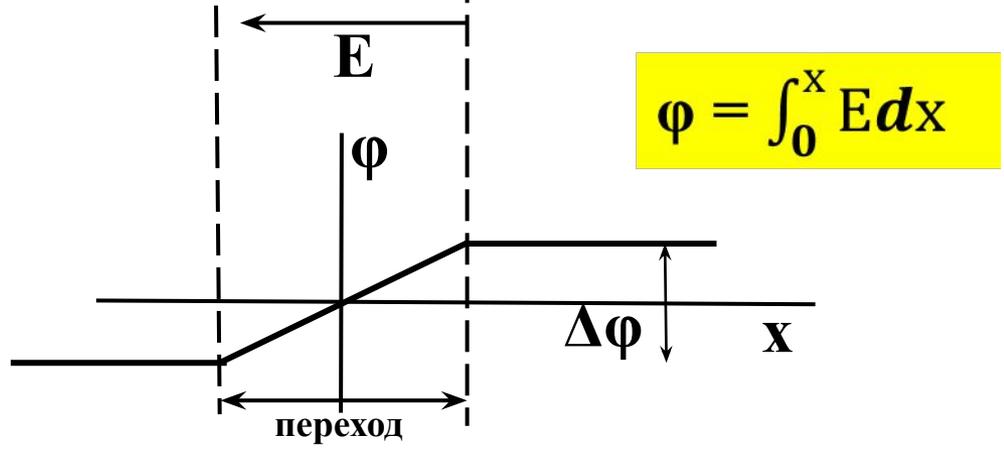


Вдоль границы раздела двух полупроводников возникли слои неподвижных отрицательных и положительных ионов. Возникшее между этими слоями поле ( $E$ ) препятствует дальнейшей диффузии дырок и электронов. При некотором значении  $E$  ток через переход прекращается.

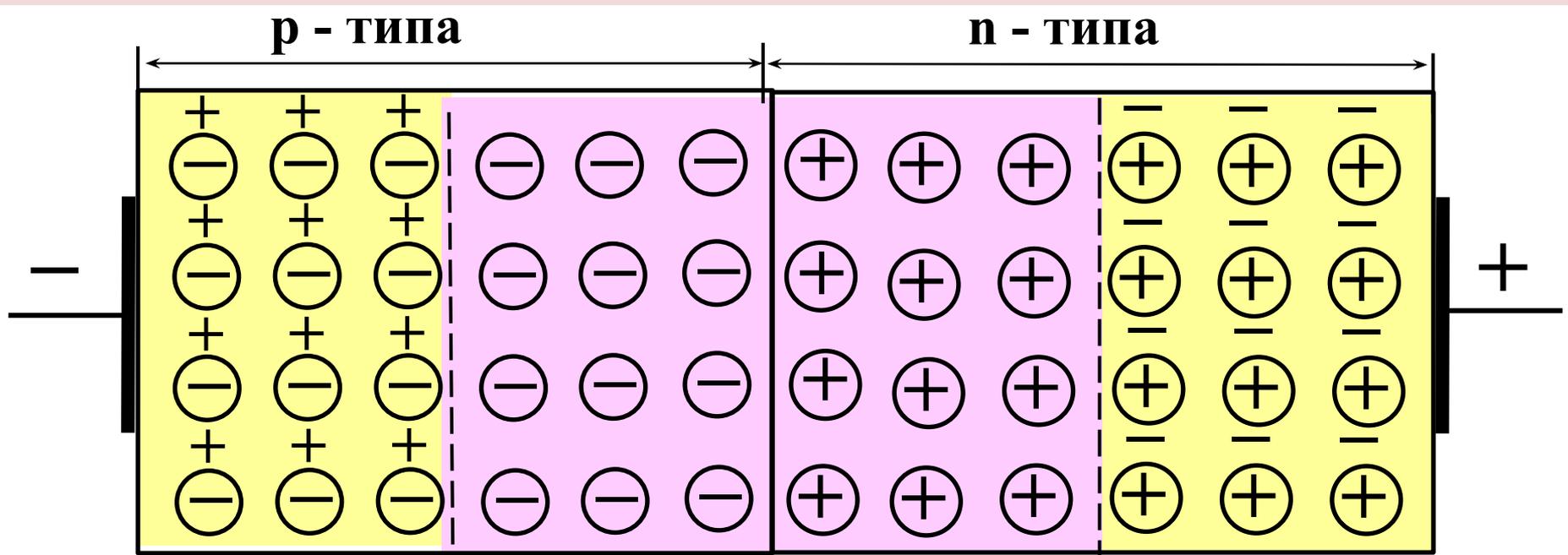
# р-п переход под воздействием внешнего напряжения



