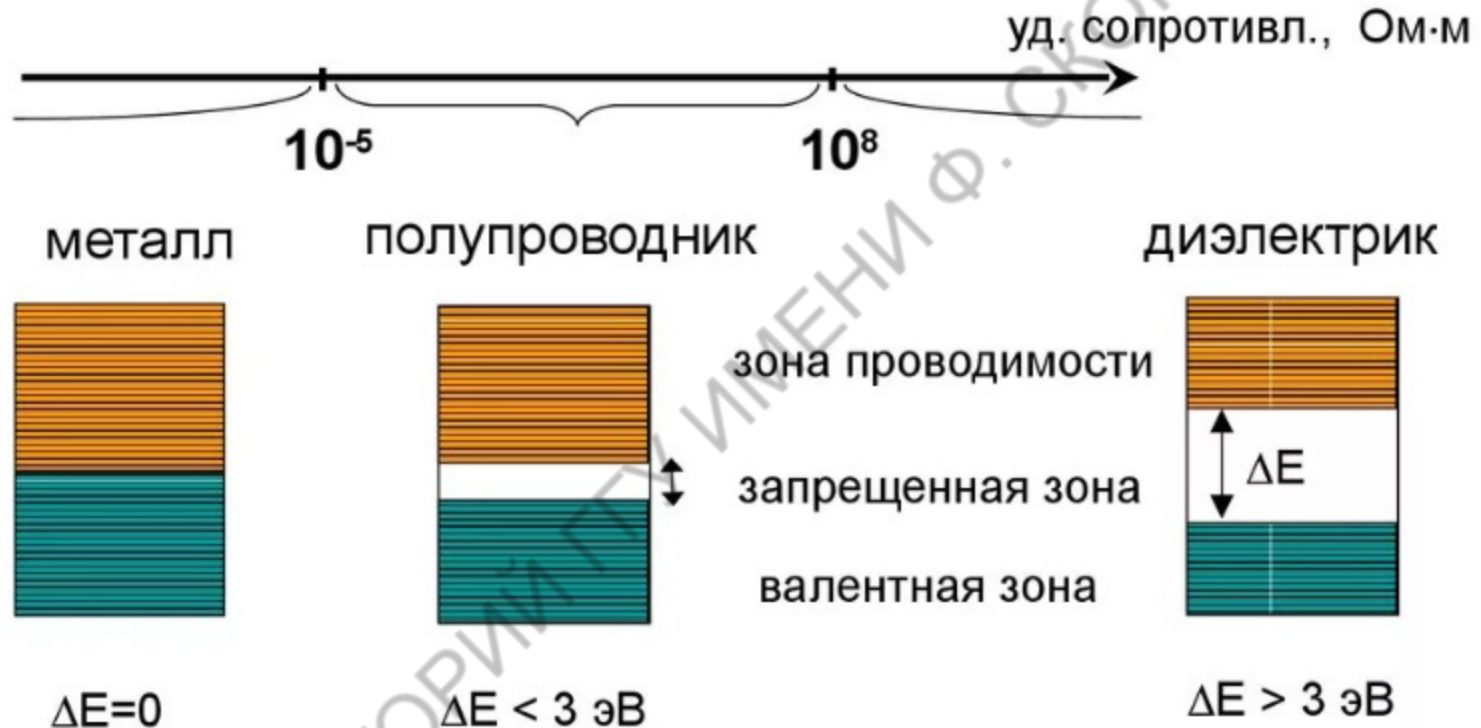


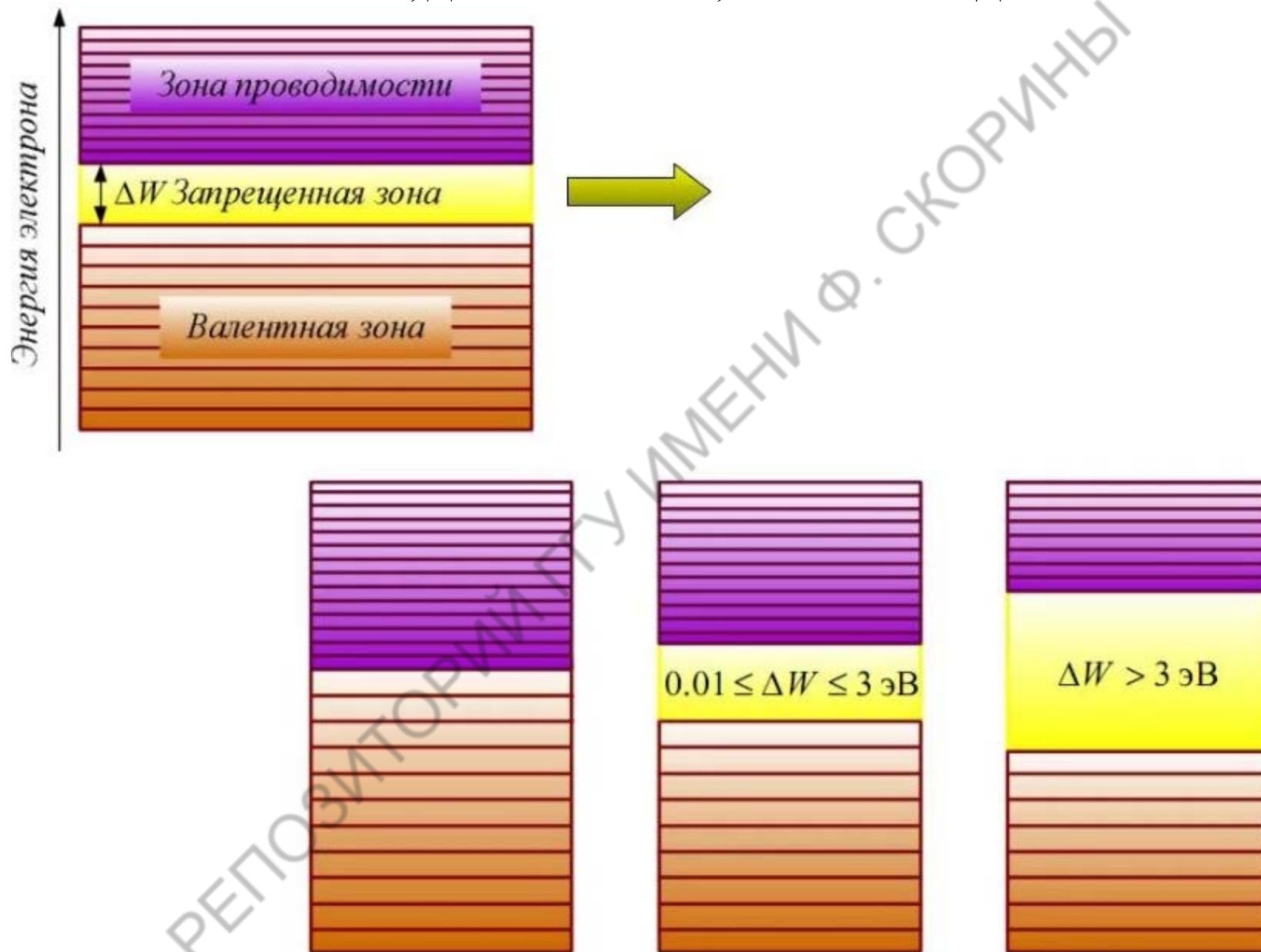
МЕТАЛЛЫ, ДИЭЛЕКТРИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ

Элементы зонной теории

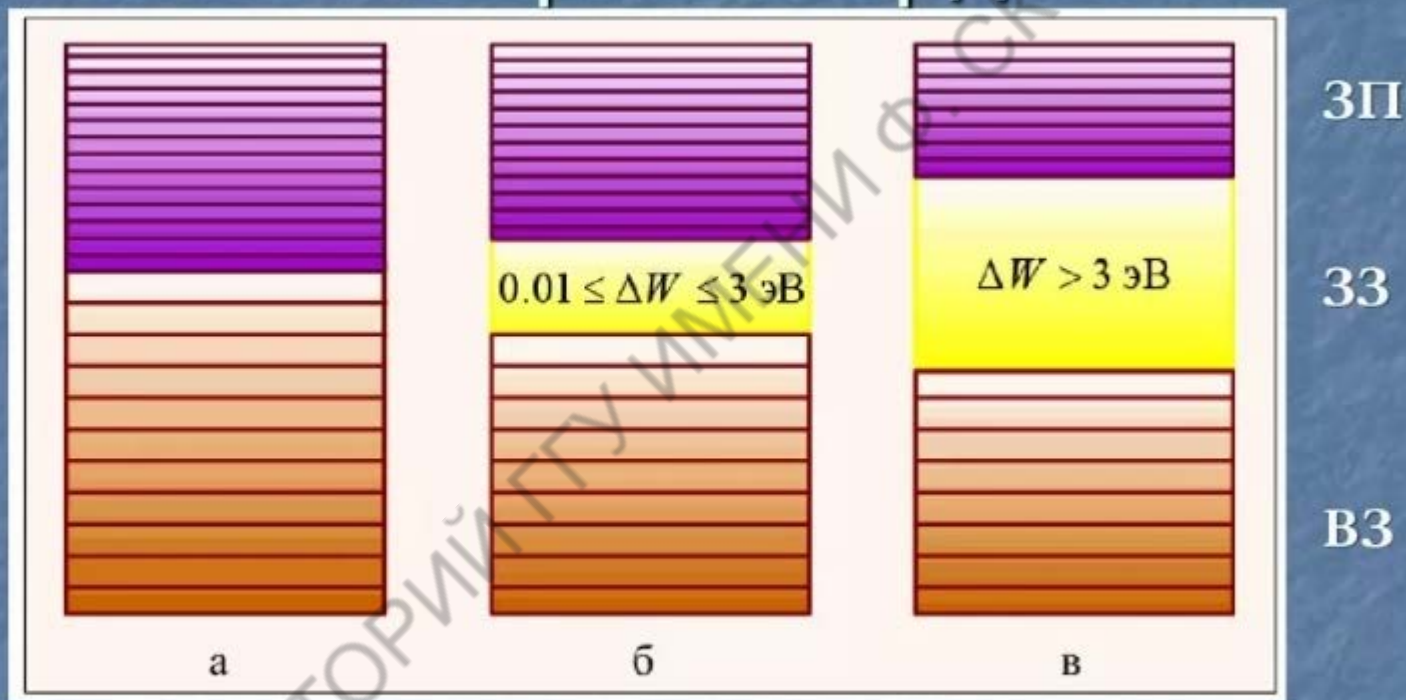


Металлы, полупроводники, диэлектрики отличаются типом химической связи, зонной диаграммой, величиной удельного сопротивления

МЕТАЛЛЫ, ДИЭЛЕКТРИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ



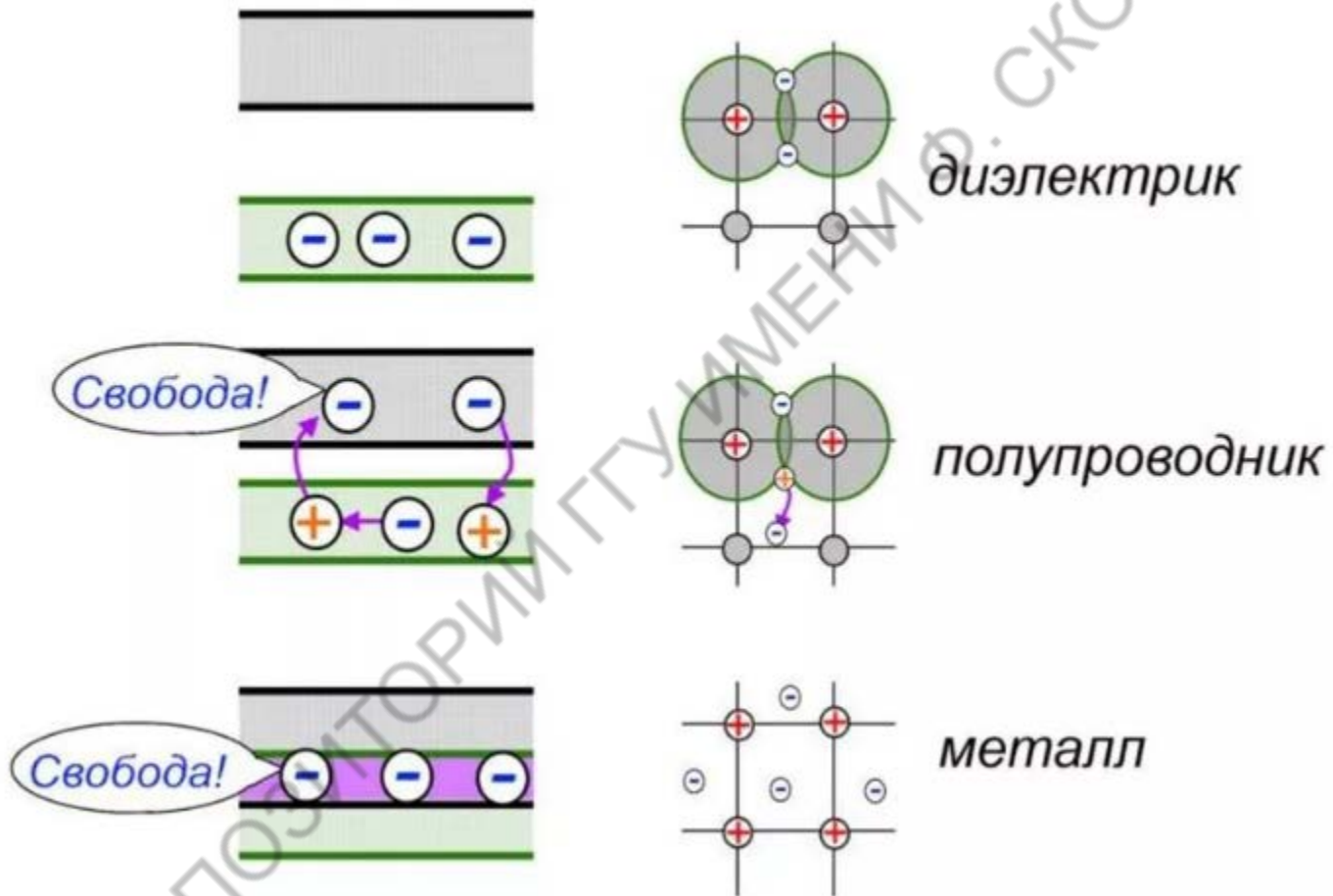
Зонная теория твердых тел



Зонные энергетические диаграммы различных твердых веществ:
а - проводник; б - полупроводник; в - диэлектрик.

