

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**.

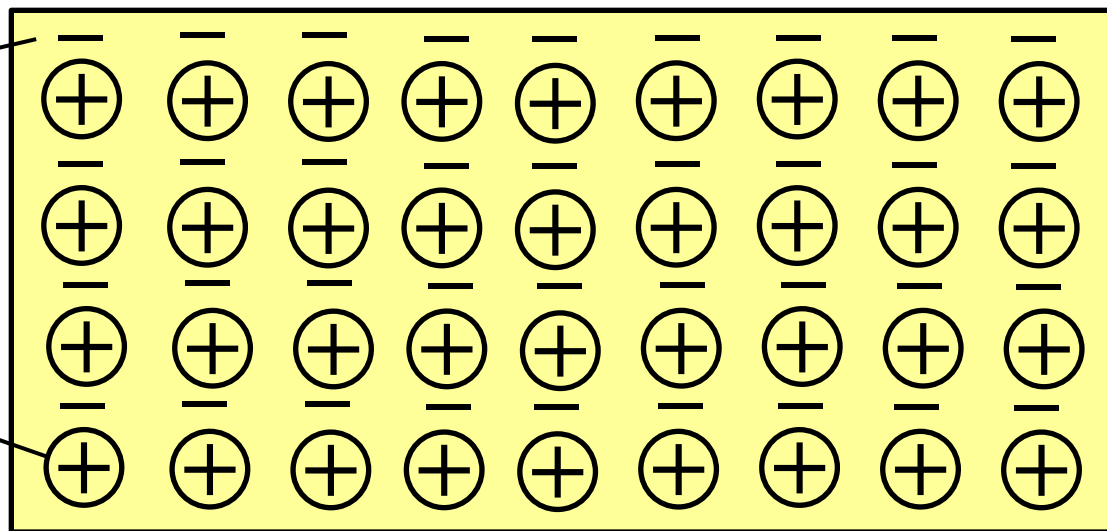
Примесные полупроводники

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

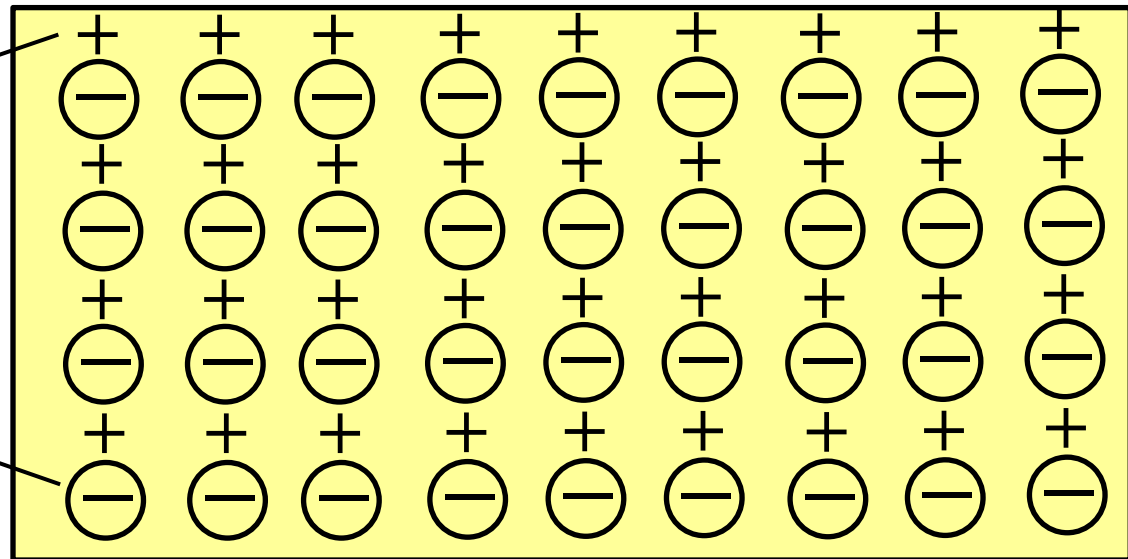
При добавлении в четырехвалентный полупроводник (Si) трехвалентного элемента (индий In) в структуре примесного полупроводника образуются положительные подвижные заряды - «дырки», при этом атомы индия становятся неподвижными отрицательными ионами.

