

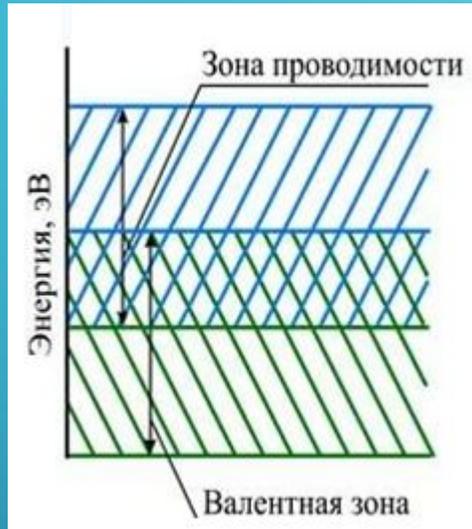


# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ПОЛУПРОВОДНИКИ

# Материалы

## Проводники

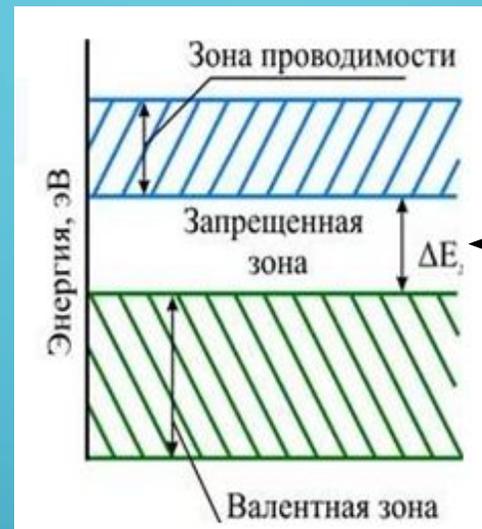


Тип связи -  
металлическая

Носители заряда -  
электроны

$$\rho = 1,58 - 1000 \cdot 10^{-8}$$

## Полупроводники



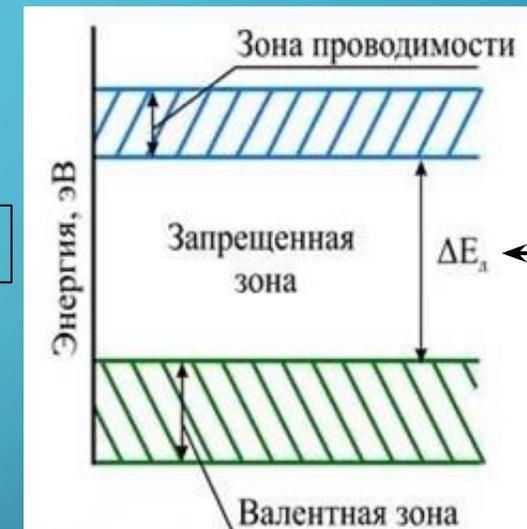
0,05-3 эВ

Тип связи —  
ковалентная, ионная

Носители заряда —  
электроны, дырки

$$\rho = 10^{-6} - 10^9$$

## Диэлектрики



> 3 эВ

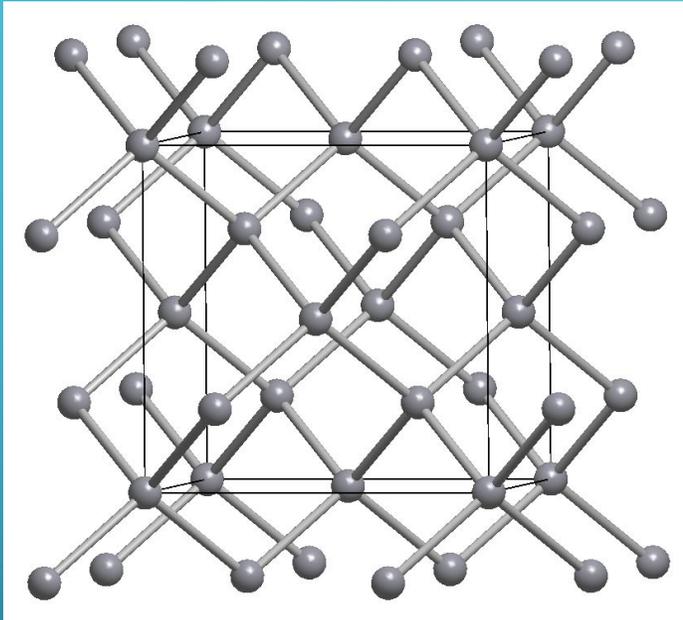
Тип связи —  
ковалентная, ионная

Нет свободных  
носителей заряда

$$\rho = 10^9 - 10^{16}$$

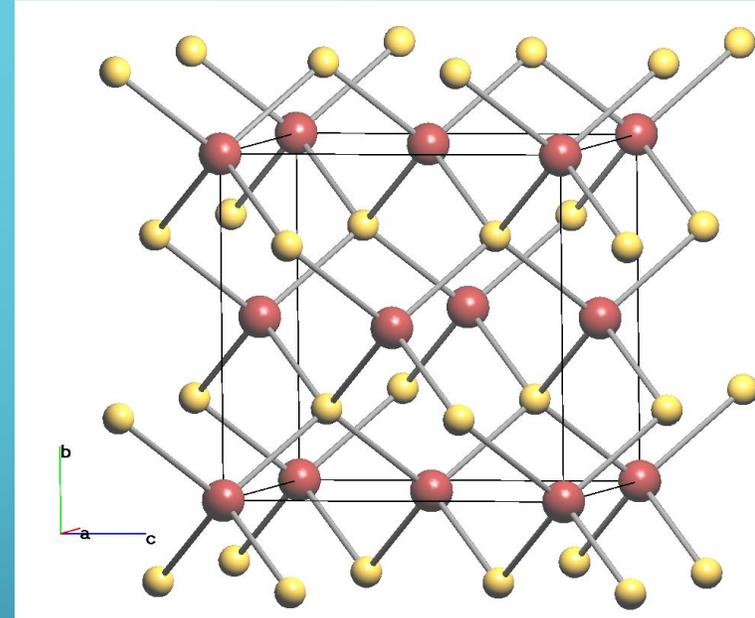
# Электрические свойства полупроводников