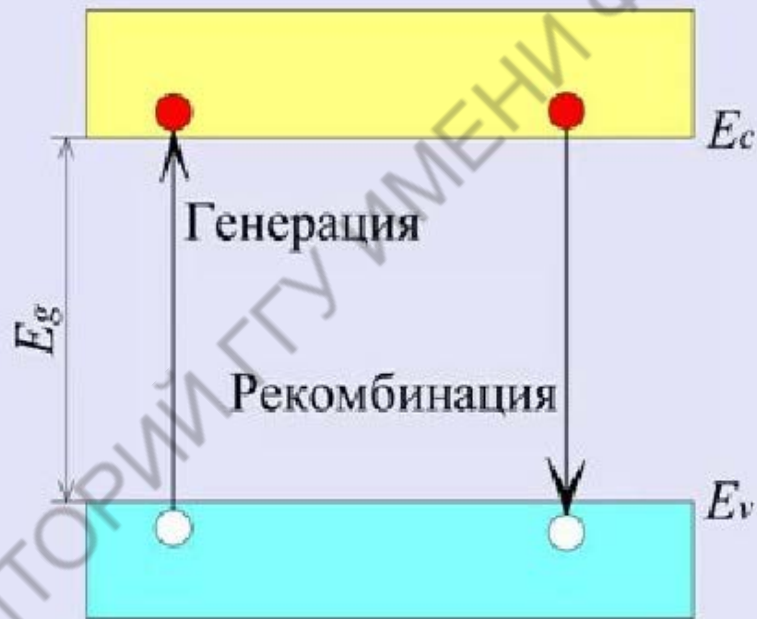
ЗП-зона проводимости, **ЗЗ**-запрещенная зона, **ВЗ**-валентная зона

МЕТАЛЛЫ, ДИЭЛЕКТРИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ

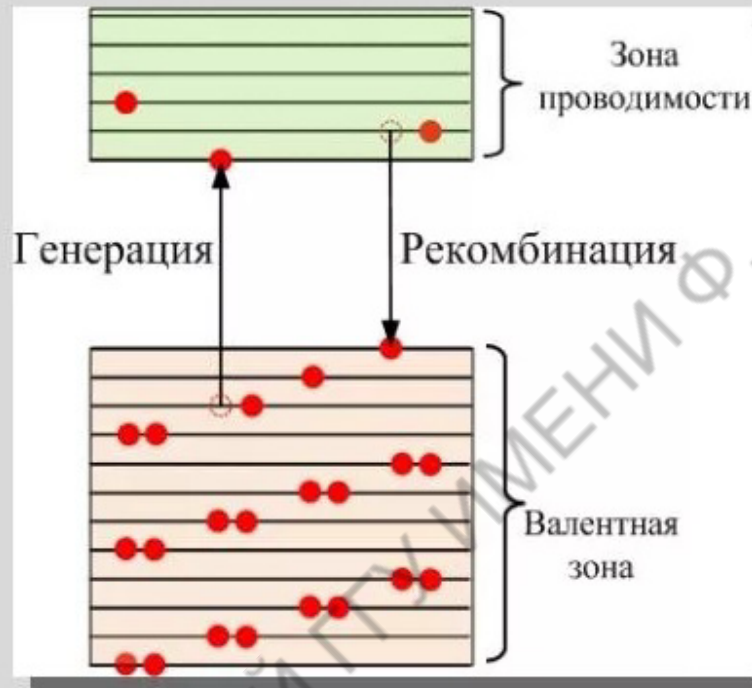


ГЕНЕРАЦИЯ – РЕКОМБИНАЦИЯ ПАР НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ

Процессы генерации и рекомбинации



ГЕНЕРАЦИЯ – РЕКОМБИНАЦИЯ ПАР НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ



В полупроводнике существует динамическое равновесие между двумя процессами:

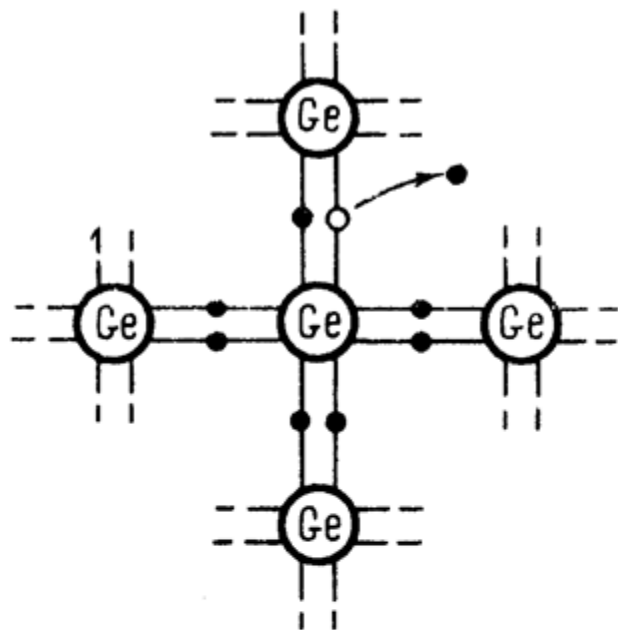
Генерация свободных электронов и дырок под действием теплового движения;

Рекомбинация, при которой дырки и электроны, встретившись, взаимно уничтожаются как свободные носители заряда

Полупроводники

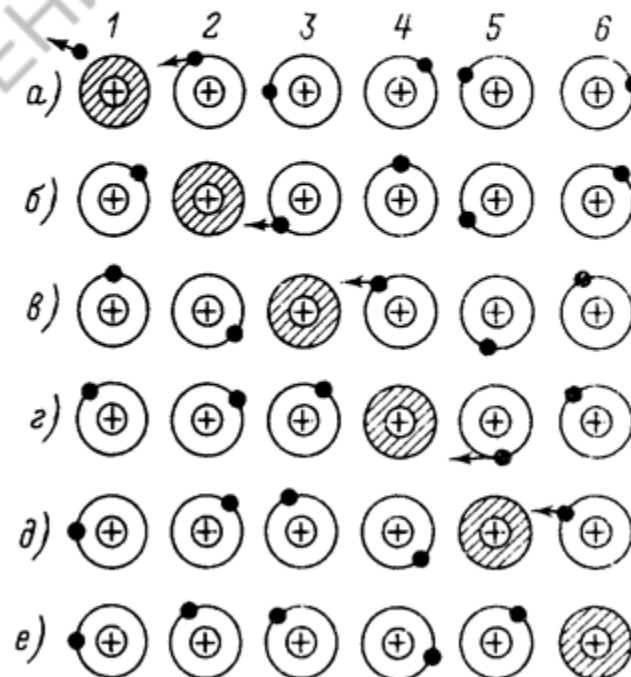
- Полупроводниками являются твердые тела, которые при $T=0$ характеризуются полностью занятой электронами валентной зоной, отделенной от зоны проводимости сравнительно узкой (ΔE порядка 1-2 эВ) запрещенной зоной
- **Электропроводность полупроводников меньше электропроводности металлов и больше электропроводности диэлектриков.**

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



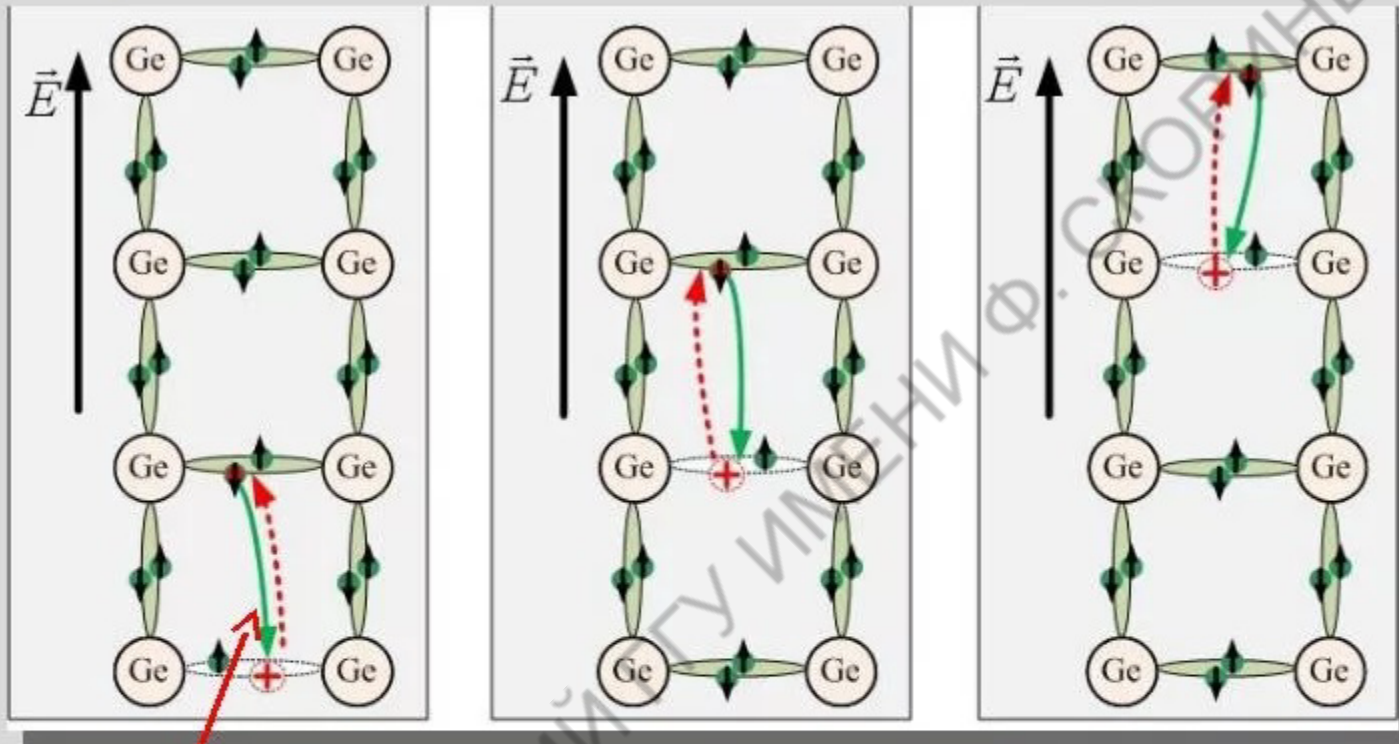
Возникновение пары
электрон-дырка

Принцип дырочной электропроводности



+ → -

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



Дырка перемещается, когда перемещаются электроны

В собственном полупроводнике действует два механизма проводимости: дырочный и электронный

Концентрация дырок равна концентрации электронов: $n_p = n_n$

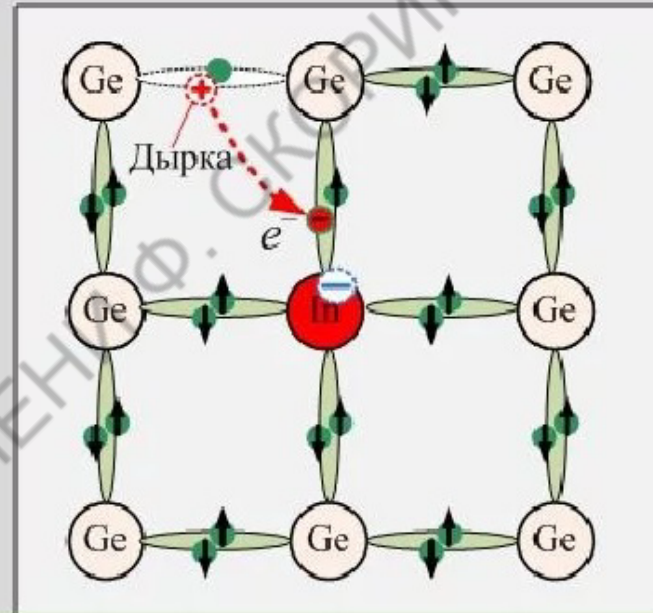
ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Акцепторные полупроводники (p-тип)