Такой полупроводник называют полупроводником с дырочной проводимостью или полупроводником

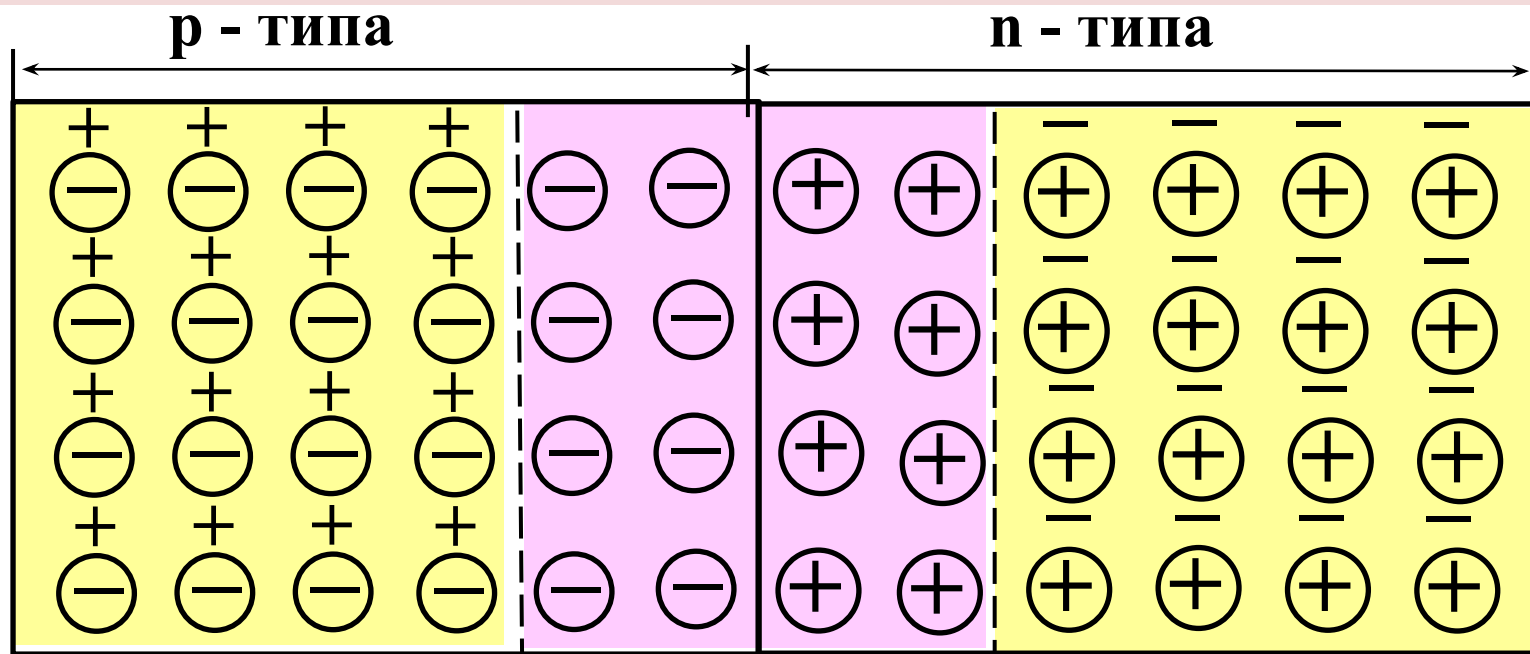
р-типа.