## Алмаз



Si, Ge -4e

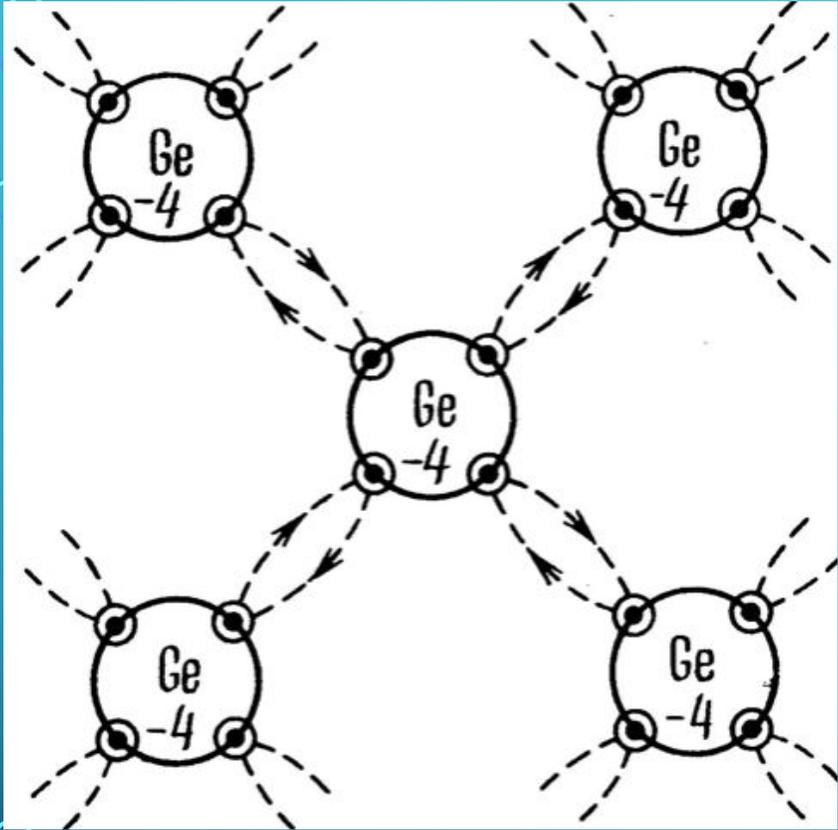
## Сфалейт



A(II)B(VI) CdS, CdTe,  $\alpha$ -ZnS

A(III)B(V) GaAs, GaP,

InSb, InP, AlP, AlSb, <sup>3</sup>



Si, Ge связь

$(4e) + (4e) = 8$  e оболочка

ковалентная неполярная

A(III)B(V)

IIIA (B, Al, Ga, In) + VB (N, P, As, Sb)

$A(3e) + B(5e) = 8$  e оболочка

A(II)B(VI),

IIA (Zn, Cd) + VIA (S, Se, Te)

$A(2e) + B(6e) = 8$  e оболочка

A → B, ковалентная полярная

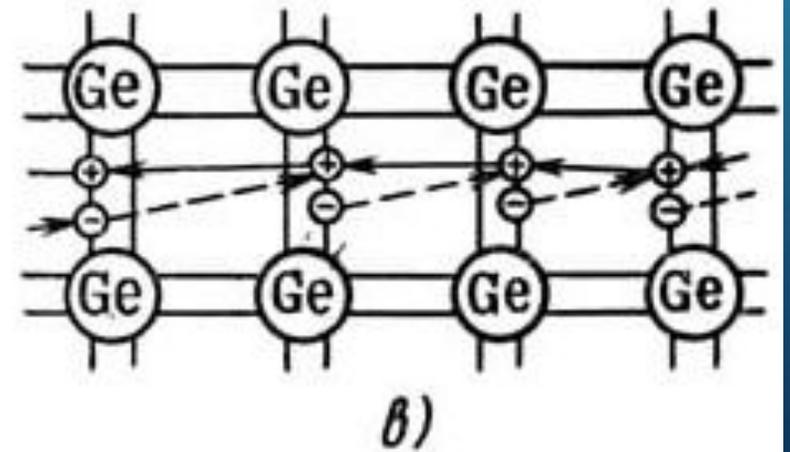
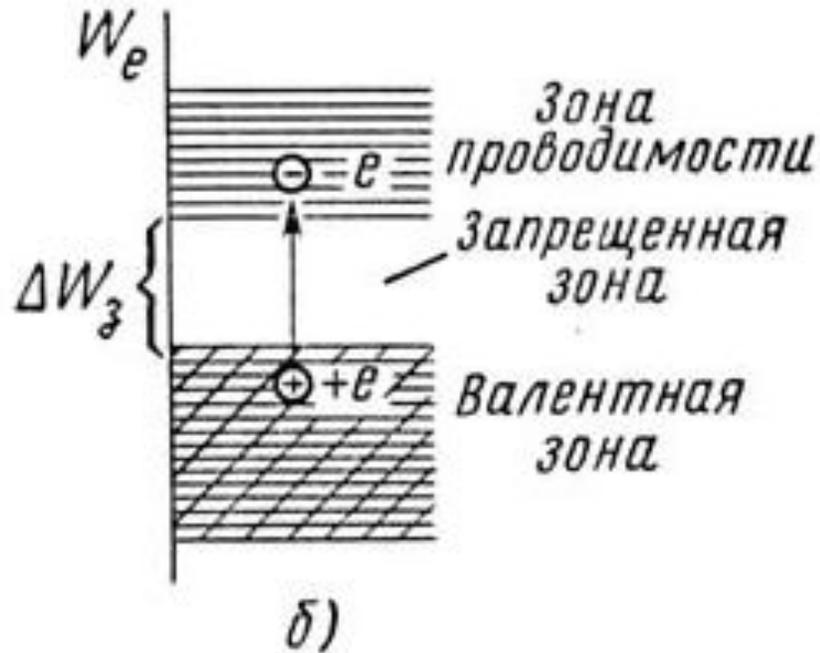
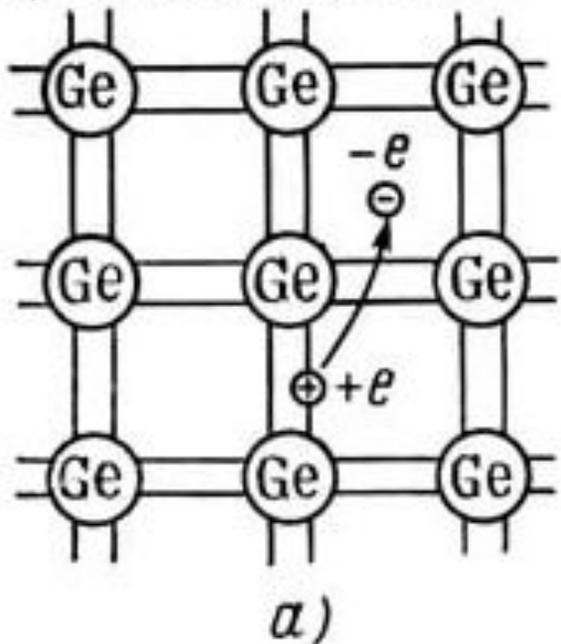
Халькогениды свинца