Валентность примеси меньше,
чем основного материала

Пример

В 4-валентный германий
добавили 3-валентный
индий

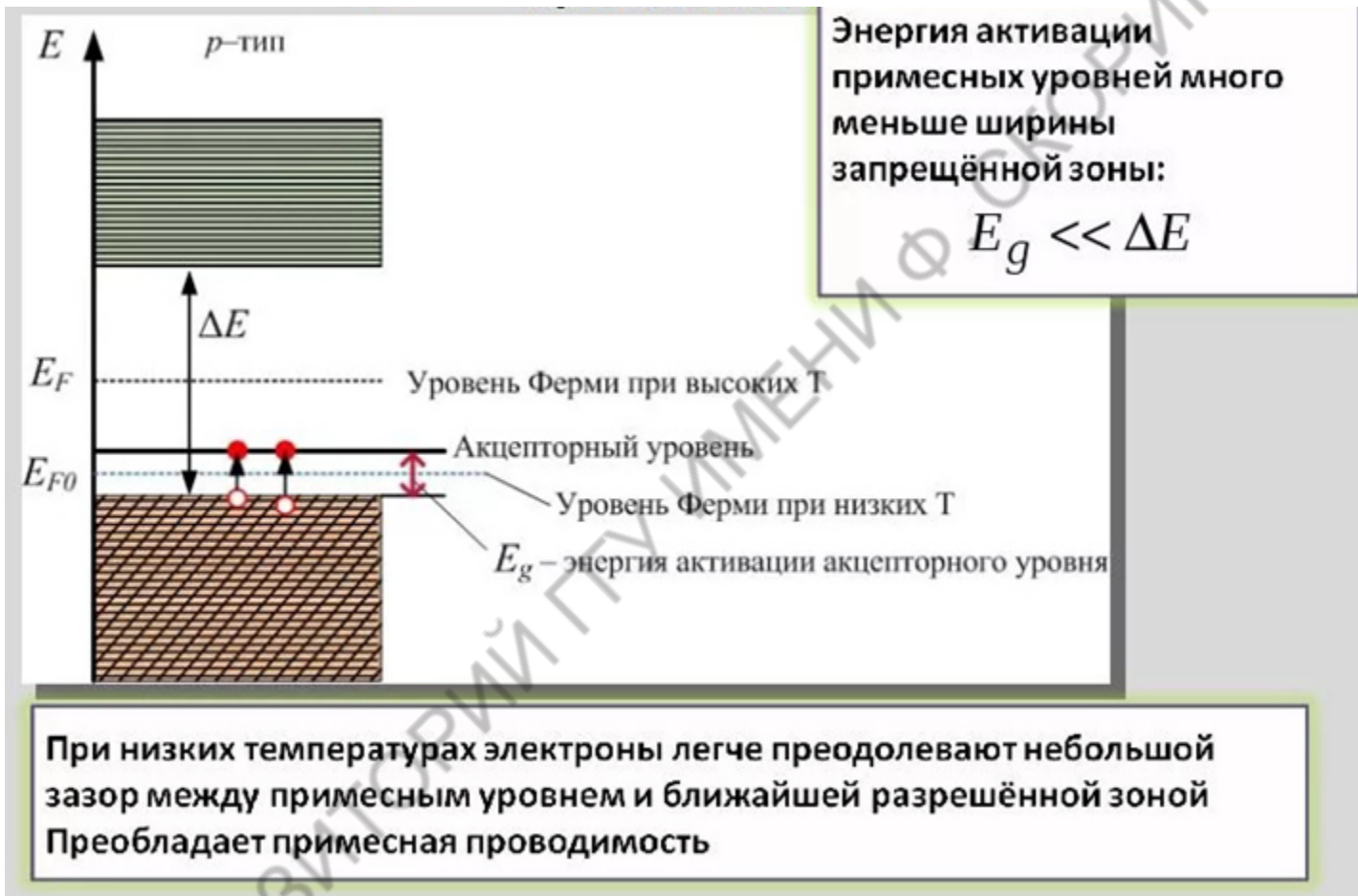


Для образования четвёртой связи захватывается электрон,
образовавшийся при разрыве связи между двумя атомами германия

Получается дырка, а атом примеси превращается в отрицательный ион

Основные носители – дырки,
неосновные – электроны (их мало)
Примесь называется акцепторной

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



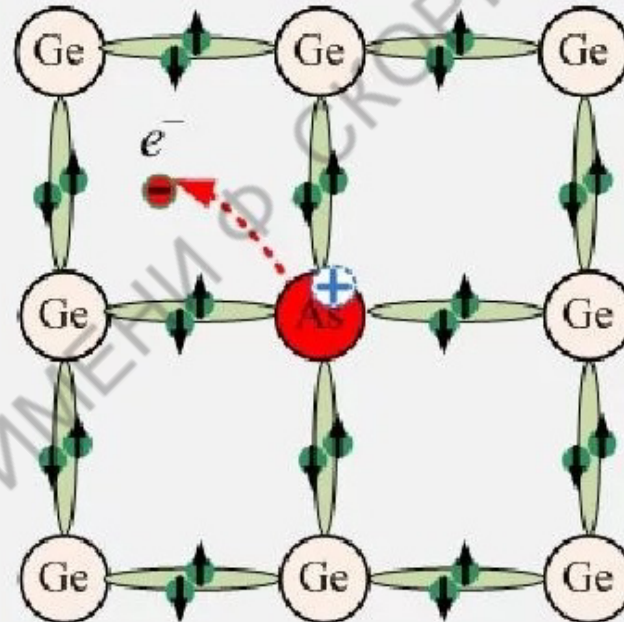
ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Донорные полупроводники (*n*-тип)

Валентность примеси больше,
чем основного материала

Пример

В 4-валентный германий
добавили 5-валентный
мышьяк

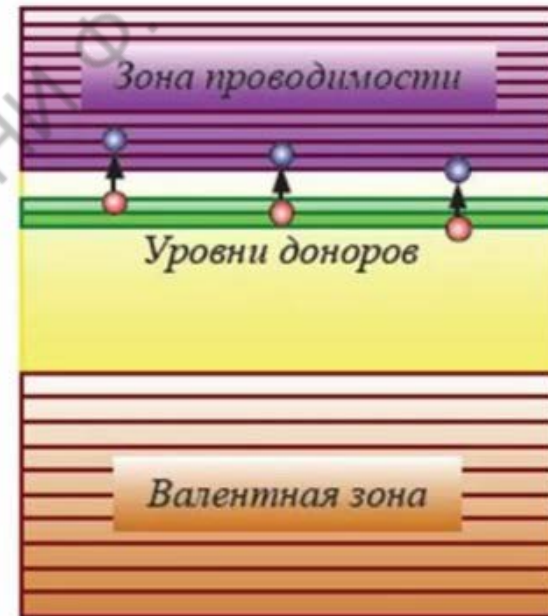


Атомы примеси отдают «лишние» электроны
Преимущественно электронная проводимость
Свободных электронов много
Электроны – основные носители
Неосновные носители – дырки, их существенно меньше

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Донорные примеси

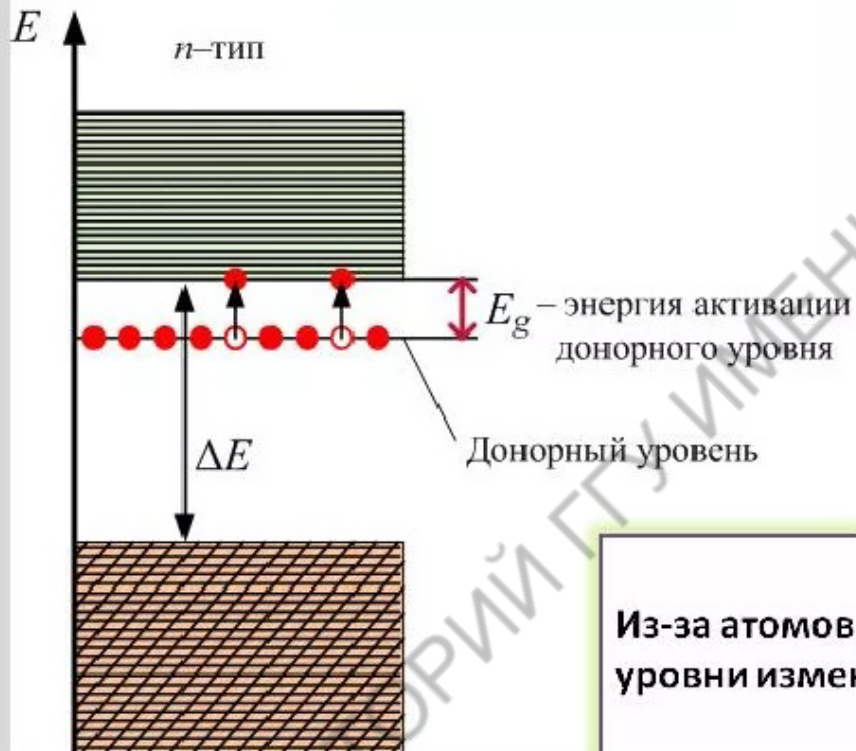
- **Донор** – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, занятый в невозбужденном состоянии электроном и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.



Зонная диаграмма
полупроводника с
донорными примесями

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Донорные полупроводники (*n*-тип)

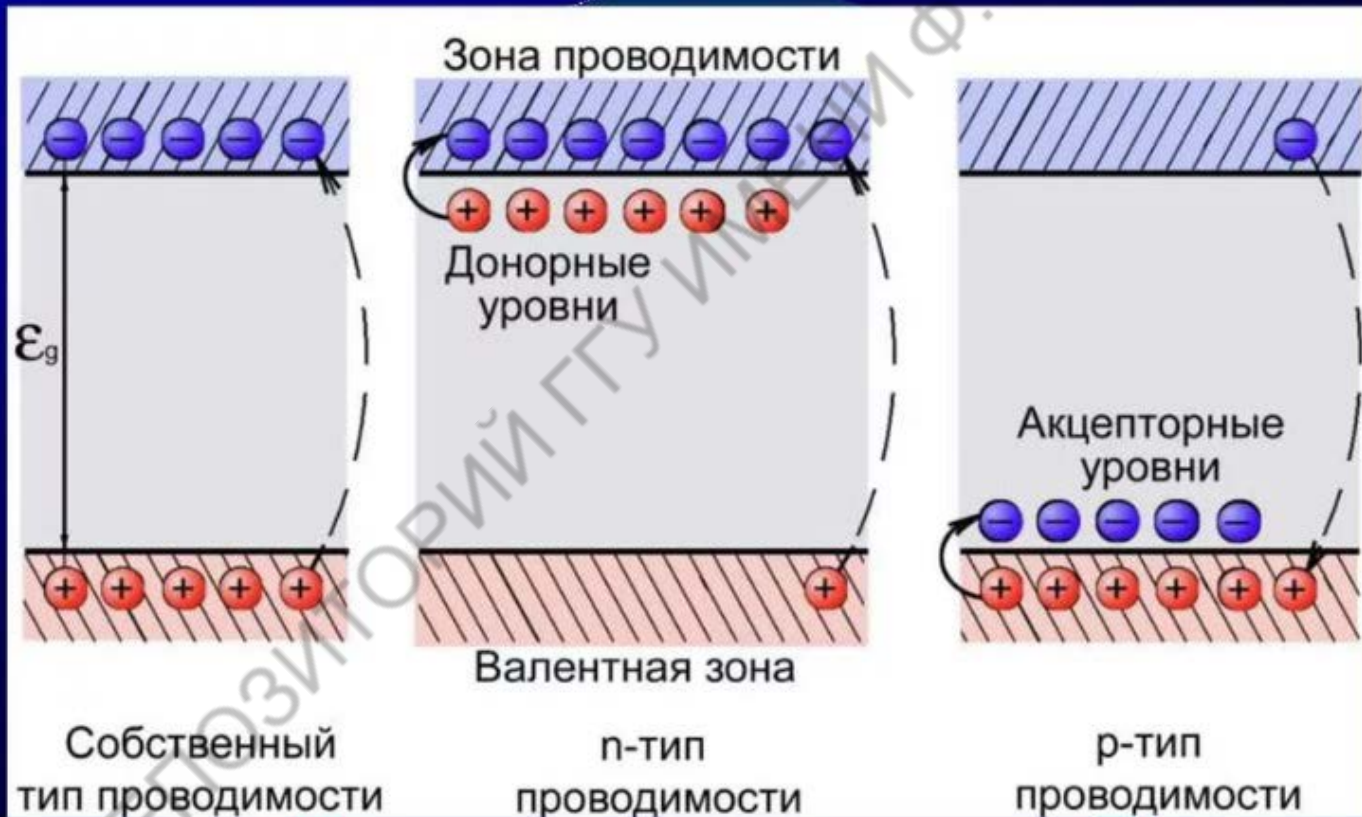


Из-за атомов примеси энергетические уровни изменяются:

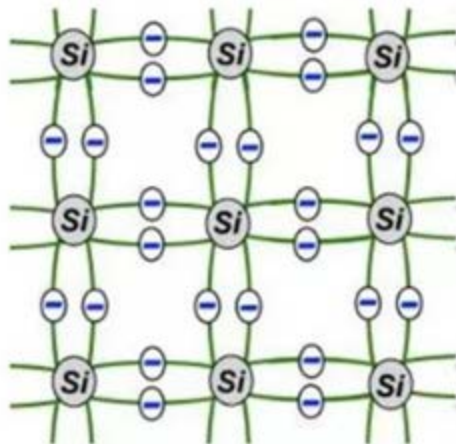
возникает примесный (донорный) уровень
в запрещённой зоне вблизи зоны проводимости

ТИПЫ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

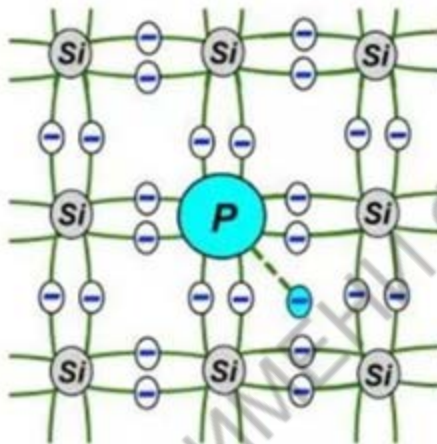
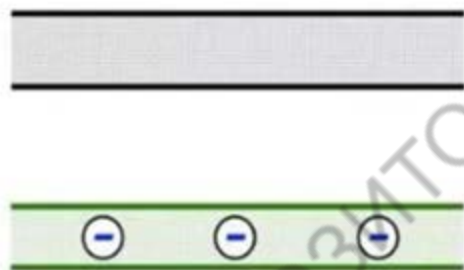
Зонная структура полупроводников (ϵ_g – ширина запрещенной зоны)



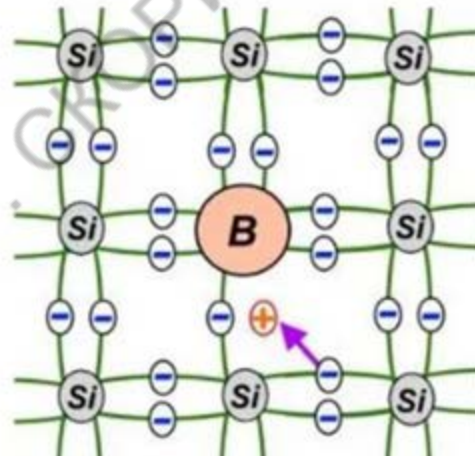
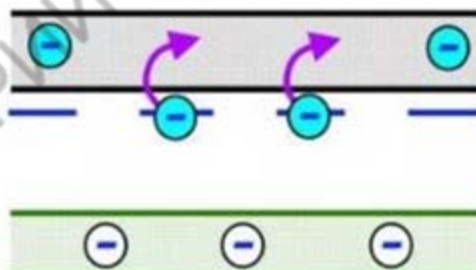
ТИПЫ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