Свободная
дырка

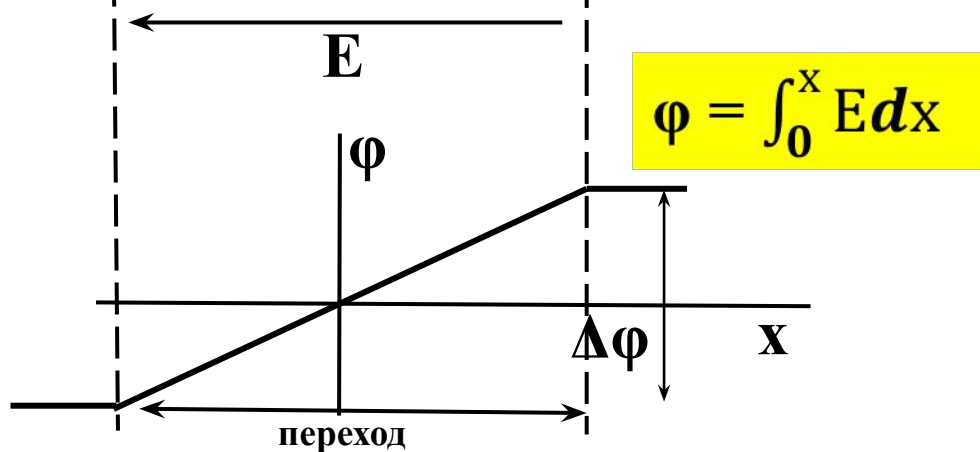
Неподвижный
ион



Контактные явления на границе полупроводников p и n типа

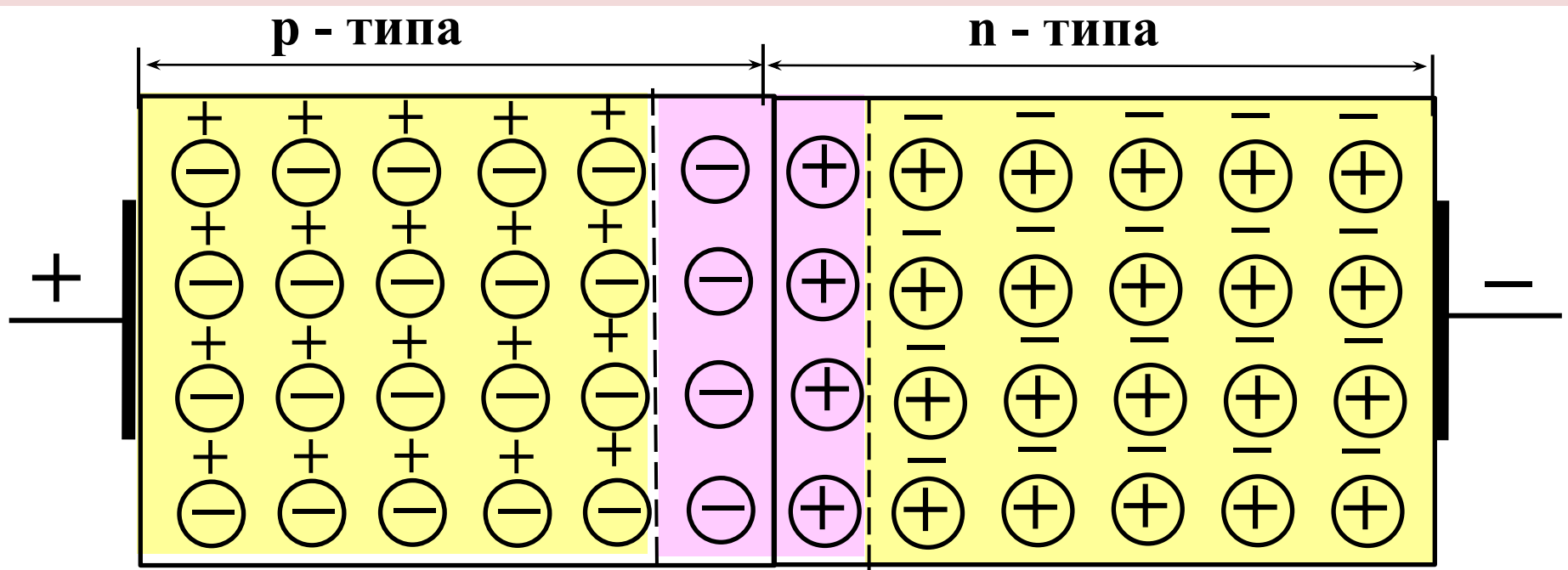


При соединении полупроводников **p** и **n** типов часть дырок диффундирует из **p** области в **n** область, а электронов из **n** в **p** область.