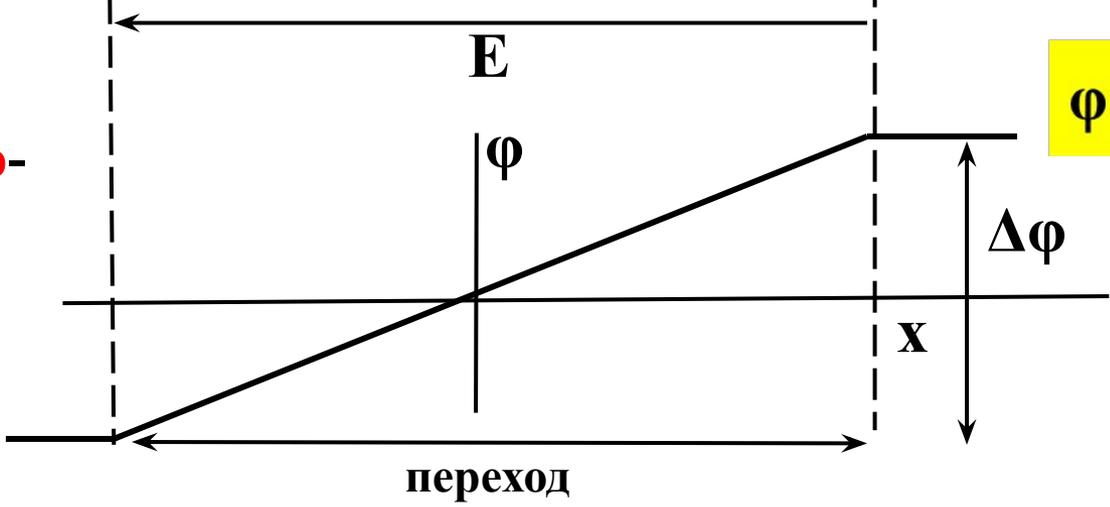
При подаче положительного напряжения (+ к р-области, - к n области) высота потенциального барьера  $\Delta\phi$  уменьшается и через переход протекает ток – прямой ток перехода.



# **p-n** переход под воздействием внешнего напряжения



При подаче отрицательного напряжения (- к **p**-области, + к **n**-области) высота потенциального барьера  $\Delta\phi$  увеличивается, ток через переход очень мал – обратный ток.

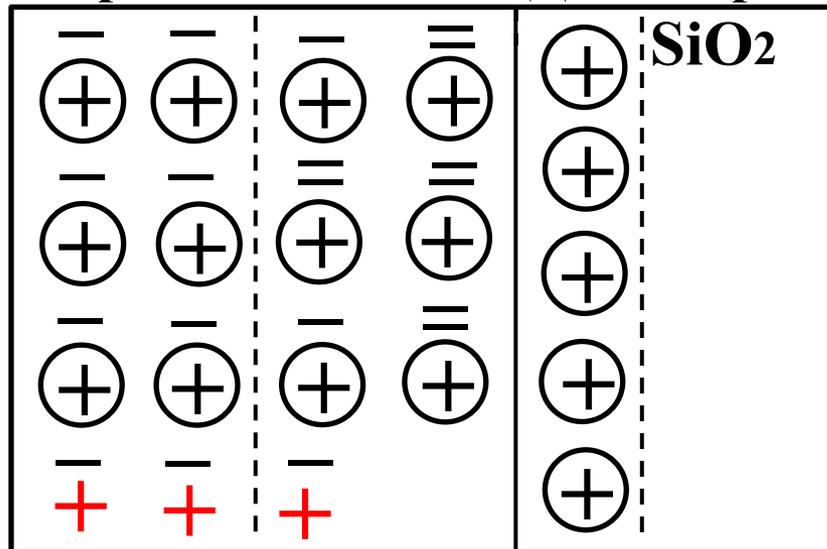


$$\phi = \int_0^x E dx$$

**Вывод:** **p-n** переход имеет одностороннюю проводимость (проводит ток в одном направлении и не проводит в другом).

# Контактные явления на границе полупроводника и диэлектрика

П/проводник n типа | Диэлектрик



← E  
Обогащенный  
слой

Потенциалы выхода электронов:

$$\phi_{\text{Si}(n)} = 4,8 \text{ В}; \quad \phi_{\text{SiO}_2} = 4,4 \text{ В}$$

Так как потенциал выхода электронов из диэлектрика меньше, чем у п/проводника ( $\phi_{\text{Si}(n)} > \phi_{\text{SiO}_2}$ ), то часть электронов из диэлектрика переходит в полупроводник. Поэтому приграничный слой диэлектрика заряжается положительно, а у **n**-п/проводника – отрицательно.

Возникающее при этом поле напряженностью E, препятствует этому процессу, приводя его в равновесие. Под действием этого электрического поля в приграничном слое **n**-п/проводника образуется обогащенный носителями слой

# Контактные явления на границе полупроводника и диэлектрика

П/проводник **p**-типа

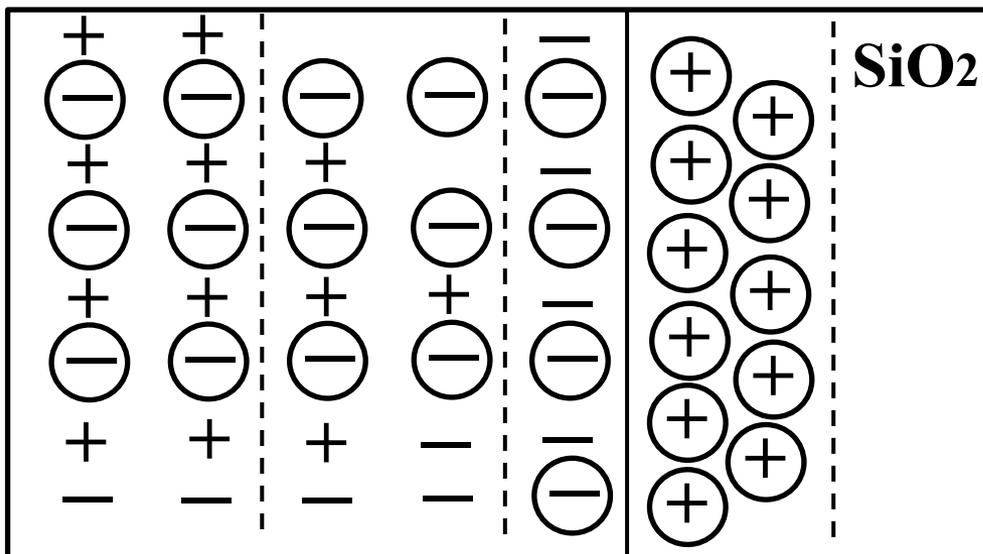
Диэлектрик

Потенциалы выхода электронов:

$$\phi_{\text{Si(p)}} = 4,8 \text{ В}; \quad \phi_{\text{SiO}_2} = 4,4 \text{ В}$$

Так как потенциал выхода электронов из диэлектрика меньше, чем у п/проводника ( $\phi_{\text{Si(n)}} > \phi_{\text{SiO}_2}$ ), то часть электронов из диэлектрика переходит в полупроводник.

Приграничный слой у диэлектрика заряжается положительно, а у **p**-полупроводника – отрицательно.