– ионная связь

$$Z_{\text{ср}} = (Z_A + Z_B)$$

# Собственные носители заряда

Кристалл германия



а – образование носителей заряда,

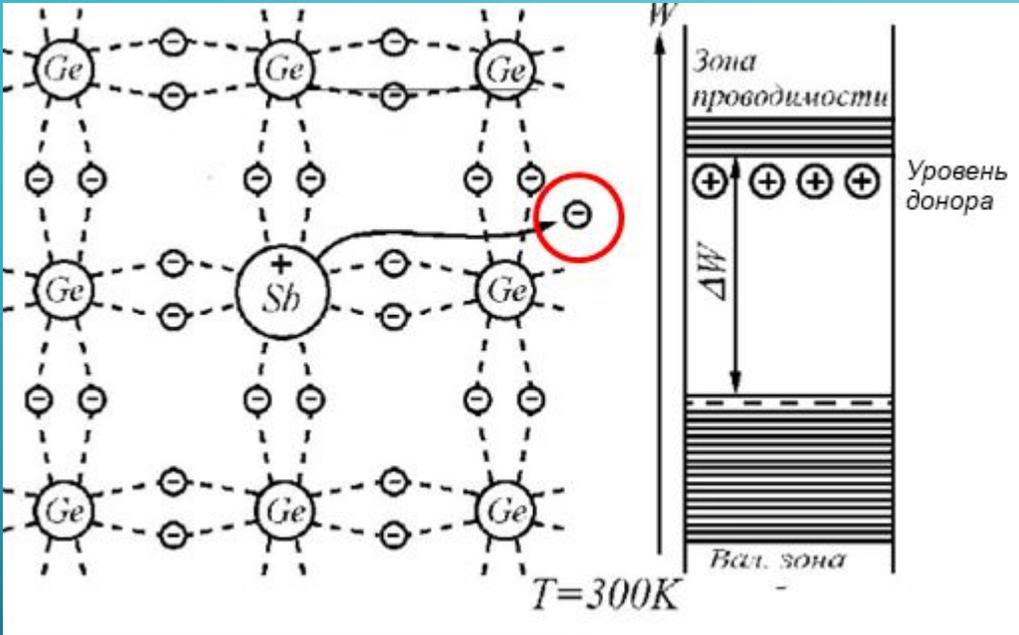
б – энергетическая шкала,

в – перемещение носителей заряда под действием напряжения