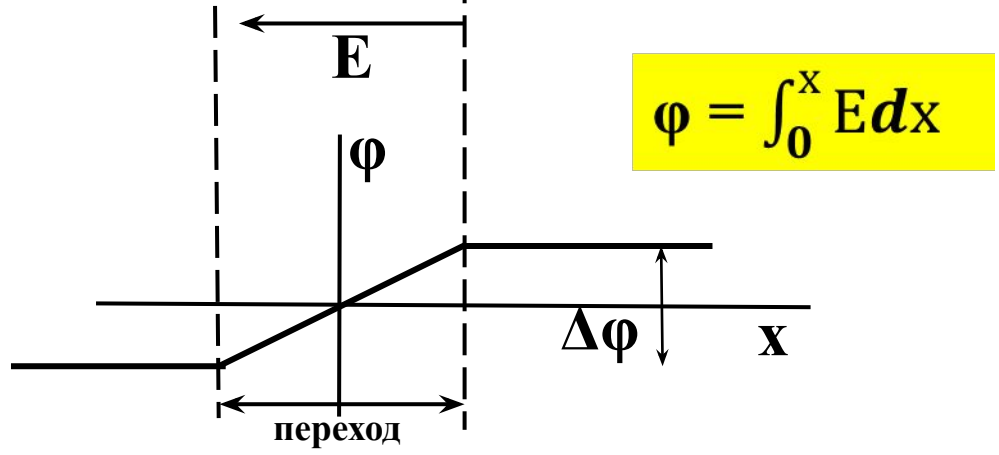


Вдоль границы раздела двух полупроводников возникли слои неподвижных отрицательных и положительных ионов. Возникшее между этими слоями поле (E) препятствует дальнейшей диффузии дырок и электронов. При некотором значении E ток через переход прекращается.

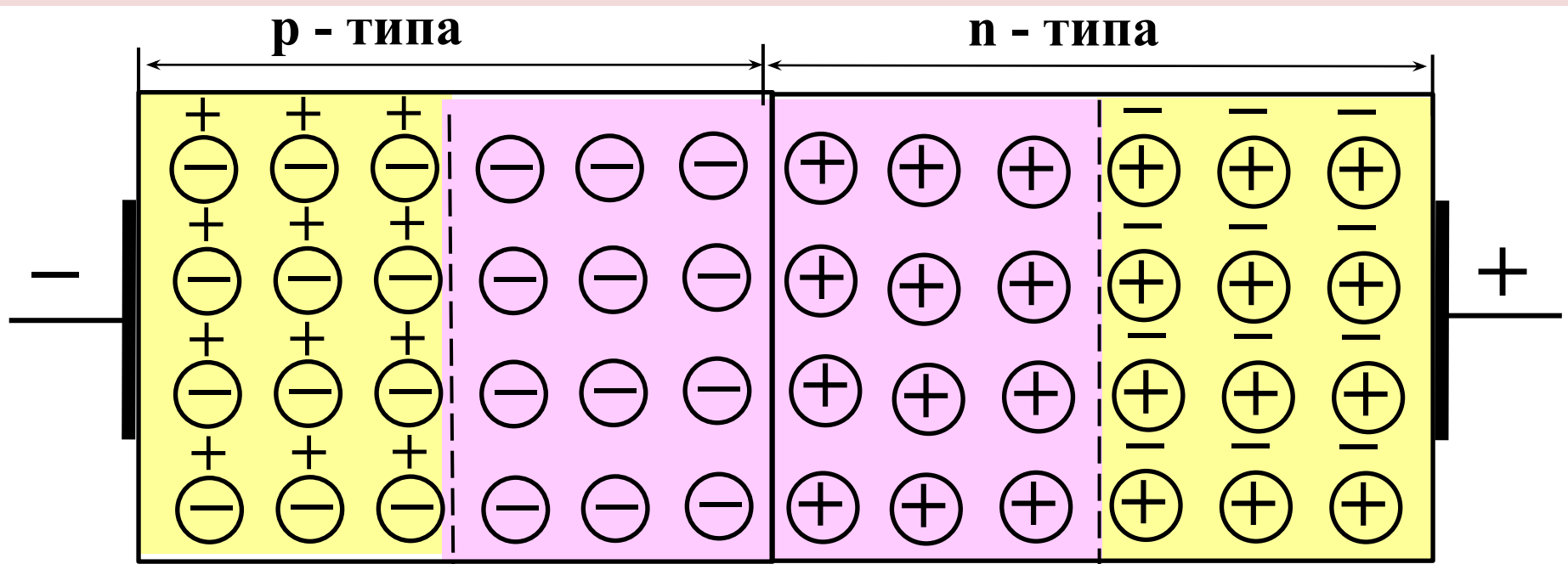
р-п переход под воздействием внешнего напряжения