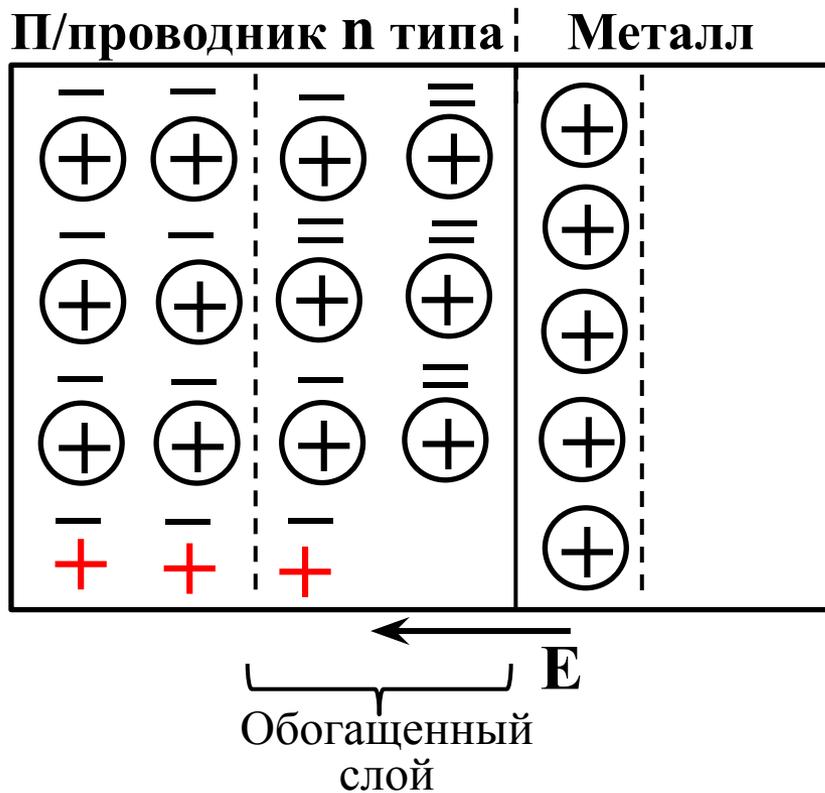


Обедненный слой      Инверсный слой

Для полупроводника **p**-типа это означает смену типа проводимости в приграничной области, т.е. образование **инверсного слоя**.

Далее следует обедненный носителями слой из-за рекомбинации значительной части дырок (основных носителей) с электронами, поступившими из диэлектрика.

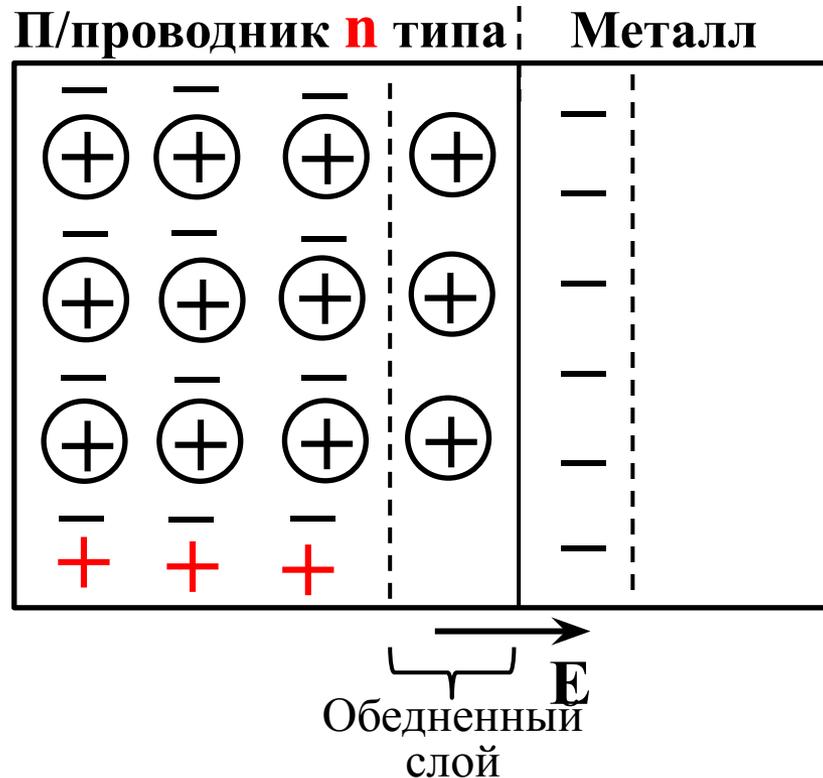
# Контактные явления на границе полупроводника и металла



Если потенциал выхода для металла  $\phi_M$  меньше потенциала выхода для полупроводника n-типа  $\phi_{Si(n)}$  ( $\phi_{Si(n)} > \phi_M$ ), то происходит преимущественный переход электронов из металла в полупроводник, в приграничной области которого возникает обогащенный слой.