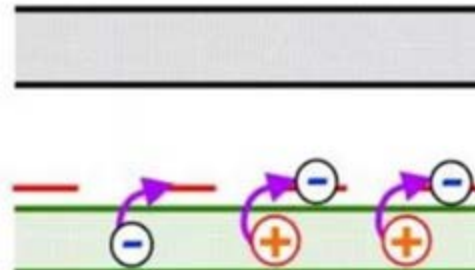
чистый



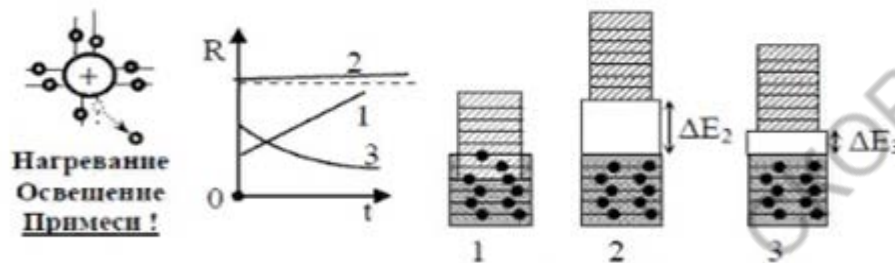
n-тип



p-тип



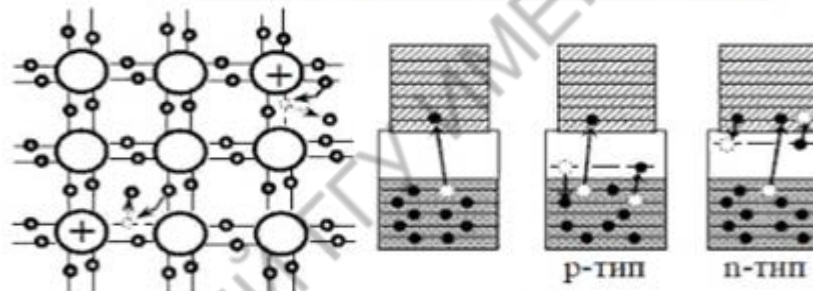
ТИПЫ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



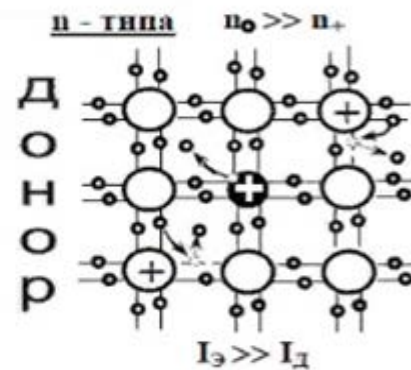
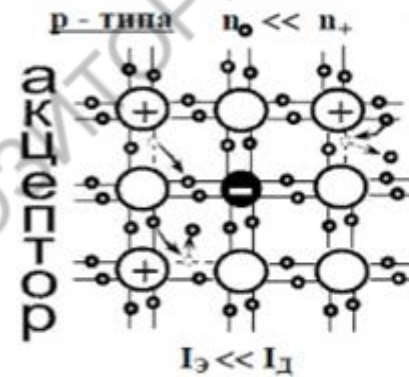
$$\Delta E_2 > 3 \text{ эВ}, \quad 0,5 \text{ эВ} < \Delta E_3 < 3 \text{ эВ}$$

$$\Delta E_{\text{кремния}} = 1,1 \text{ эВ}, \quad \Delta E_{\text{германия}} = 0,5 \text{ эВ}, \quad \Delta E_{\text{атмоза}} = 7 \text{ эВ}$$

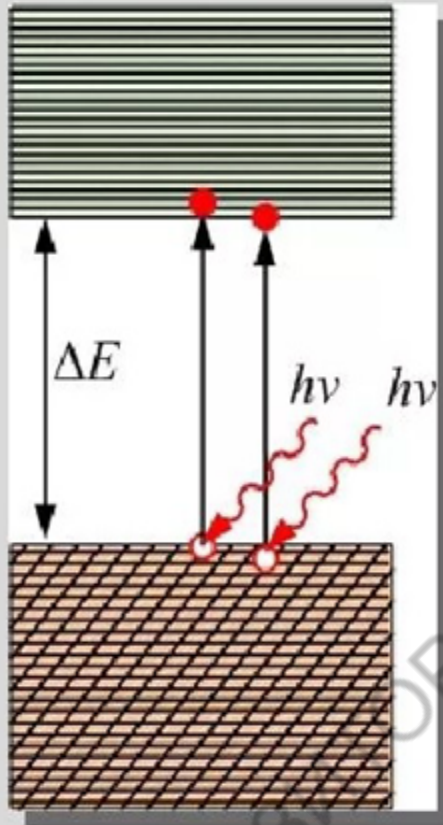
$$n_1 \approx 10^{22} \text{ см}^3, \quad n_2 \approx 10^9 \text{ см}^3, \quad n_3 \approx 10^{11} \text{ см}^3$$



$$I_3 = I_1$$



СОБСТВЕННАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

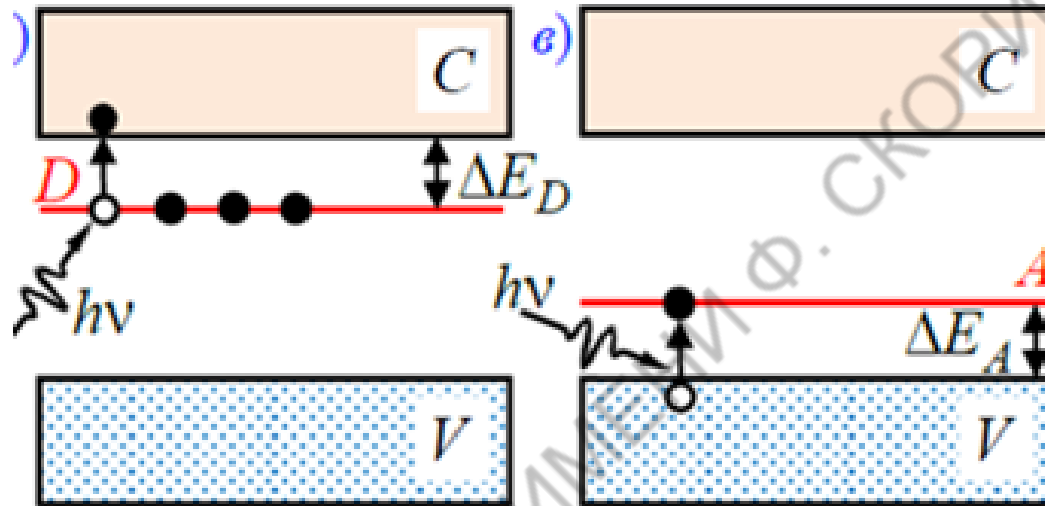


Фотопроводимость (внутренний фотоэффект) – это увеличение электропроводимости под действием электромагнитного излучения (света)

Фотоэффект будет наблюдаться только в том случае, если энергии фотона хватит на переход электрона в зону проводимости:

$$h\nu \geq \Delta E$$

ПРИМЕСНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



Примесная фотопроводимость.

Если полупроводник содержит примеси, то фотопроводимость может возникать **и при** $h\nu < \Delta E$: при донорной примеси фотон должен обладать энергией $h\nu \geq \Delta E_D$, при акцепторной примеси $h\nu \geq \Delta E_A$. При поглощении света примесными центрами происходит переход электронов с донорных уровней

в зону проводимости в случае полупроводника n-типа (рис. (б)) или из валентной зоны на акцепторные уровни в случае полупроводника p-типа (рис. (в)).

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

р- и n- типа

Электронно-дырочный переход обладает односторонней проводимостью. Полупроводник с одним p - n -переходом называется полупроводниковым диодом. Их изготавливают из германия, кремния, селена и других веществ. На схемах диод изображают следующим образом

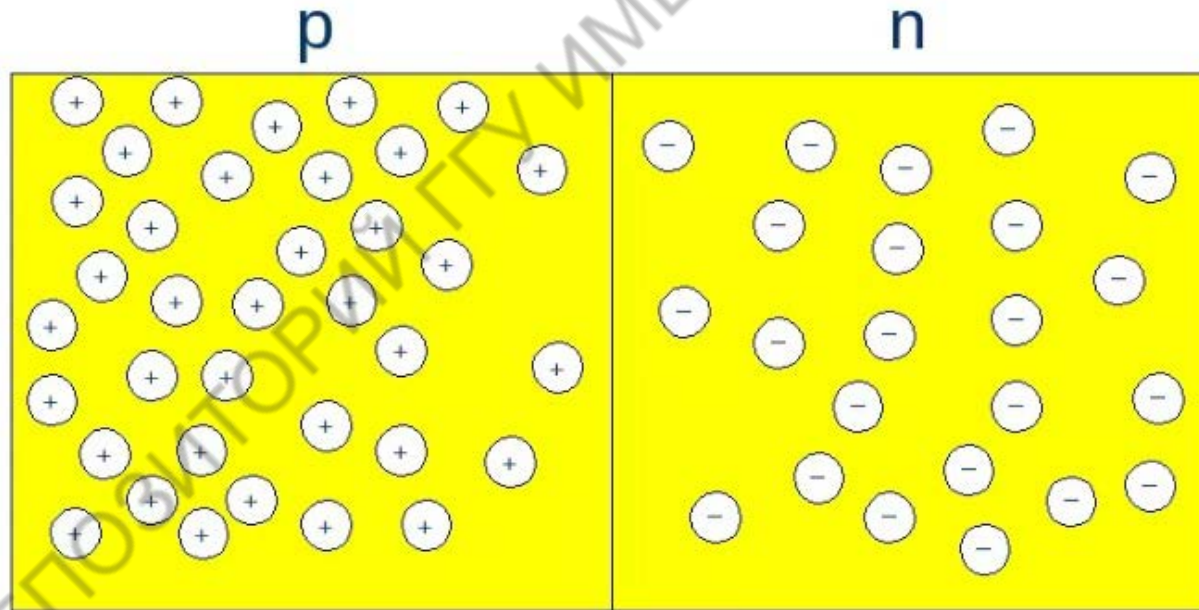


Для получения полупроводникового диода в кристалл германия впаивают каплю индия. В результате образуется p - n -переход.



КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

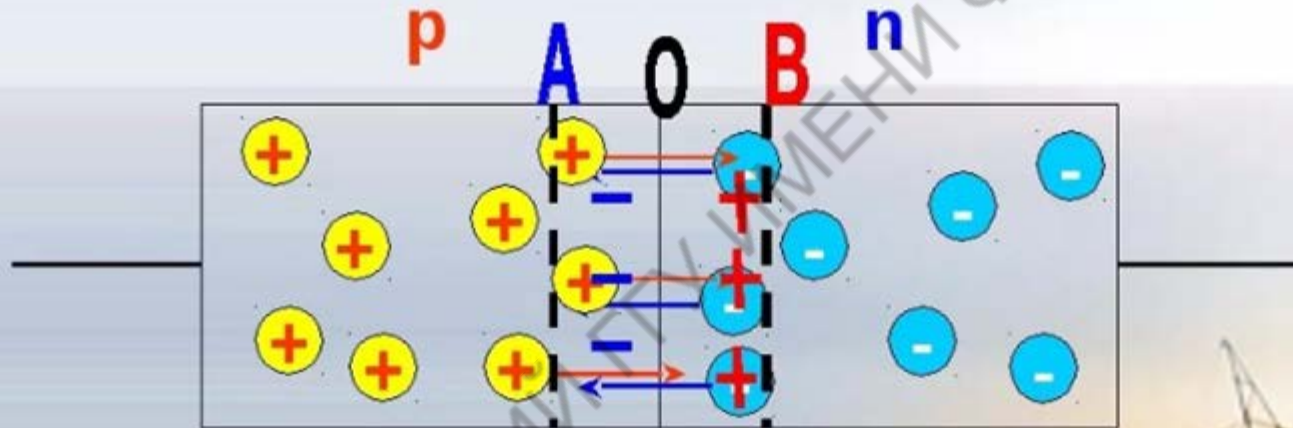
Контакт двух полупроводников
р и n проводимостью.



КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

p- и n- типа

Рассмотрим электрический контакт двух полупроводников **p** и **n** типа, называемый **p – n** переходом



Начинается бурный процесс диффузии. **e** из n-типа переходят в p-тип, **дырки** из p-типа переходят в n-тип. Образовались заряженные области: **OA** и **OB**. Образуется контактная разность потенциалов

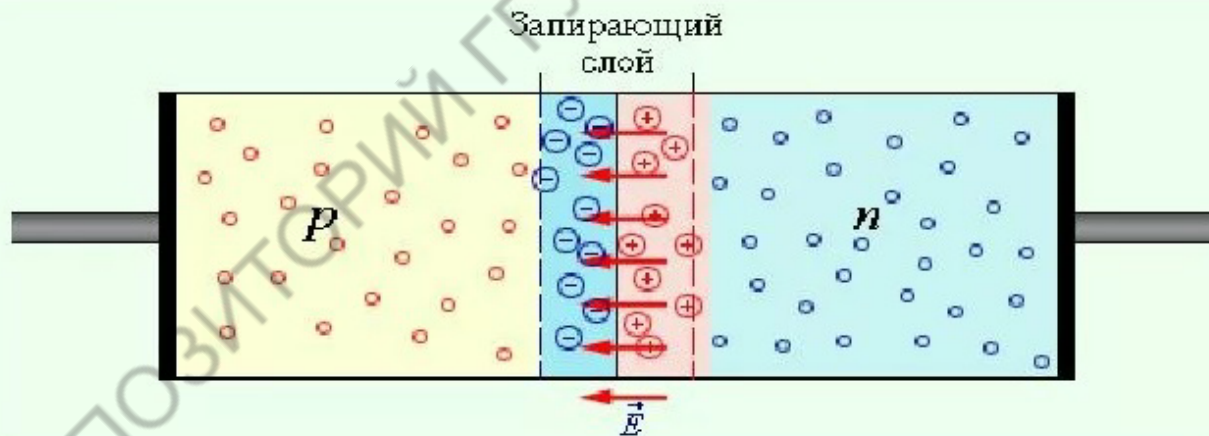
Область **AOB** – запирающая область, обладает огромным **R**. Причина – обеднена основными носителями тока.