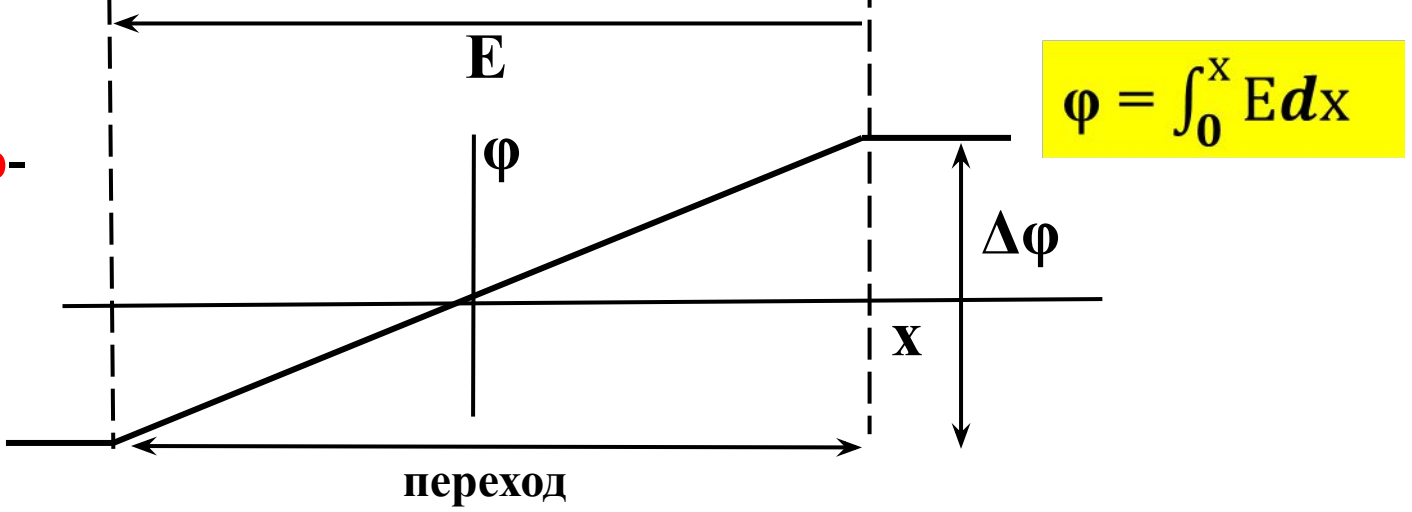
При подаче положительного напряжения (+ к р-области, - к n области) высота потенциального барьера $\Delta\phi$ уменьшается и через переход протекает ток – прямой ток перехода.



p-n переход под воздействием внешнего напряжения



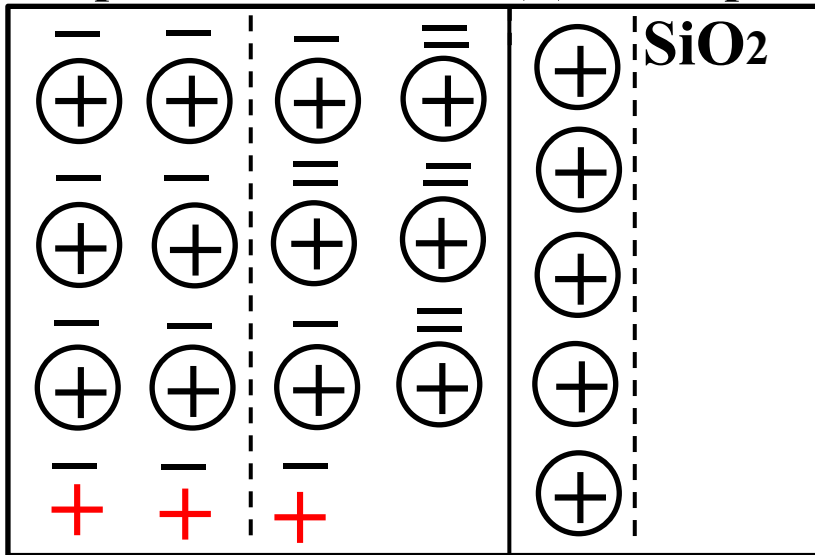
При подаче отрицательного напряжения (- к p-области, + к n-области) высота потенциального барьера $\Delta\phi$ увеличивается, ток через переход очень мал – обратный ток.