Такой контакт проводит ток в обоих направлениях и используется для создания выводов полупроводниковых приборов

# Контактные явления на границе полупроводника и металла



Если потенциал выхода для металла  $\phi_m$  больше потенциала выхода для полупроводника **n**-типа  $\phi_{Si(n)}$ , то у границы раздела в металле образуется слой с отрицательным зарядом, а в полупроводнике – обедненный слой с положительным зарядом.

Такой контакт обладает односторонней проводимостью переходы такого типа называют барьерами Шоттки. по имени автора исследовавшего их ученого.

# **Полупроводниковые диоды**

# Полупроводниковые диоды (ПД)

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор, использующий свойство односторонней проводимости **p-n** перехода.

## Классификация ПД

*По используемому полупроводниковому материалу*

Кремниевые

Германиевые

Арсенидгалиевые

*По технологии изготовления*

Точечные

Плоскостные

Диффузионные

*По принципу действия*

Диоды Шоттки

Туннельные

Излучающие

Фотодиоды

*По назначению*

Выпрямительные

Импульсные

Стабилитроны

Варикапы

# Кремниевые диоды

- **Особенности конструкции**

На каждой стороне диода имплантируются примеси (бор на стороне анода, мышьяк или фосфор на стороне катода), а соединение, где встречаются примеси - «р-n-переход».

Кремниевые диоды имеют прямое смещение напряжения 0.7В.

- **Параметры работы**

Как только разность напряжений между анодом и катодом достигает 0.7 В, диод начнет проводить электрический ток через его р-n-переход.

Когда разность напряжений падает менее 0.7 В, р-n-соединение прекратит проводить электрический ток, и диод перестанет функционировать как электрический путь.

# Германиевые диоды

- Германиевые диоды изготавливаются аналогично кремниевым диодам. В германиевых диодах также используется р-n-переход и имплантируются те же примеси, которые имплантируются в кремниевые диоды.
- Однако германиевые диоды имеют напряжение смещения 0.3 вольта.

# Арсенидгаллиевые диоды

**Отличаются** в несколько раз меньшими массогабаритными показателями, так как позволяют работать из-за повышенной ширины запрещенной зоны при температурах перехода до +240... +280 °С.

- Столь высокие допустимые значения температуры перехода обеспечивают также выигрыш в массе радиоэлектронных устройств за счет уменьшения теплорассеивающих элементов.

**Преимущества** арсенида галлия по сравнению с кремнием

- большая подвижность носителей заряда, что позволяет использовать диоды в диапазоне частот преобразования 100...500 кГц. Переключая импульсные токи до 500 А
- .В настоящее время промышленностью выпускаются арсенидгаллиевые диоды на импульсное обратное напряжение 100...600 В, средний прямой ток до 50 А, импульсное прямое напряжение до 2,5 В с временем обратного восстановления до 0,5 мкс.

# Точечный диод

## Особенности конструкции

- полупроводниковый диод с очень малой площадью р-n перехода, который образуется в результате контакта тонкой металлической иглы с нанесенной на неё примесью и полупроводниковой пластинки с определенным типом проводимости. Благодаря малой площади р-n перехода, и как следствие маленькой ёмкости перехода, точечный диод обычно имеет предельную частоту около 300—600 МГц.
- **Недостатки** механическая прочность, невысокий максимальный ток и чувствительность к перегрузкам, обусловленные малой площадью р-n перехода.

# Плоскостные диоды

## Особенности конструкции

- имеют плоский электрический переход, линейные размеры которого, определяющие его площадь, значительно больше ширины р-n-перехода. Площадь может составлять от сотых долей квадратных миллиметров (микроплоскостные диоды) до нескольких десятков квадратных сантиметров (силовые диоды). Переход выполняют в основном методами сплавления.
- **Используются** для работы на частотах до 10 кГц. Ограничение по частоте связано с большой барьерной емкостью р-n-перехода (до десятков пикофард). Плоскостные диоды бывают малой мощности (до 1 Вт), средней мощности (на токи до 1 А, напряжение до 600 В) и мощные (на токи до 2000 А).