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

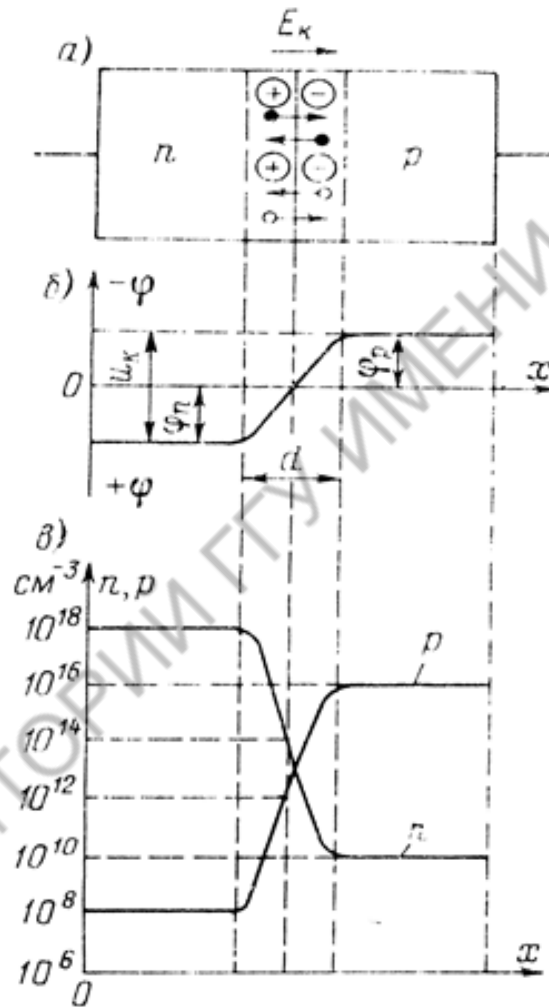
р- и n- типа

Электронно-дырочный переход.

- При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области в p -область.



КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и п- типа



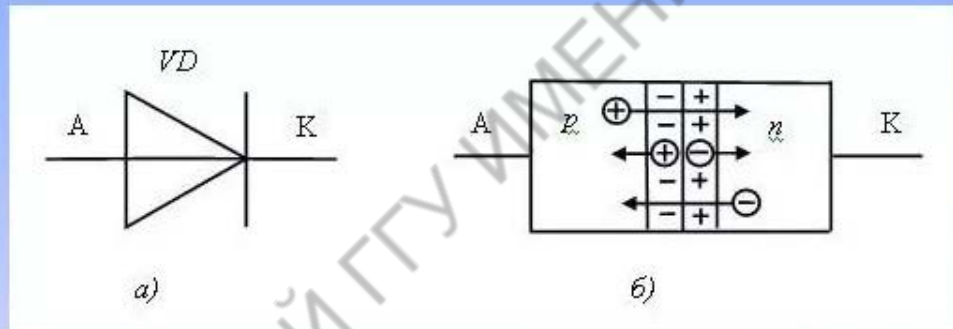
$$U_K = \varphi_n - \varphi_p$$

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

p- и n- типа

p-n-переход

Контакт двух полупроводников одного вида с разным типом проводимости называется *электронно-дырочным* или *p-n-переходом*



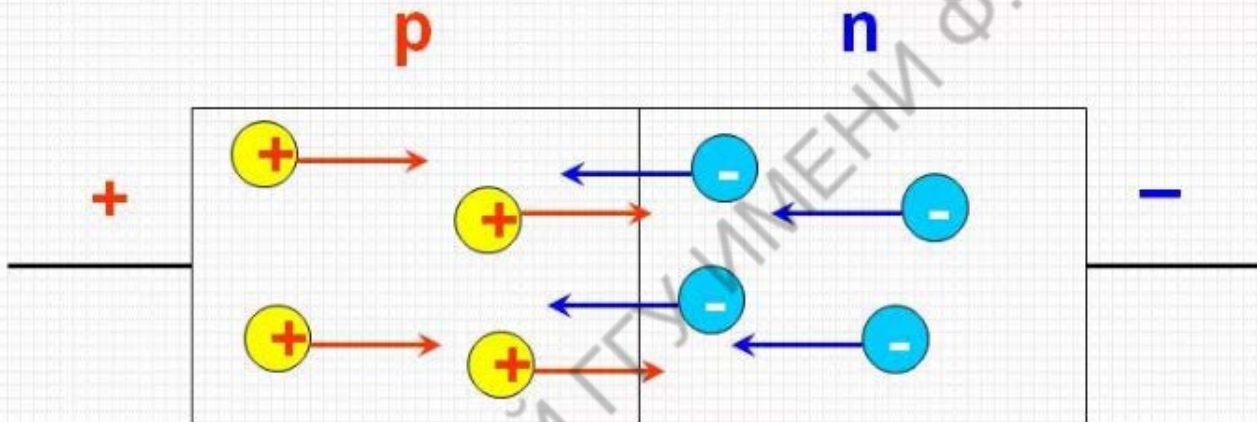
Условное обозначение (a) и структура (б)
полупроводникового диода

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

p- и n- типа (**ПРЯМОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ**)

Рассмотрим электрический контакт двух полупроводников **p** и **n** типа, называемый **p – n** переходом

1. Прямое включение

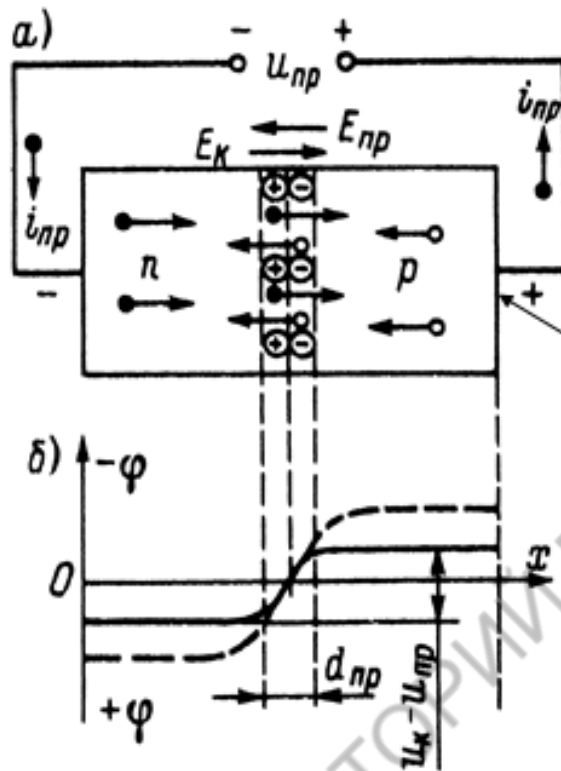


Ток через **p – n** переход осуществляется **основными носителями заряда** (дырки двигаются вправо, электроны – влево)

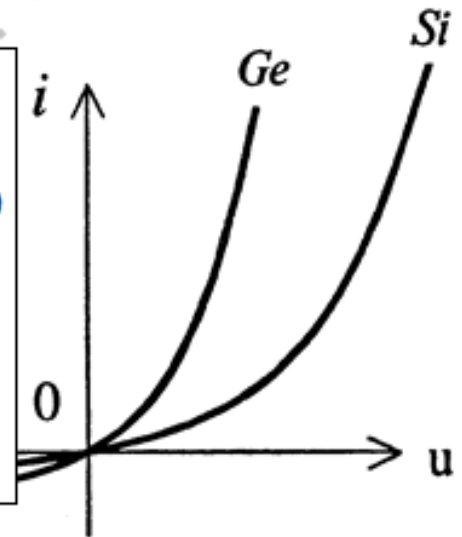
Сопротивление перехода мало, ток велик.

Такое включение называется **прямым**, в прямом направлении **p – n** переход **хорошо проводит электрический ток**

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и п- типа (**ПРЯМОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ**)

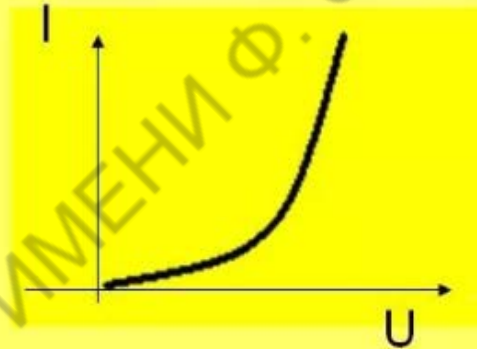
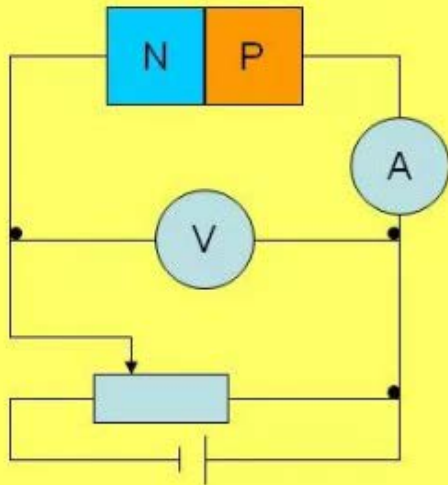


$i_{\text{диф}} > i_{\text{др}}$
 ПОЭТОМУ
 $i_{\text{пр}} = i_{\text{диф}} - i_{\text{др}} > 0$
 Т.К. - $i_{\text{диф}} \gg i_{\text{др}}$
 ТО - $i_{\text{пр}} \approx i_{\text{диф}}$
 ПРИ ЭТОМ
 $i_{\text{пр}} = i_n + i_p$



КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и п- типа (ПРЯМОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД



Вольт-амперная характеристика
п/п диода

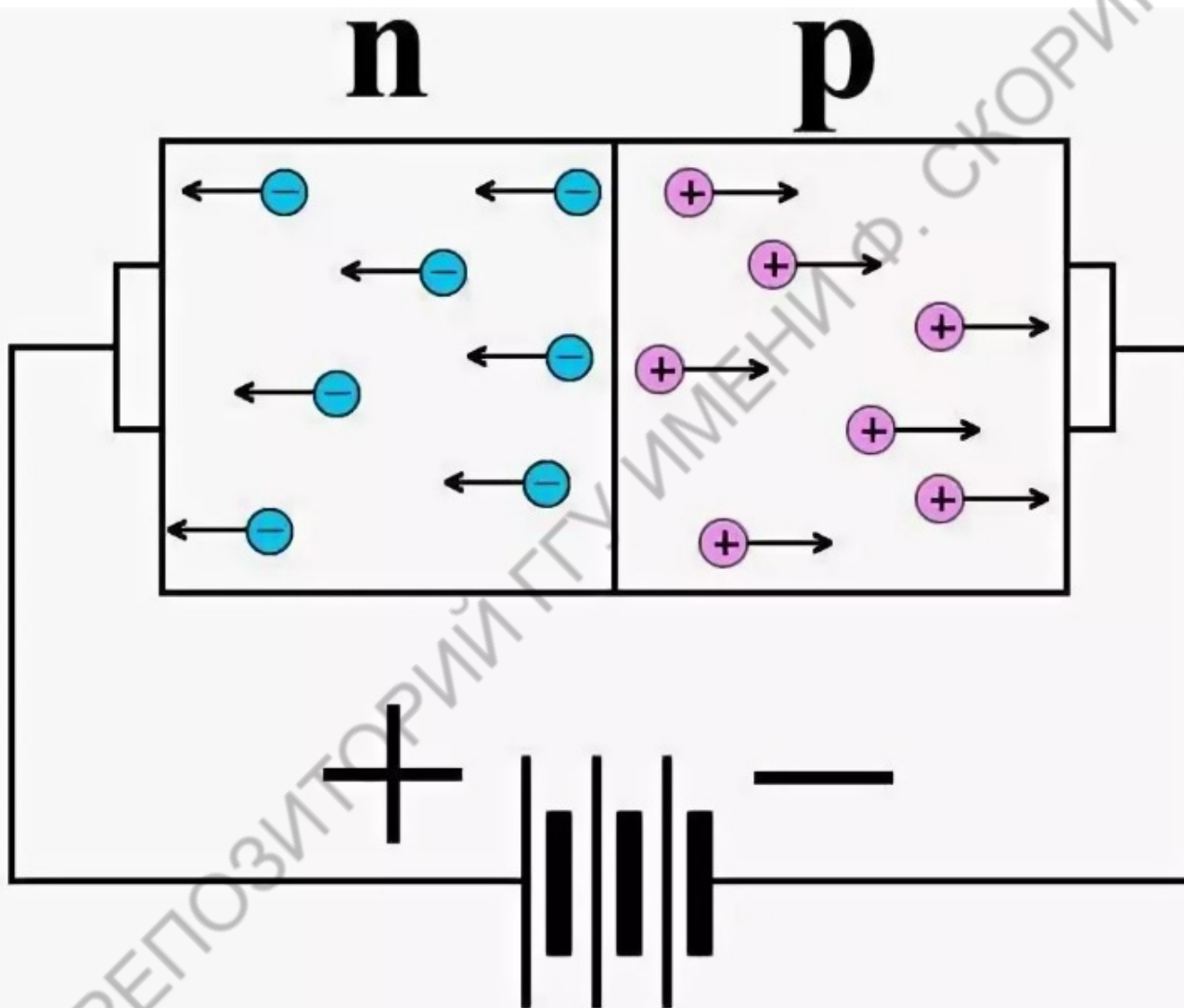
Контакт двух полупроводников разной проводимости называется P-N переход или полупроводниковый диод. Он обладает односторонней проводимостью и используется для выпрямления переменного тока.