Связанная пара электрон-дырка - экситон

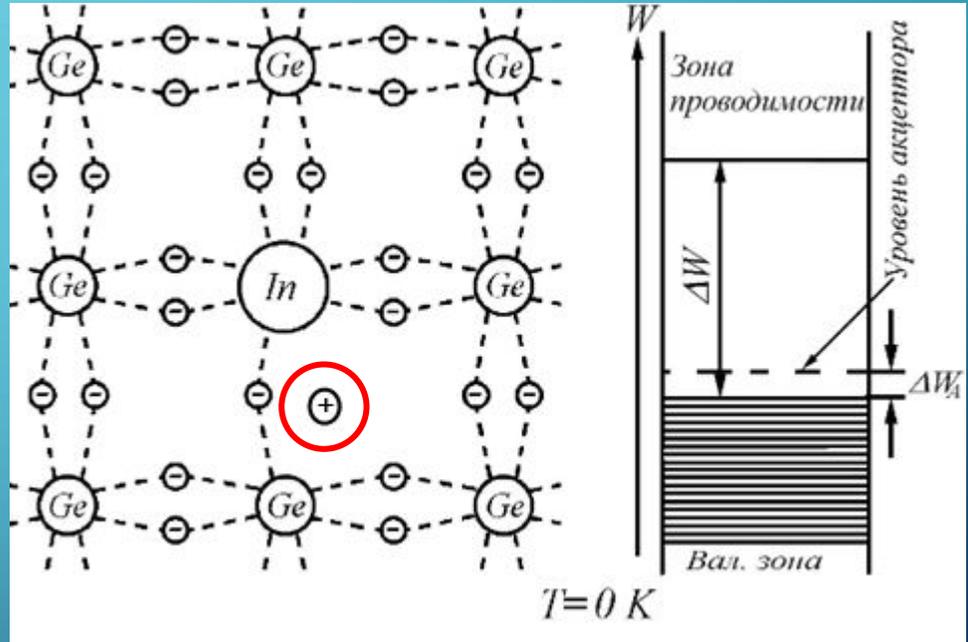
# Примесные носители заряда

## Примесь Sb (5e)



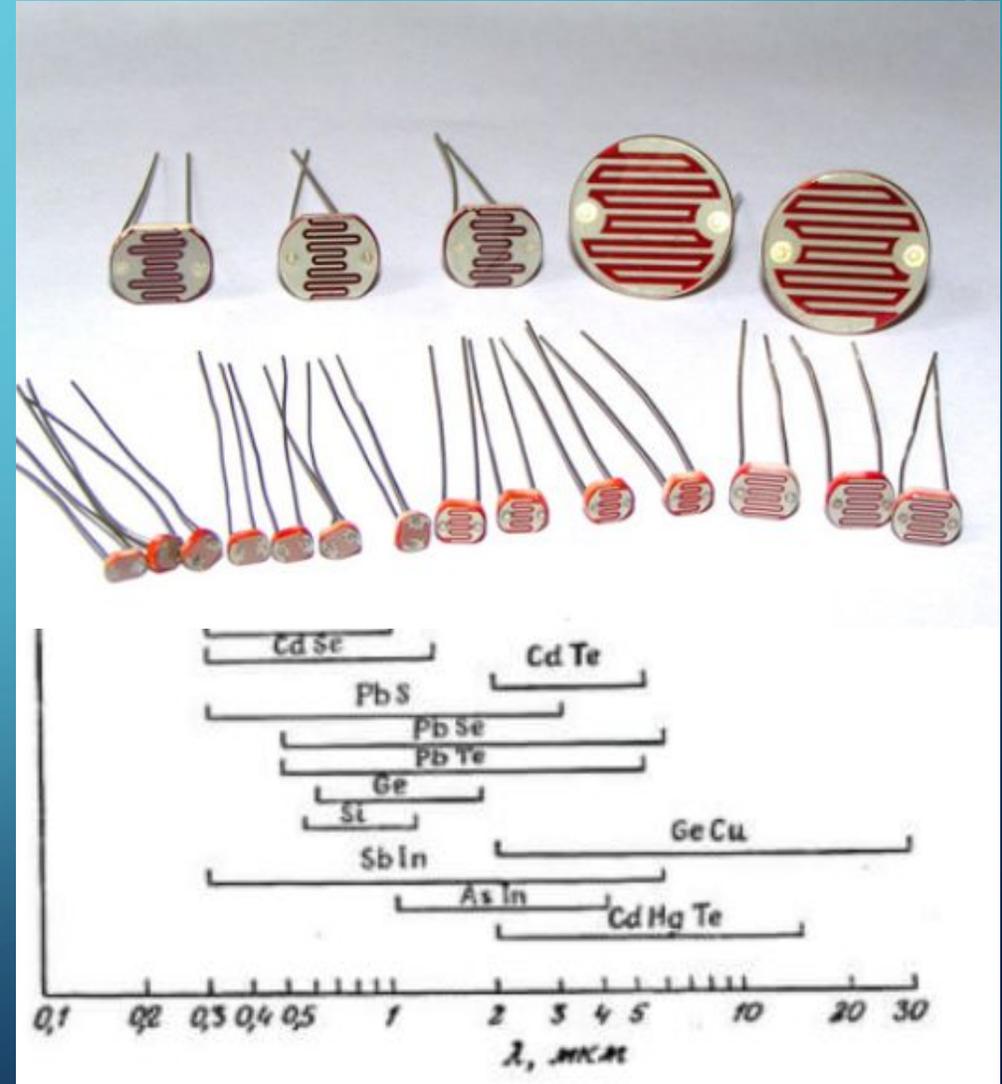
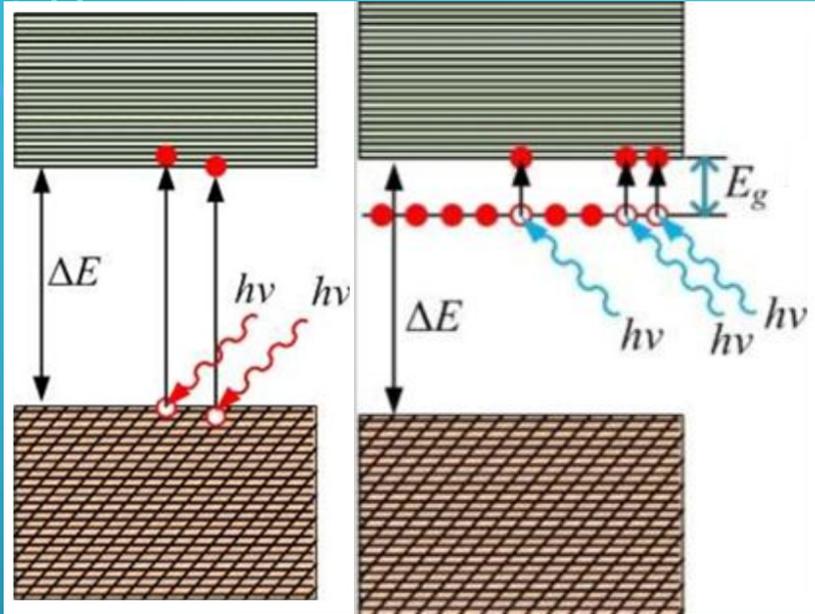
Донор e  
электронная проводимость  
n-типа (negative)