# Диффузионные диоды

## Особенности конструкции

- Переход создается посредством диффузии примеси, находящейся в газообразной, жидкой или твердой фазах, в полупроводниковую пластину. Если диффузия примеси проводится через отверстия (окна) в защитном слое, нанесенном на поверхности полупроводника, то получают так называемый планарный р/п переход.
- Диффузионные диоды отличаются от сплавных меньшей собственной емкостью и малым значением постоянной времени

# диоды Шоттки

## Особенности конструкции

- в отличие от обычных диодов на основе p-n перехода, используется переход металл-полупроводник, который ещё называют барьером Шоттки. Этот барьер, так же, как и полупроводниковый p-n переход, обладает свойством односторонней электропроводимости и рядом отличительных свойств.
- В качестве материала для изготовления диодов с барьером Шоттки используется кремний (Si) и арсенид галлия (GaAs), а также такие металлы как золото, серебро, платина, палладий и вольфрам.

## Характеристики

малое прямое падение напряжения (0,2-0,4 В) на переходе и высокое быстродействие. Максимальное обратное напряжение обычно до 250В .

## Недостатки

при кратковременном превышении обратного напряжения они мгновенно выходят из строя и главное необратимо. В то время как кремниевые силовые вентили после прекращения действия превышенного напряжения прекрасно самовосстанавливаются и продолжают работать. Кроме того обратный ток диодов очень

# Туннельный диод

## Особенности конструкции

- В материале диода имеются присадки в гораздо большем объеме, нежели в обычном диоде, а его P-N переход очень узкий и хорошо проводит ток в обе стороны. Потенциал, который необходим для того, чтобы заставить туннельный диод выступать в роли проводника, будь то в режиме прямого или обратного смещения, очень невелик, обычно этот потенциал находится в диапазоне милливольт. Именно поэтому туннельные диоды известны как приборы с низким сопротивлением.
- В обычных условиях туннельные диоды работают в области своего отрицательного сопротивления. В данной области незначительное уменьшение напряжения включает этот прибор, а небольшое повышение — выключает его. В качестве такого своеобразного выключателя туннельный диод может использоваться либо как генератор, либо как высокоскоростной выключатель.
- Могут также использоваться в качестве усилителей, где изменения в подаваемом напряжении в сторону повышения, вызывают пропорционально более значительные изменения тока в цепи.

# Излучающий диод

- работающий в видимом диапазоне волн, часто называют светоизлучающим, или светодиоидом.
- Излучение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области p-n-перехода и в областях, примыкающих к указанной области. При рекомбинации излучаются фотоны. Для излучающих диодов, работающих в видимом диапазоне (длина волны от 0,38 до 0,78 мкм, частота около, но меньше  $10^{15}$  Гц), Для излучающих диодов, работающих не в видимом диапазоне, используют характеристики, отражающие зависимость мощности излучения  $P$  от тока диода  $i$

# ФОТОДИОДЫ

**Принцип работы** основан на воздействии оптического излучения. В результате, материал изменяет свои качества, что позволяет ему выполнять различные функции в электрических цепях.

Простой фотодиод является обыкновенным полупроводниковым диодом с р-п-переходом, на который оказывает действие оптическое излучение. При полном отсутствии светового потока, диод находится в состоянии равновесия и обладает обычными свойствами.

Действие излучения направлено на р-п-переход. Энергия, с которой поглощаются фотоны, превышает ширину запрещенной зоны, что приводит к возникновению электронно-дырочных пар. Данные пары, состоящие из электронов и дырок, получили наименование фотоносителей

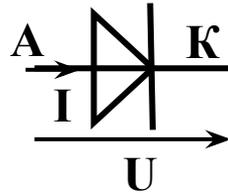
# Выпрямительные диоды

Это диоды, использующие одностороннюю проводимость р-п перехода и применяются в выпрямителях.