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

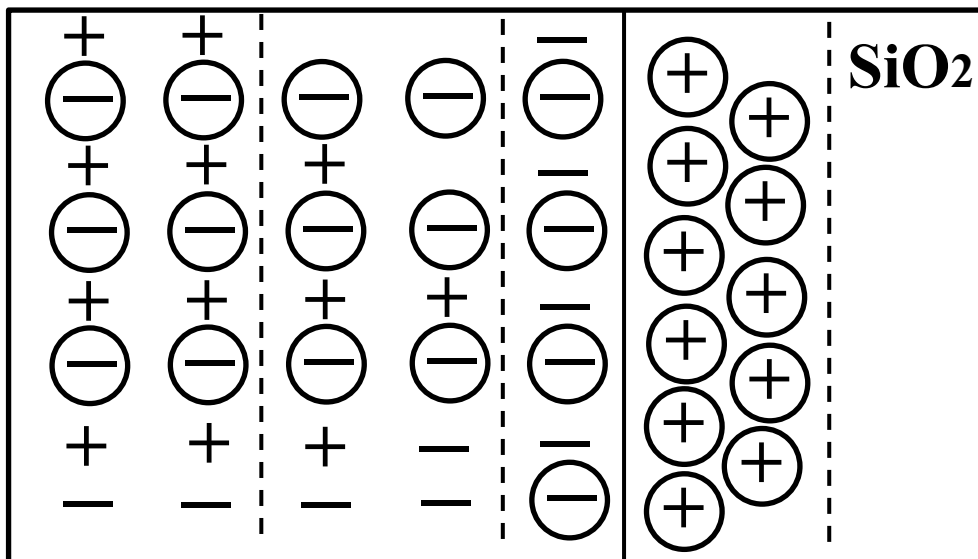
Диэлектрик

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.

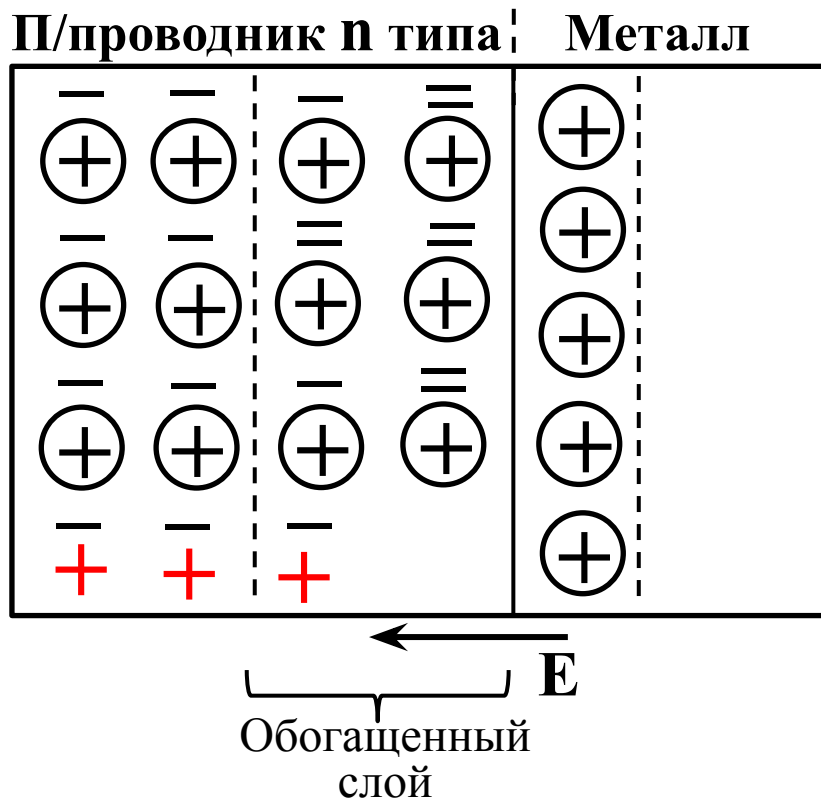


Обедненный слой Инверсный слой

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.