## Примесь In (3e)



Акцептор e  
дырочная проводимость  
p-типа (positive)

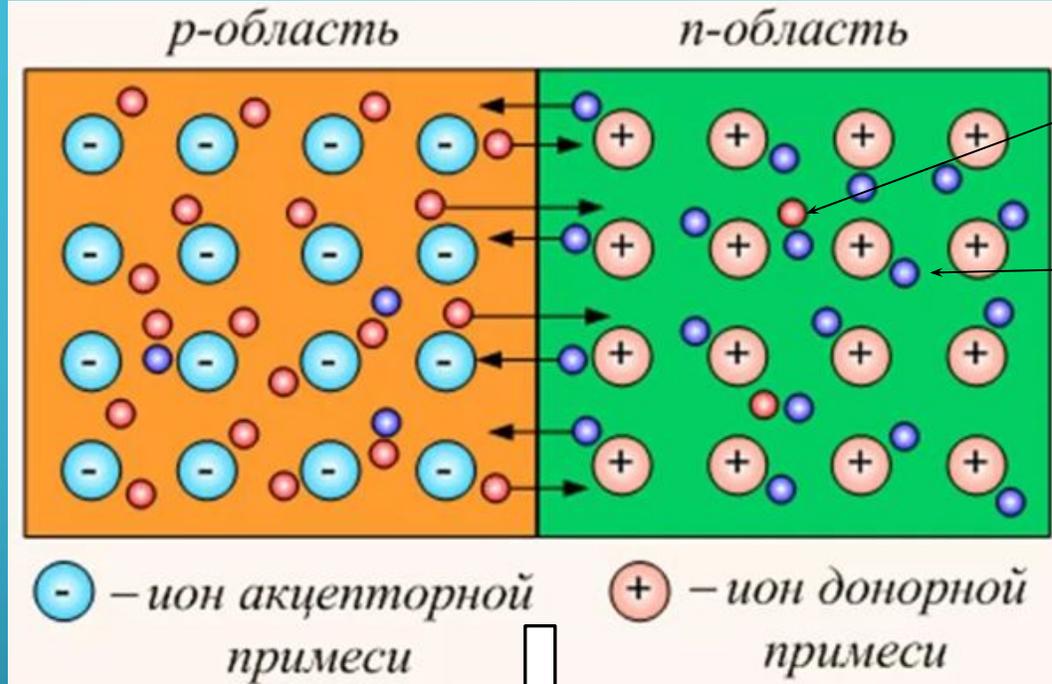
# Фотопроводимость



Фоторезисторы  
CdS, ZnS, CdSe

Фотореле, сигнализация,  
датчики наличия, датчики  
светоосвещенности