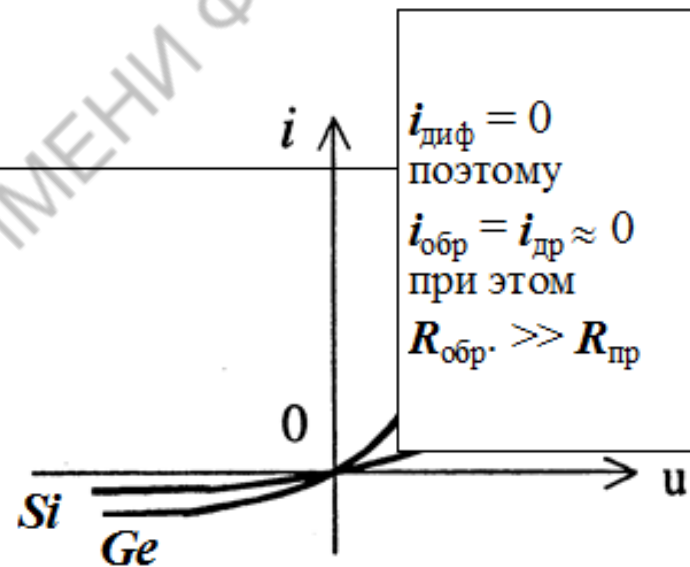
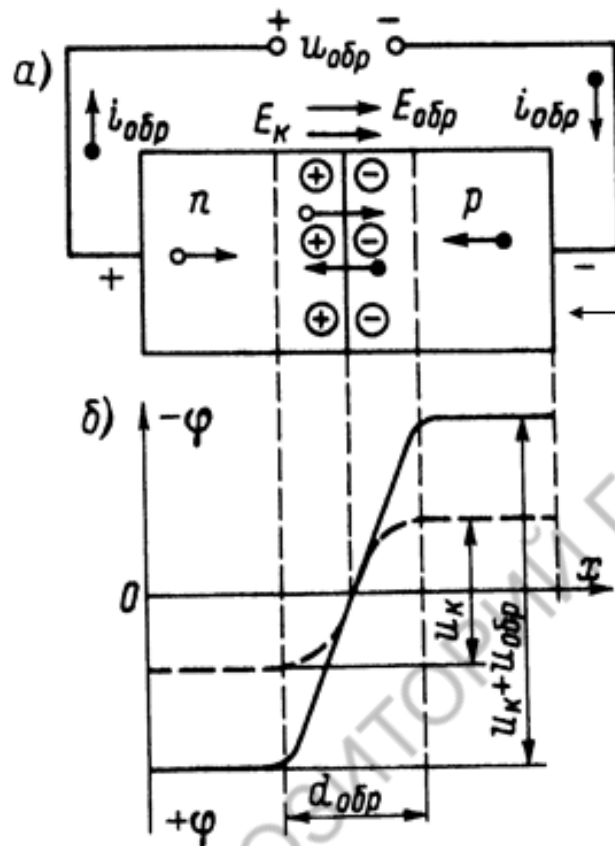
Обозначение п/п диода на схемах

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

р- и n- типа **ОБРАТНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ**



КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и n- типа **ОБРАТНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ**

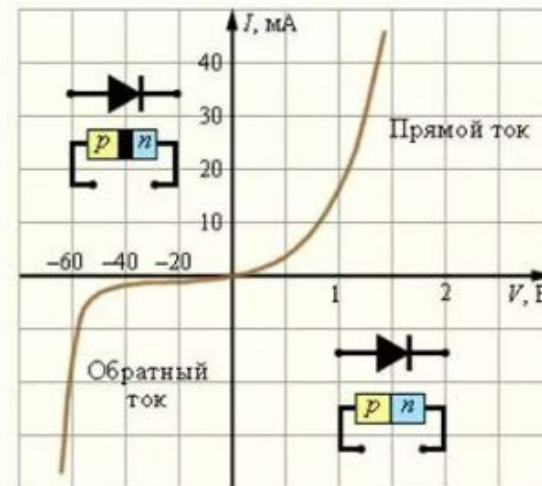
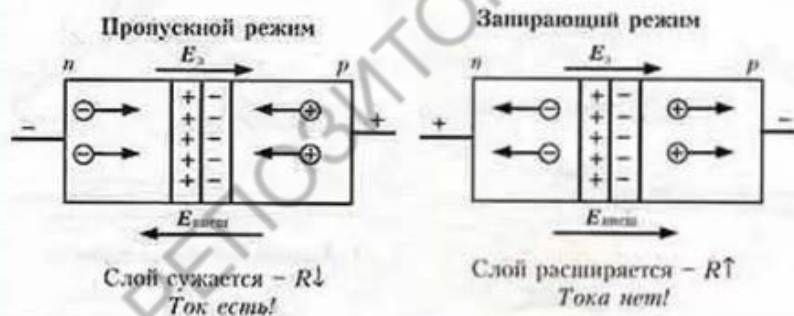
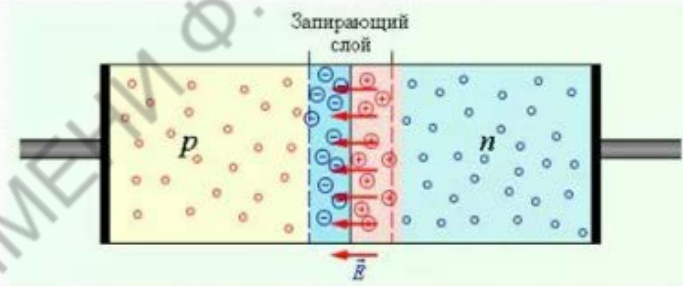


КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

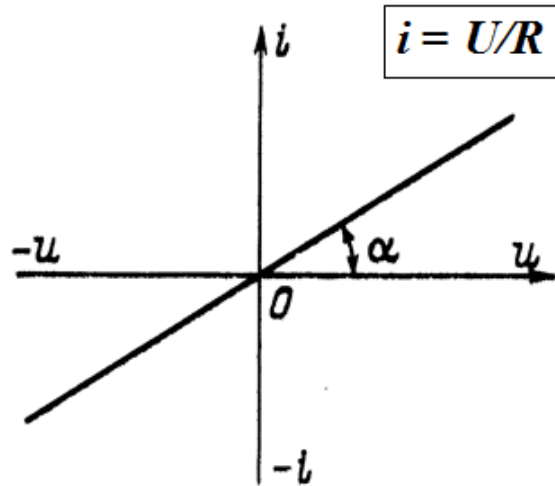
p- и n- типа

Электрический ток через p-n переход

- Образование запирающего слоя при контакте полупроводников p- и n-типов (диффузия электронов и дырок)
- Вольт-амперная характеристика кремниевого диода.

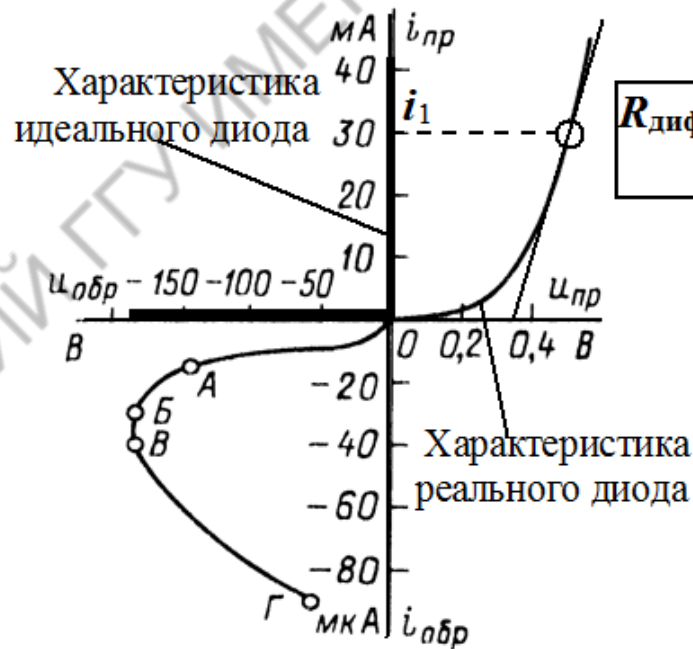


р- и п- типа



Вольт-амперная характеристика линейного прибора

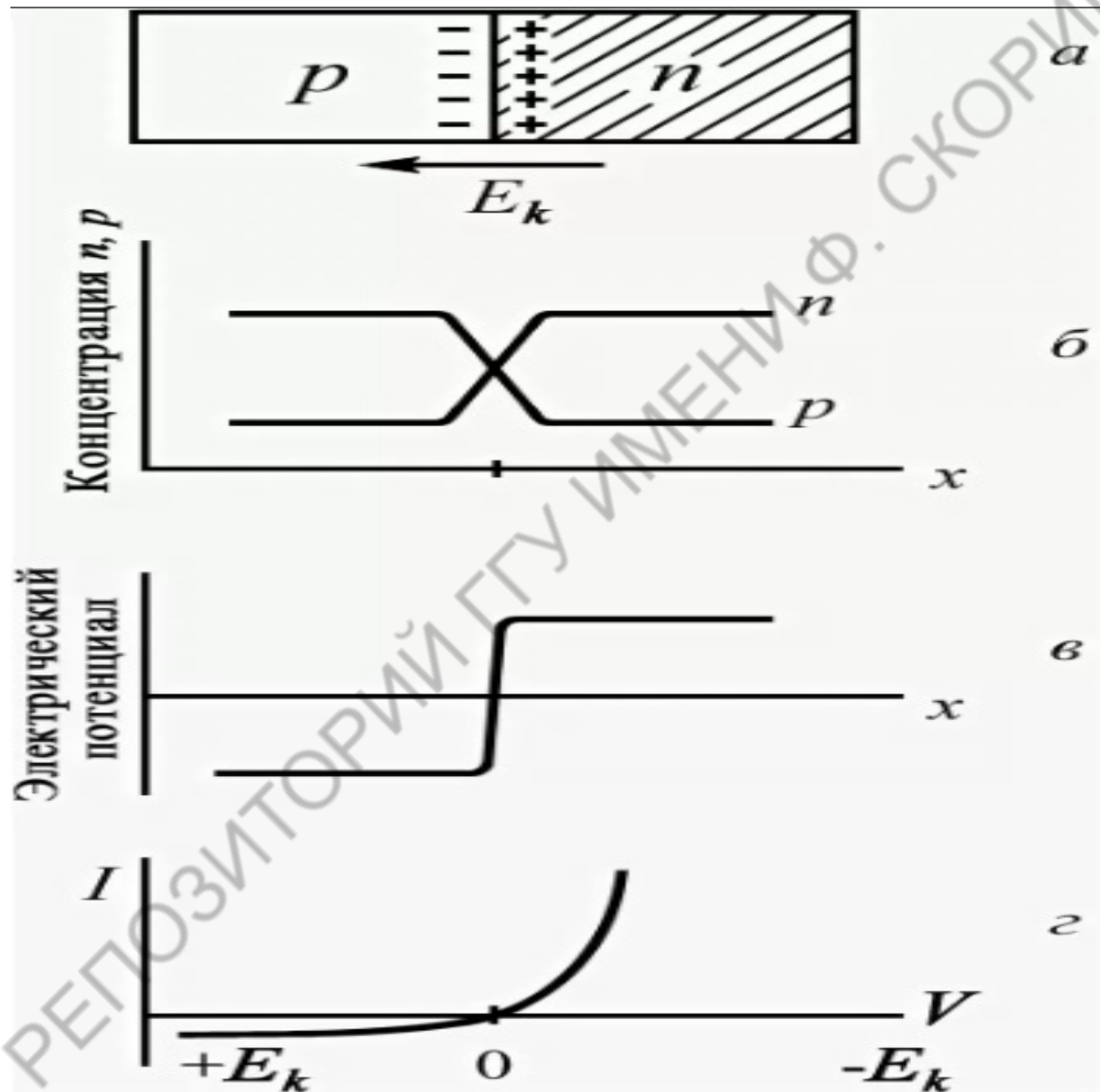
Вольт-амперная характеристика идеального и реального полупроводникового диода



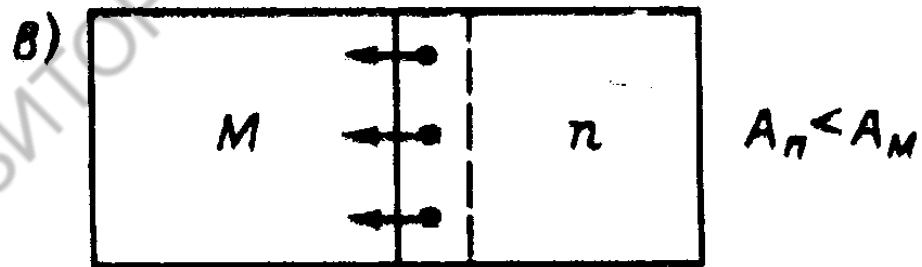
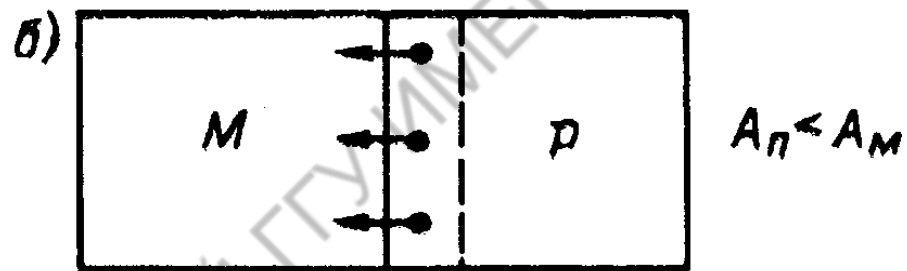
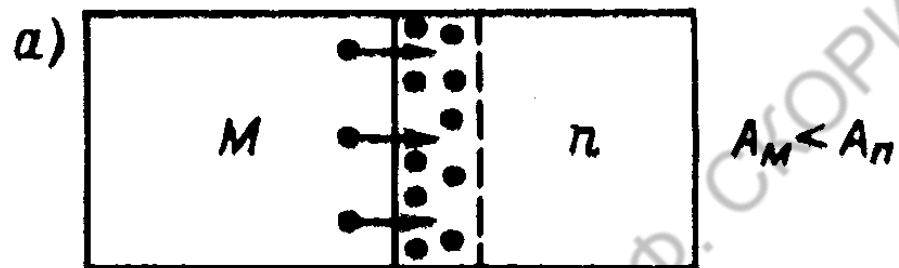
$$R_{\text{диф. пр.}} = dU/di$$