Обозначение на схемах:

Анод - А

Катод - К

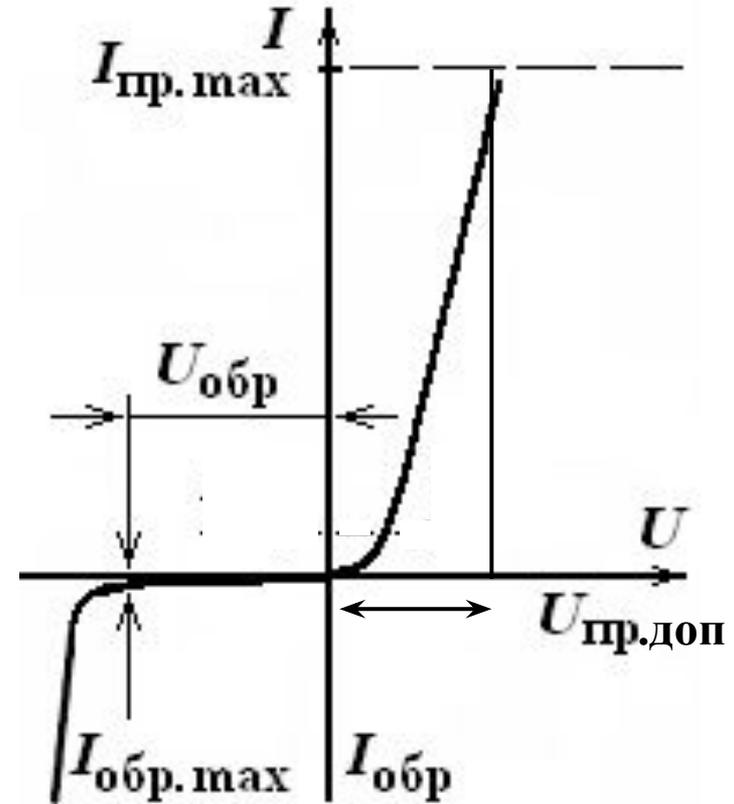


Параметры:

Допустимый прямой ток  $I_{\text{пр.мах}}$  и соответствующее ему прямое напряжение  $U_{\text{пр.доп}}$  (0,5 В для Ge, 1,5 В для Si)

Допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр}}$  (100...400В у Ge и 1000...1500 В для Si) соответствующий ему обратный ток  $I_{\text{обр.мах}}$

Допустимая мощность рассеяния  $P_{\text{рас.}}$   
Допустимая температура окружающей среды (до 50°С для Ge и до 150°С для Si)



Вольтамперная характеристика диода

# Классификация выпрямительных диодов

*По мощности*

Маломощные ( $I_{пр} \leq 0,3 \text{ А}$ )

Средней мощности ( $0,3 < I_{пр} < 10 \text{ А}$ )

Большой мощности ( $I_{пр} > 10 \text{ А}$ )

*По частоте*

Низкочастотные ( $f_{max} < 10^3 \text{ Гц}$ )

Высокочастотные ( $f_{max} > 10^3 \text{ Гц}$ )

## Внешний вид выпрямительных диодов



# Импульсные диоды

**Характеристика:** диод имеющий малую длительность переходных процессов и являющийся составной частью импульсной схемы, работающей на высокой частоте. Для данных целей наиболее подходят диоды с оптимизированными собственными ёмкостью и временем, требующимся на то, чтобы обратное сопротивление восстановилось. Достижение необходимого показателя происходит:

по первому параметру при уменьшении длины и ширины p-n — перехода, это соответственно сказывается и на уменьшении допустимых мощностей рассеивания.

по второму параметру при использовании сильно легитированных полупроводниковых элементов (например, легитация кремниевых пластины используется золото).

Величина барьерной ёмкости меньше 1пФ.