# p-n (электронно-дырочный) переход

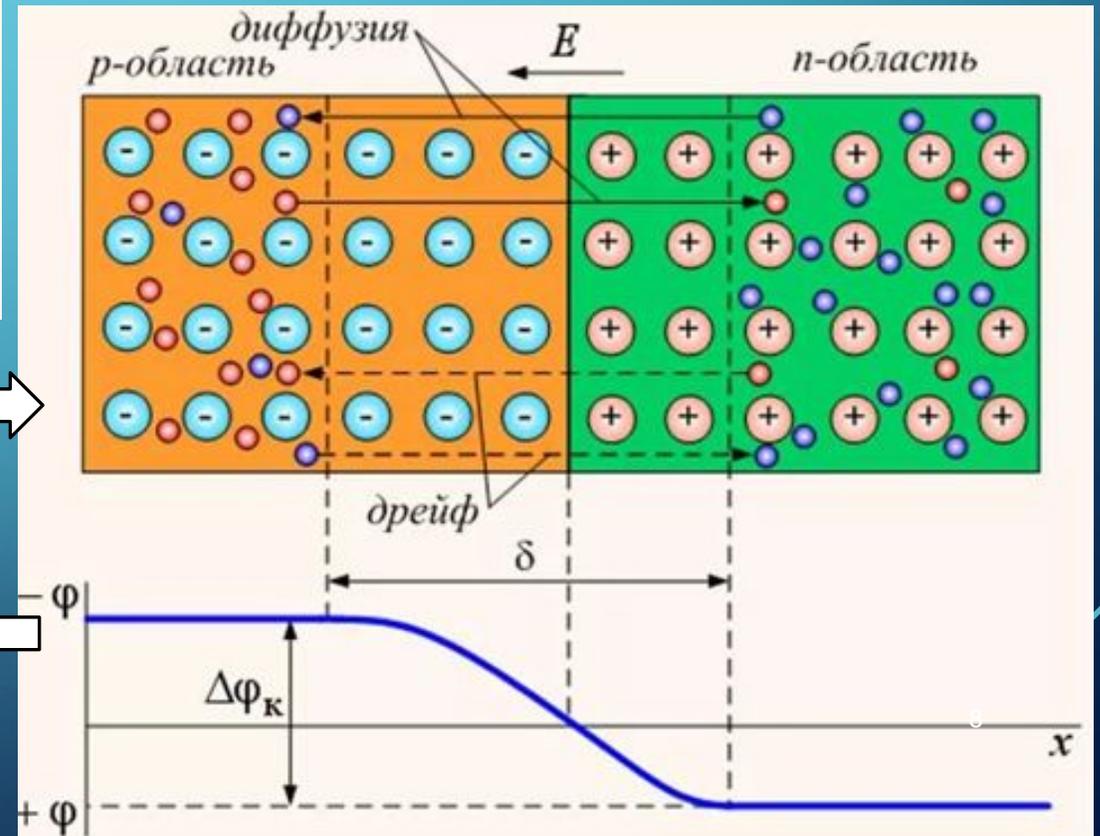


дырка

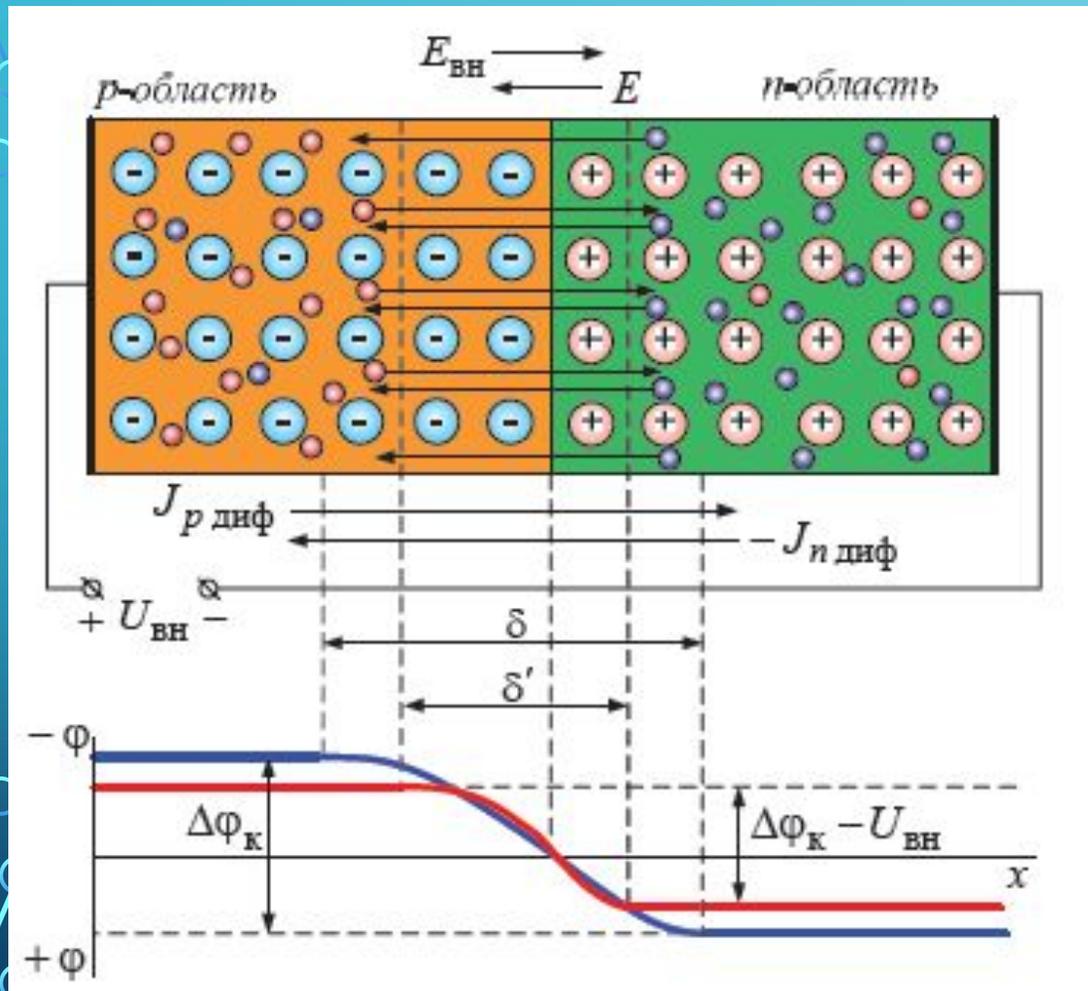
электрон

Диффузия носителей заряда

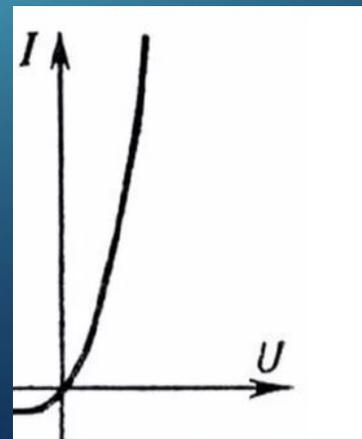
Возникновение слоя двойного заряда – запирающего слоя