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

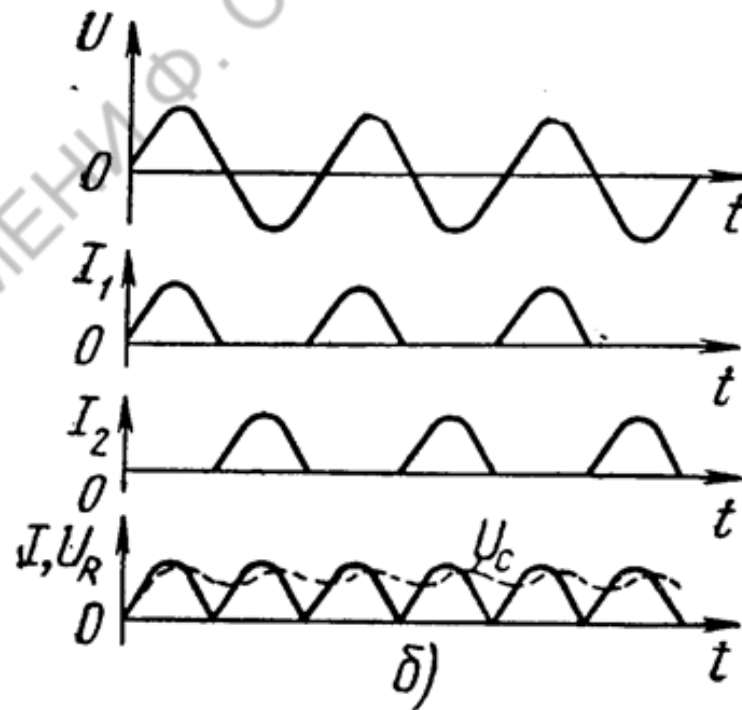
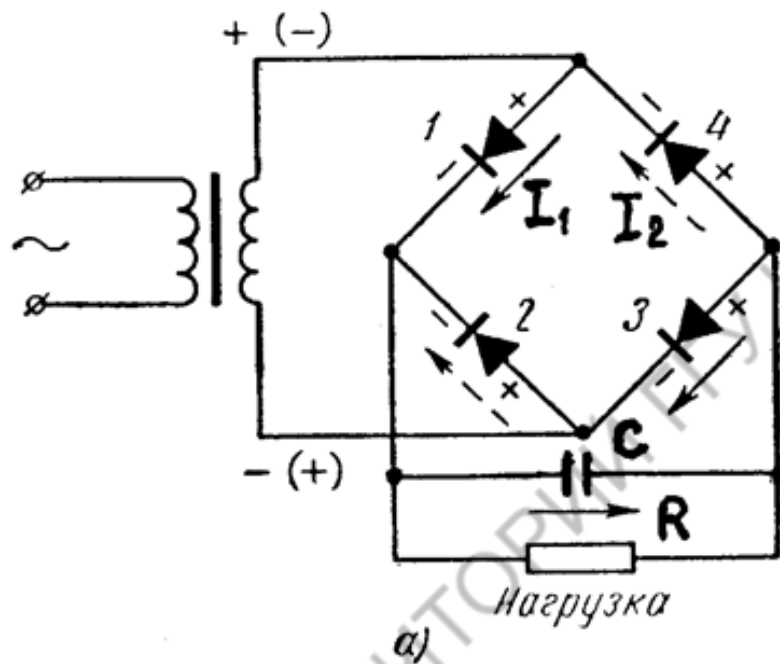
р- и п- типа



КОНТАКТ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК



МОСТОВАЯ СХЕМА ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ И РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ В НЕМ

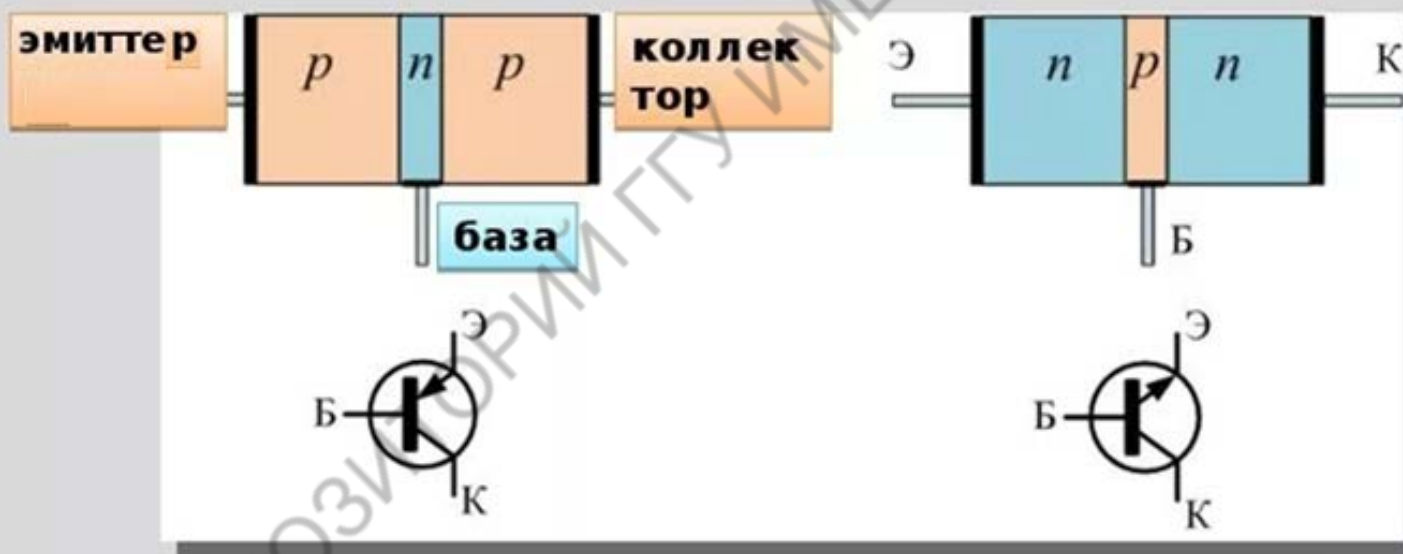


КОНТАКТ ТРЕХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

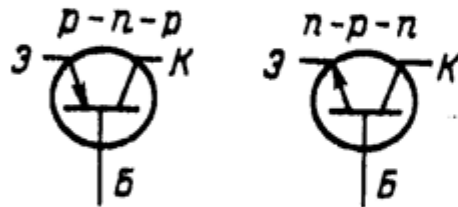
p- и n- типа

Транзистор – кристалл с двумя *p-n*-переходами

По типу чередования дырочной и электронной проводимостей:

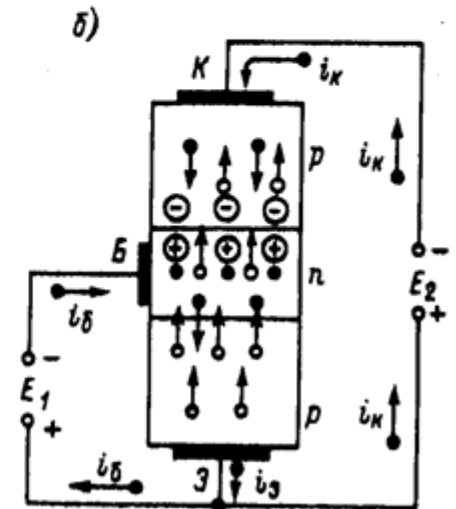
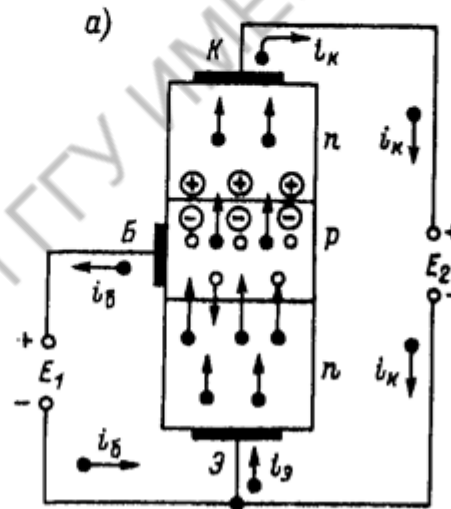


р- и п- типа



Движение электронов и дырок в транзисторах:

а) - типа $p-p-p$; б) - типа $p-p-p$



КОНТАКТ ТРЕХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и п- типа

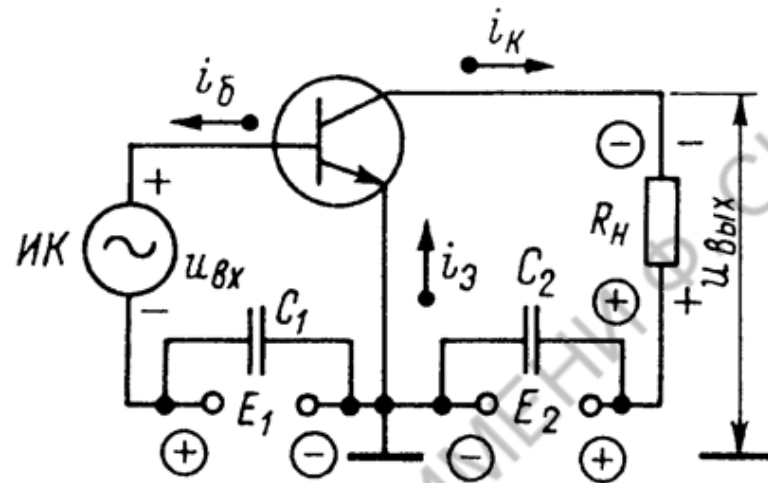


Схема включения транзистора с общим эмиттером

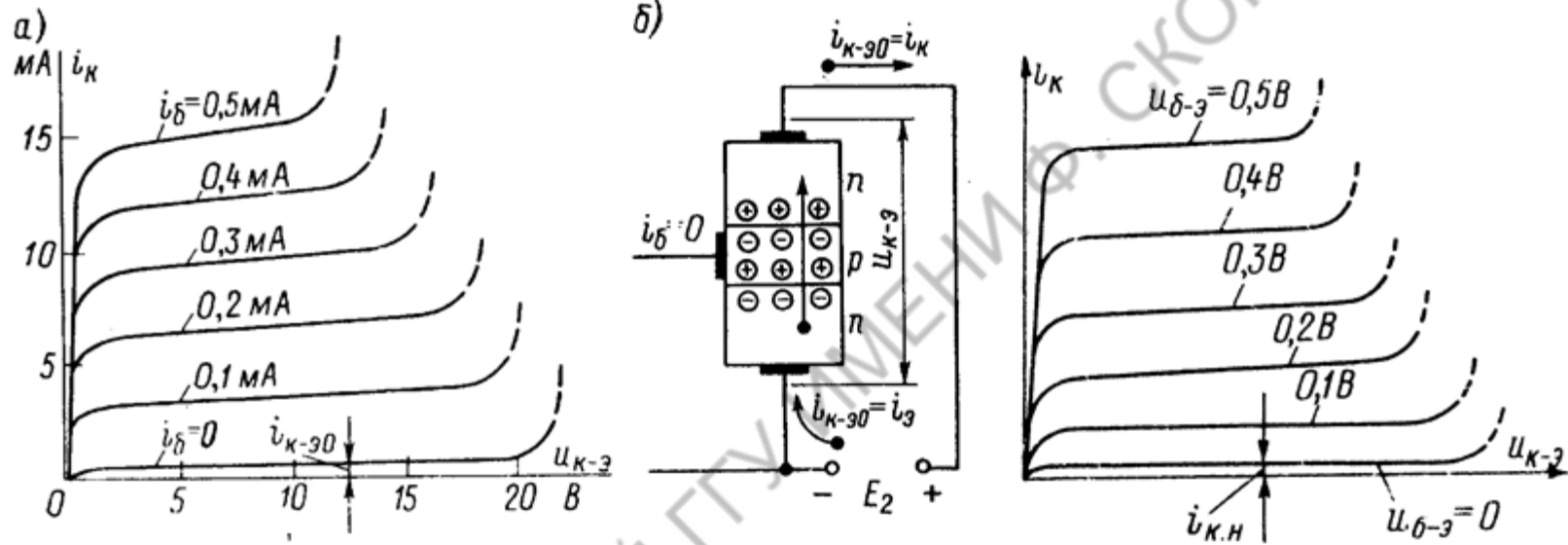
Коэффициент усиления по току k_i (десятки единиц) представляет собой отношение амплитуд выходного и входного переменного тока, т. е. переменных составляющих токов коллектора и базы:

$$k_i = I_{m\text{ вых}} / I_{m\text{ вх}} = I_{m\text{ к}} / I_{m\text{ б}}$$

Статический коэффициент усиления по току β (десятки – сотни единиц) или коэффициентом передачи тока для схемы ОЭ (его определяют в режиме без нагрузки, т.е. $R_n = 0$):

$$\beta = \Delta i_k / \Delta i_b \text{ при } U_{к-э} = \text{const}$$

КОНТАКТ ТРЕХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и п- типа

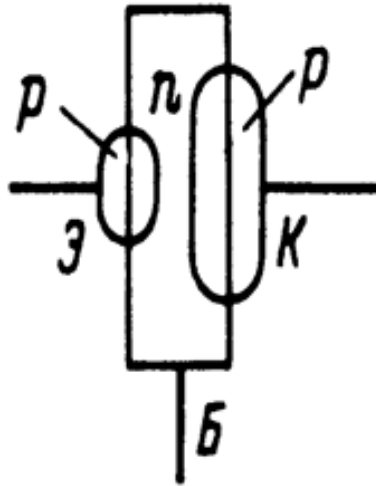


Выходные характеристики транзистора при постоянном токе базы (а,б, слева) при включении по схеме ОЭ

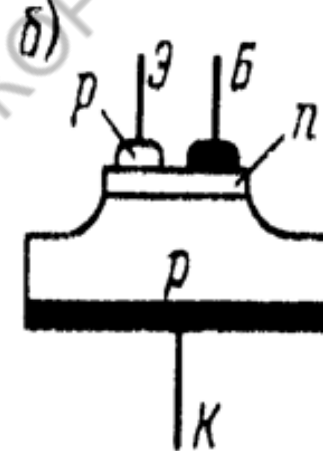
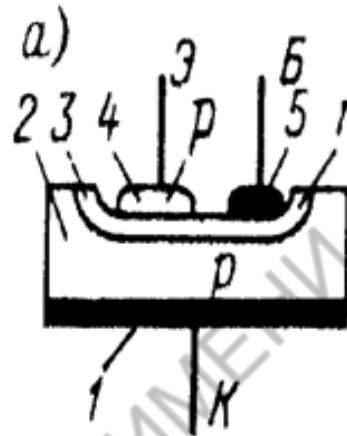
Выходные характеристики транзистора при постоянном напряжении база-эмитер (справа)