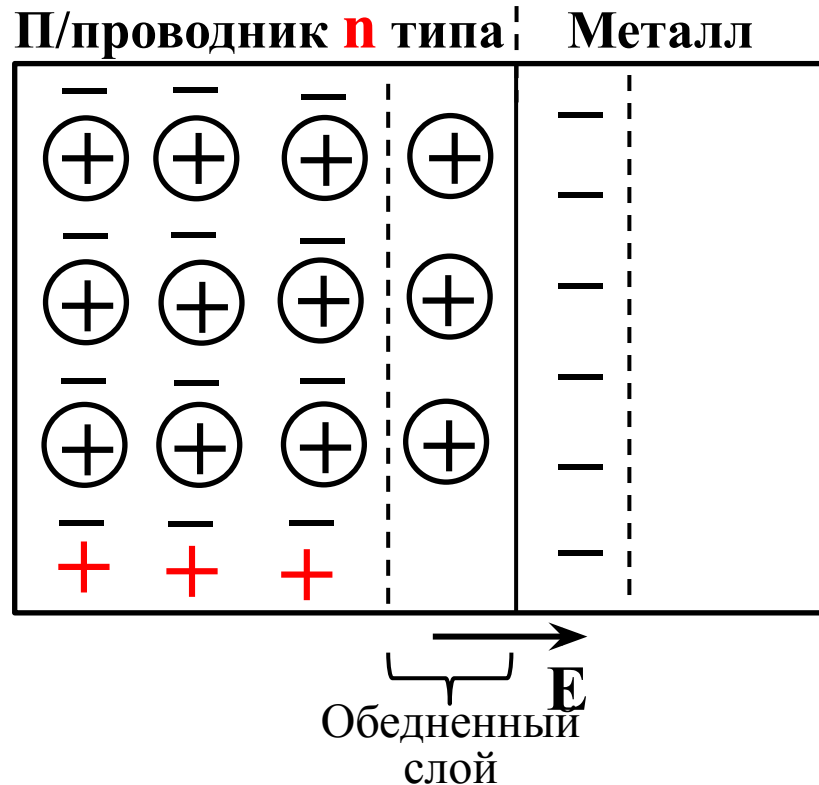
Контактные явления на границе полупроводника и металла



Если потенциал выхода для металла ϕ_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 ϕ_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 p-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 p-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 p-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

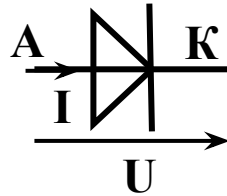
Выпрямительные диоды

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

Обозначение на схемах:

Анод - А

Катод - К

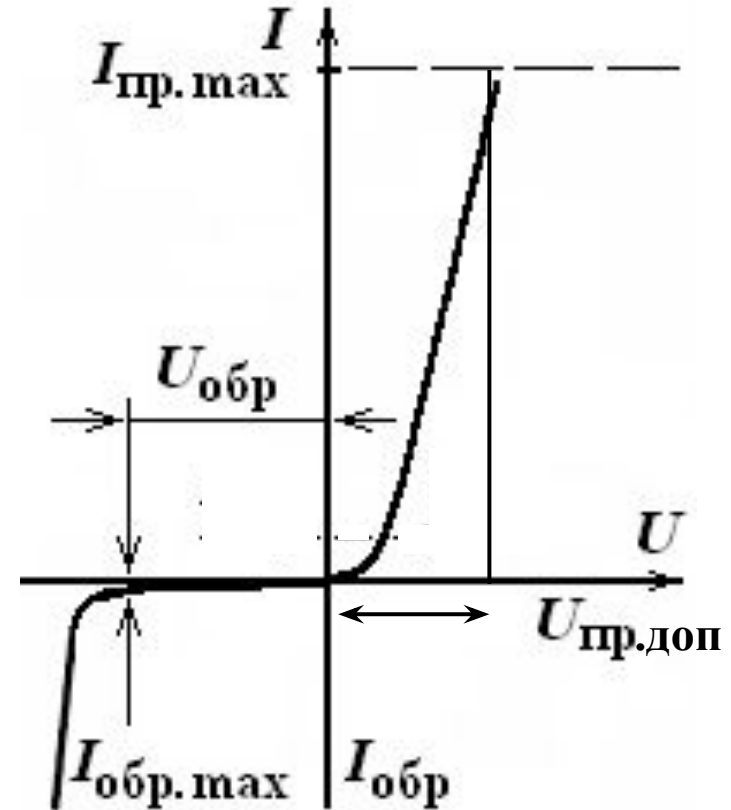


Параметры:

Допустимый прямой ток $I_{\text{пр.маx}}$ 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 $I_{\text{обр.маx}}$

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.