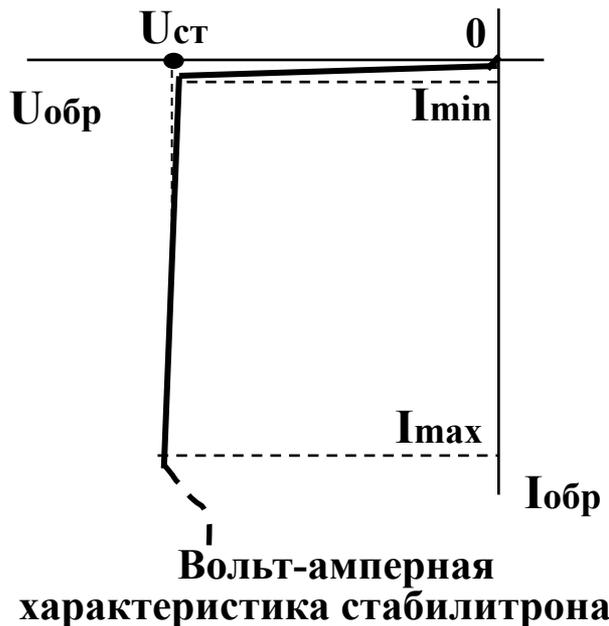
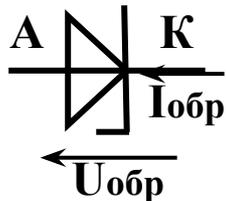
**Область применения,** с помощью импульсных диодов можно сконструировать электронный ключ, генератор, модулятор и

# Стабилитроны

Это диоды (опорные диоды), предназначенные для стабилизации постоянного напряжения.

В стабилитроне используется явление неразрушающего электрического пробоя (лавинного пробоя) р-n перехода при определенных значениях обратного напряжения  $U_{обр} = U_{проб} = U_{ст}$ .

Обозначение на схемах



На участке пробоя при незначительном изменении напряжения ток изменяется в широких пределах ( $I_{min} \div I_{max}$ ).

Основные параметры:

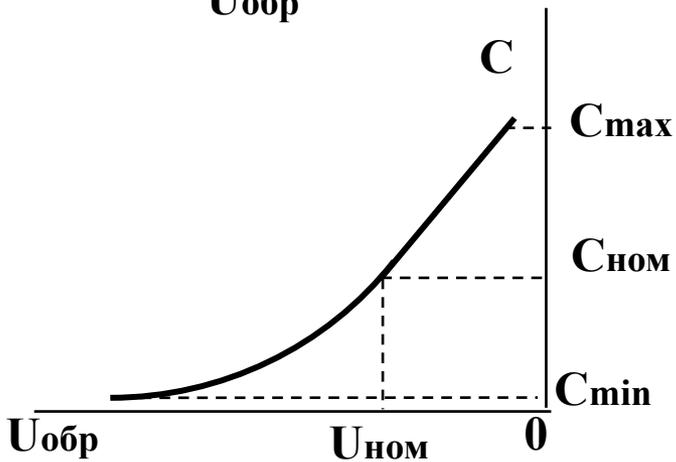
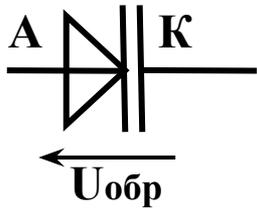
1.  $U_{ст}$  – напряжение стабилизации (единицы, десятки вольт).
2.  $I_{min}$ ,  $I_{max}$  – минимальный и максимальный ток стабилизации.
3.  $P_{max}$  - максимально допустимая рассеиваемая мощность.
4.  $TKH = \Delta U / (U_{ст} \Delta T)$  – температурный коэффициент напряжения стабилизации ( $\Delta U$  – отклонение напряжения стабилизации от номинального при изменении температуры в интервале  $\Delta T$ )

# Варикапы

Это диоды, в которых используется емкостные свойства обратного смещенного р-п перехода.

При изменении напряжения на стабилитроне изменяется емкость р-п перехода, что позволяет использовать его в качестве элемента с электрически управляемой емкостью..

Обозначение на схемах



Вольт-фарадная характеристика варикапа

Основные параметры:

1. **C<sub>ном</sub>** – номинальная емкость варикапа при номинальном смещении
2. **C<sub>min</sub>** – минимальная емкость варикапа при заданном минимальном смещении
3. **C<sub>max</sub>** – максимальная емкость варикапа при заданном максимальном смещении
4. **K<sub>T</sub>** – температурный коэффициент емкости – это относительное изменение емкости варикапа для заданного смещения при изменении температуры окружающей среды на 1 градус в заданном интервале температур