КОНТАКТ ТРЕХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

р- и п- типа



Принцип устройства
сплавного транзистора

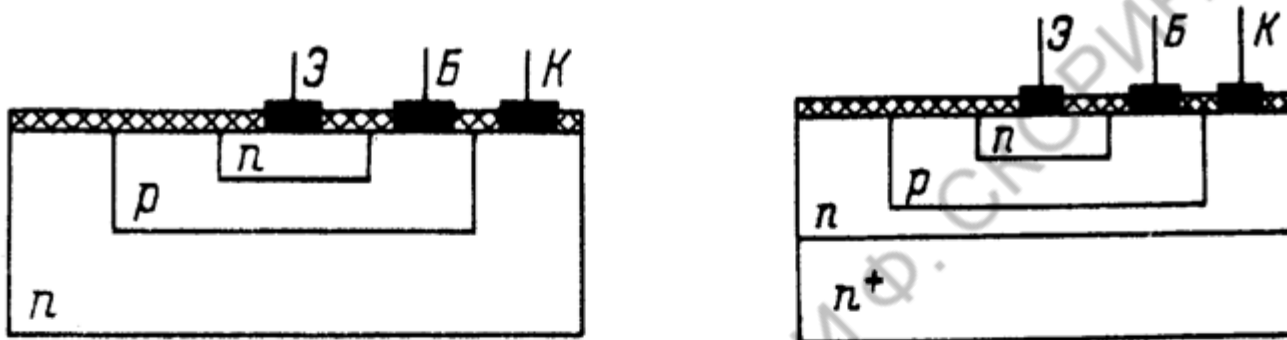


Принцип устройства *сплавно-диффузионного* транзистора (а) и мезатранзистора (б)

1 - основание коллектора; 2 - коллектор (исходный материал); 3 - диффузионный слой базы; 4 - эмиттерный сплав; 5 - сплав для вывода базы

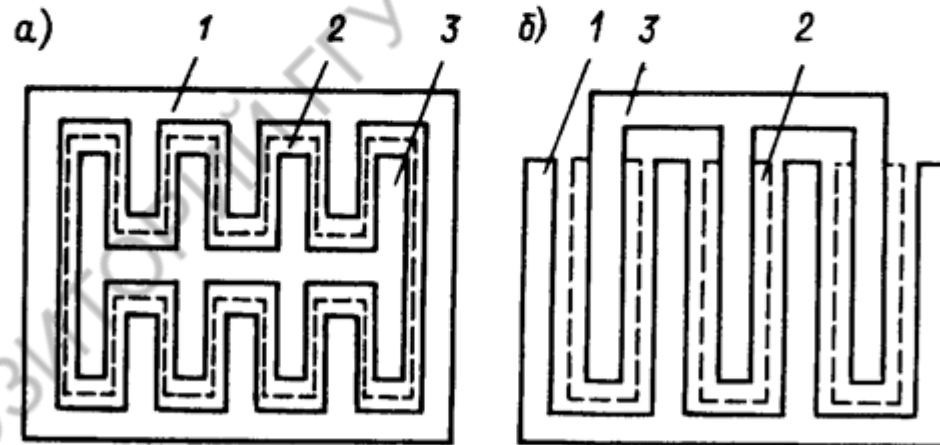
КОНТАКТ ТРЕХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

р- и п- типа



Принцип устройства *планарного транзистора* (слева)

Принцип устройства *планарно-эпитаксиального транзистора* (справа)



Конфигурация электродов мощных СВЧ-транзисторов: а – гребенчатая;
б – многоэмиттерная. 1 – вывод базы; 2 – эмиттерная область; 3 – вывод эмиттера

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ р- и п- типа

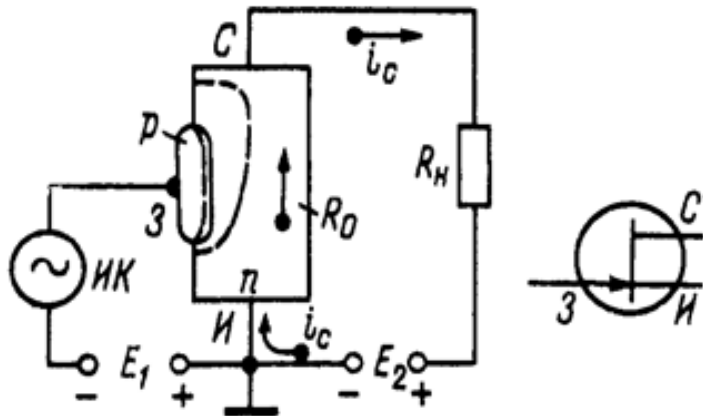
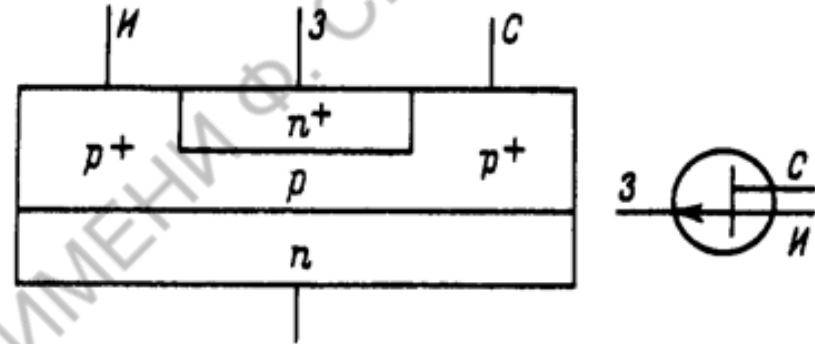


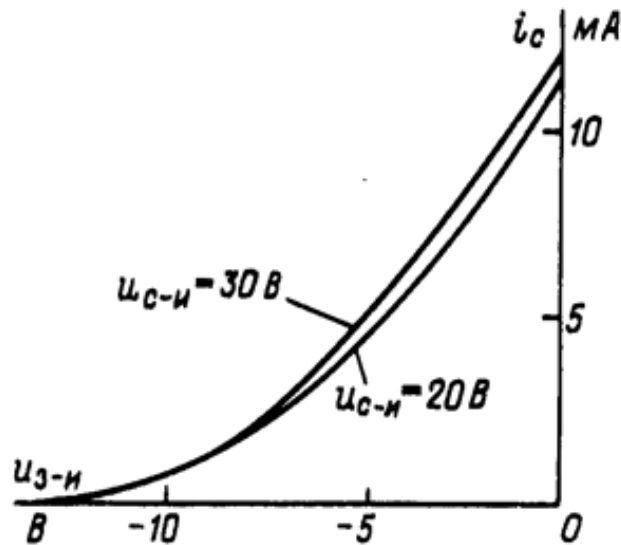
Схема включения и условное графическое обозначение полевого транзистора с $n-p$ -переходом и каналом n -типа



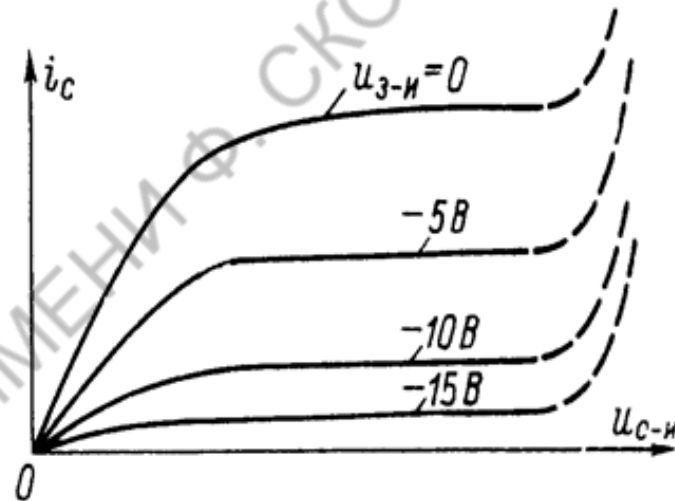
Принцип устройства и условное графическое обозначение планарно-эпитаксиального полевого транзистора с каналом p -типа

КОНТАКТ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

р- и п- типа

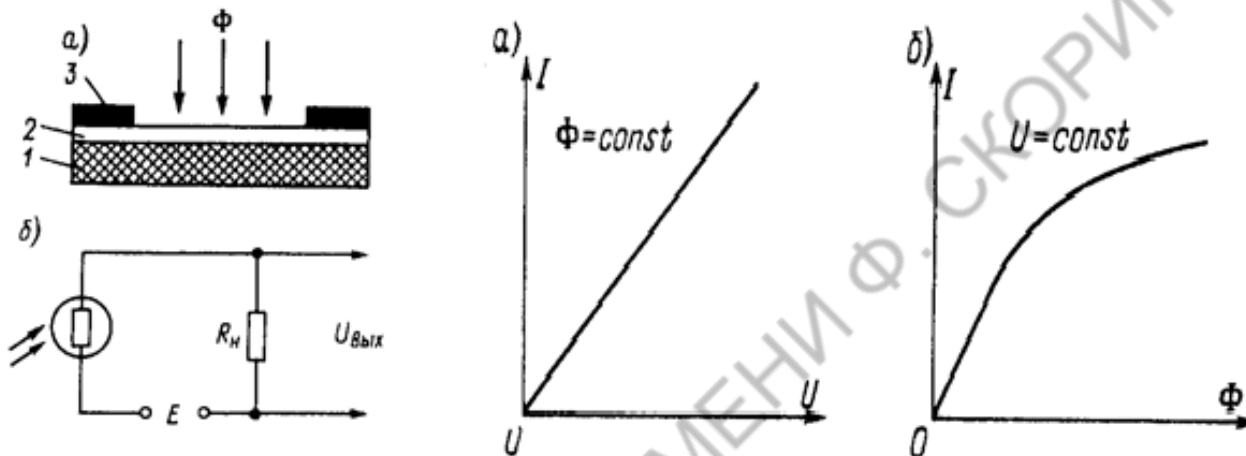


Управляющие (стокзатворные) характеристики
полевого транзистора с каналом n -типа (слева)

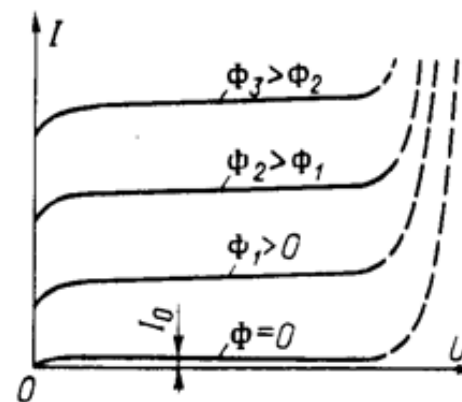
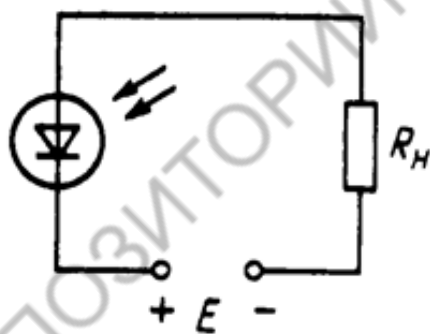


Выходные (стоковые) характеристики полевого
транзистора с каналом n -типа (справа)

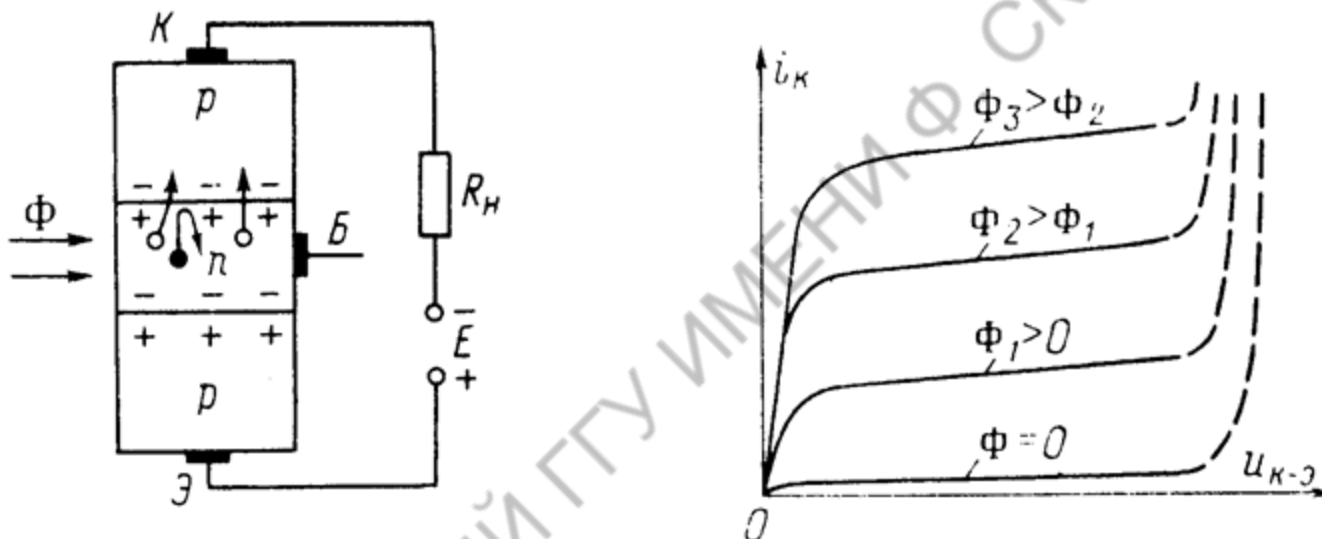
ФОТОЭФФЕКТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$$S_{\text{уд}} = I/(\Phi U),$$



ФОТОЭФФЕКТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



Структура и схема включения фототранзистора со «свободной» базой (слева)

Выходные характеристики фототранзистора (справа)

ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМОТЕХНИКА

Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие микроэлектроники, которая занимается разработкой интегральных микросхем.

Они состоят из множества соединенных между собой микроэлектронных компонентов: транзисторов, резисторов, конденсаторов и диодов, изготовленных в поверхностном слое кристалла :