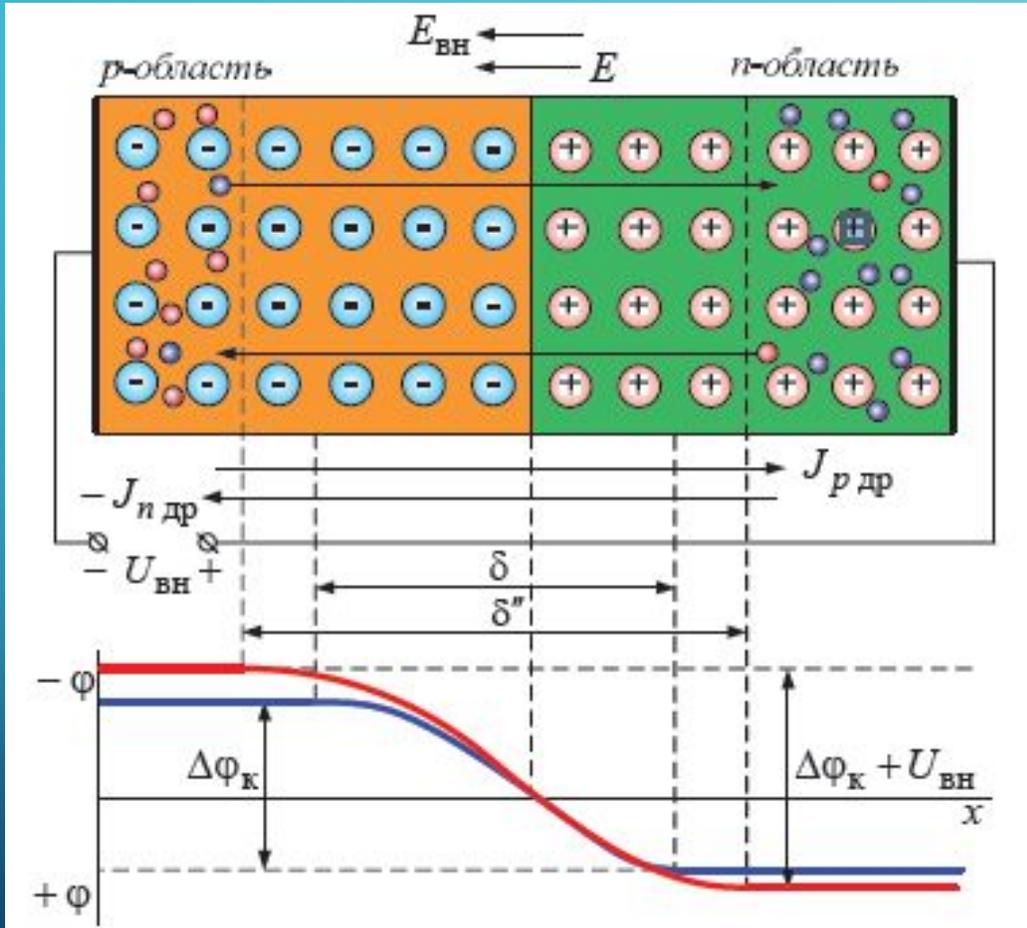
# Прямое включение р-п перехода



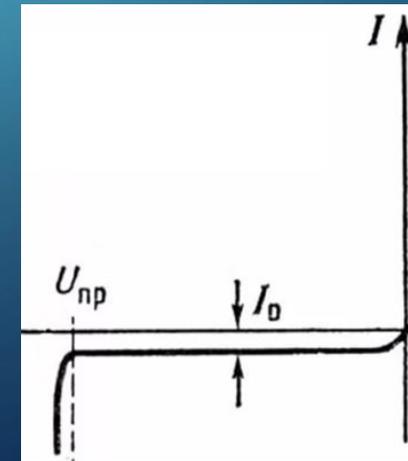
+ источника к р-области  
- источника к п-области  
Движение е источника  
увеличивает поток носителей  
Высота барьера понижается  
При  $\uparrow$  силы тока, напряжение  $\uparrow$