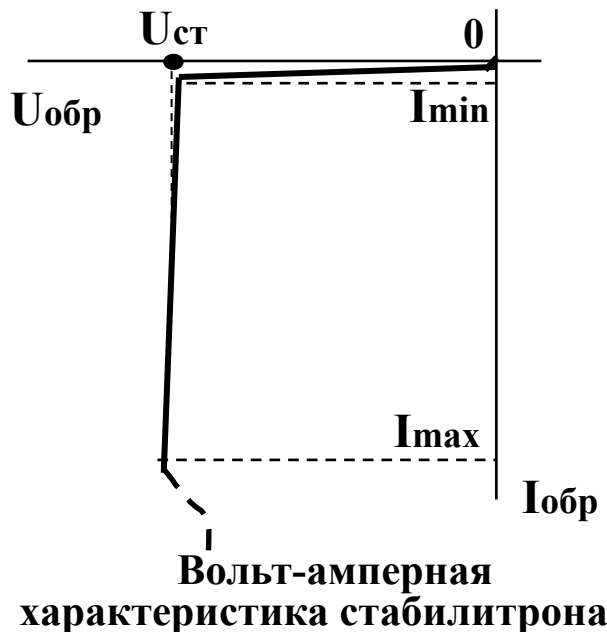
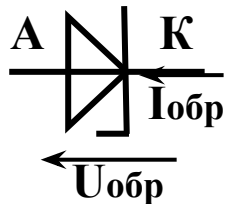
Область применения, с помощью импульсных диодов можно сконструировать электронный ключ, генератор, модулятор и

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:

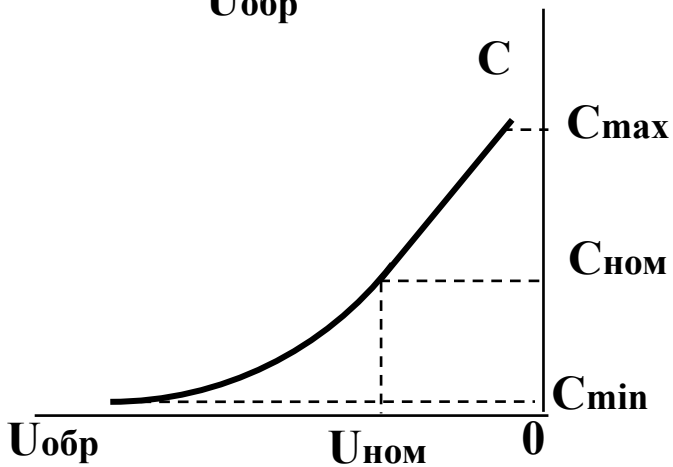
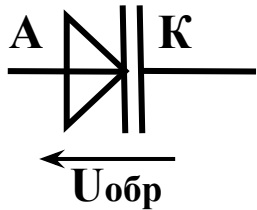
1. $U_{ст}$ – напряжение стабилизации (единицы, десятки вольт).
2. I_{min} , I_{max} – минимальный и максимальный ток стабилизации.
3. P_{max} - максимально допустимая рассеиваемая мощность.
4. $TKH = \Delta U / (U_{ст} \Delta T)$ – температурный коэффициент напряжения стабилизации (ΔU – отклонение напряжения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

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_{ном}** – номинальная емкость варикапа при номинальном смещении
2. **C_{min}** – минимальная емкость варикапа при заданном минимальном смещении
3. **C_{max}** – максимальная емкость варикапа при заданном максимальном смещении
4. **K_T** – температурный коэффициент емкости – это относительное изменение емкости варикапа для заданного смещения при изменении температуры окружающей среды на 1 градус в заданном интервале температур