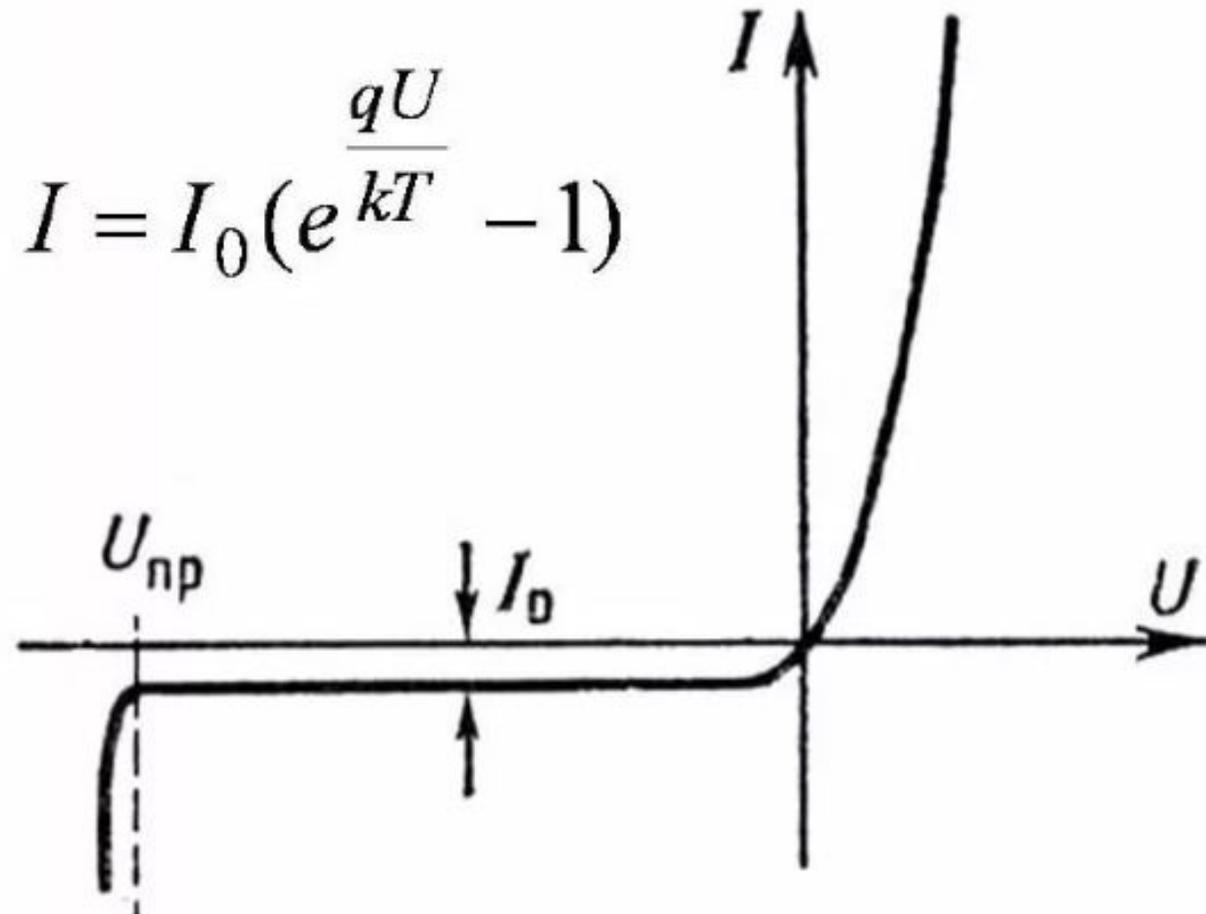
# Обратное включение р-п перехода



- источника к р-области  
+ источника к n-области  
Поток носителей не меняется  
Высота барьера увеличивается  
При  $\uparrow$  силы тока,  
напряжение const



# Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p-n перехода



- Транзисторы
- Фотодиоды
- Стабилизаторы напряжения
- Полупроводниковые лазеры
- Солнечные батареи
- Микросхемы

# ВЫВОДЫ

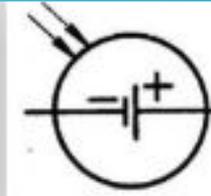
В результате диффузии в р-п переходе возникает электрическое поле – потенциальный барьер, препятствующий выравниванию концентраций носителей заряда.

При прямом подключении источника тока потенциальный барьер понижается и через р-п переход идет ток

При обратном подключении источника тока потенциальный барьер повышается и через р-п переход ток практически не идет.

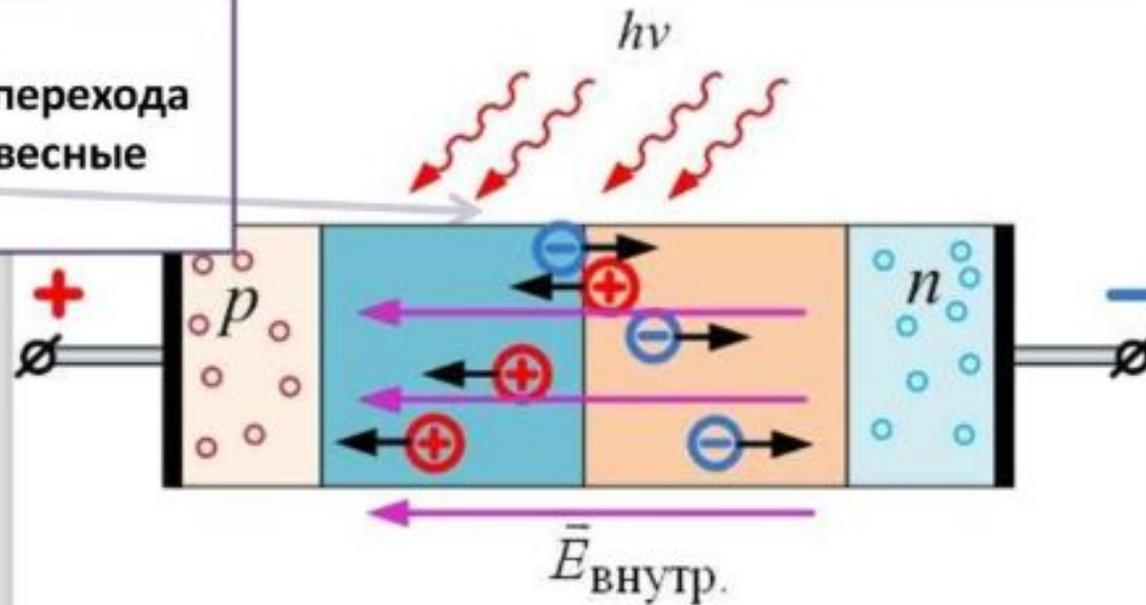
Р-п переход образуется на границах р- и п- областей, созданных в кристалле полупроводника

## Вентильный фотоэффект



В основе работы – внутренний фотоэффект

Под действием света в запирающем слое  $p$ - $n$ -перехода генерируются неравновесные носители заряда



Внутреннее поле «растаскивает» носители заряда: дырка движется в сторону полупроводника  $p$ -типа, а электрон – в сторону полупроводника  $n$ -типа

Возникает разность потенциалов – фото-ЭДС

## Вентильный фотоэффект

Световая энергия в солнечных батареях непосредственно преобразуется в электрическую

### Недостатки солнечных батарей:

- малый КПД (12÷16%)
- хрупкость
- дороговизна

### Преимущества:

- экологическая чистота;
- возобновляемый альтернативный источник энергии, в отличие от ископаемых – угля и газа;
- можно использовать там, где нет линий электропередач, а солнечного света достаточно (в пустынях или на искусственных спутниках Земли)



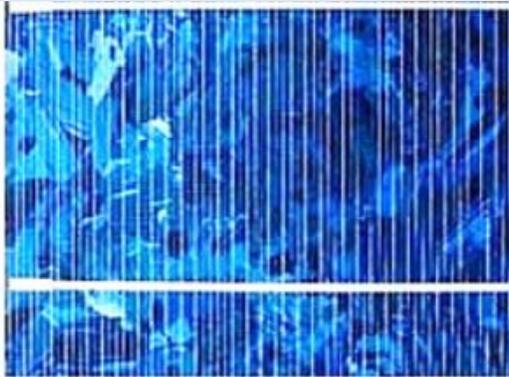
# Солнечные батареи

## Кремниевые

Поликристаллические

Монокристаллические

Аморфные



Солнечный элемент из поликристаллического кремния

## Плёночные

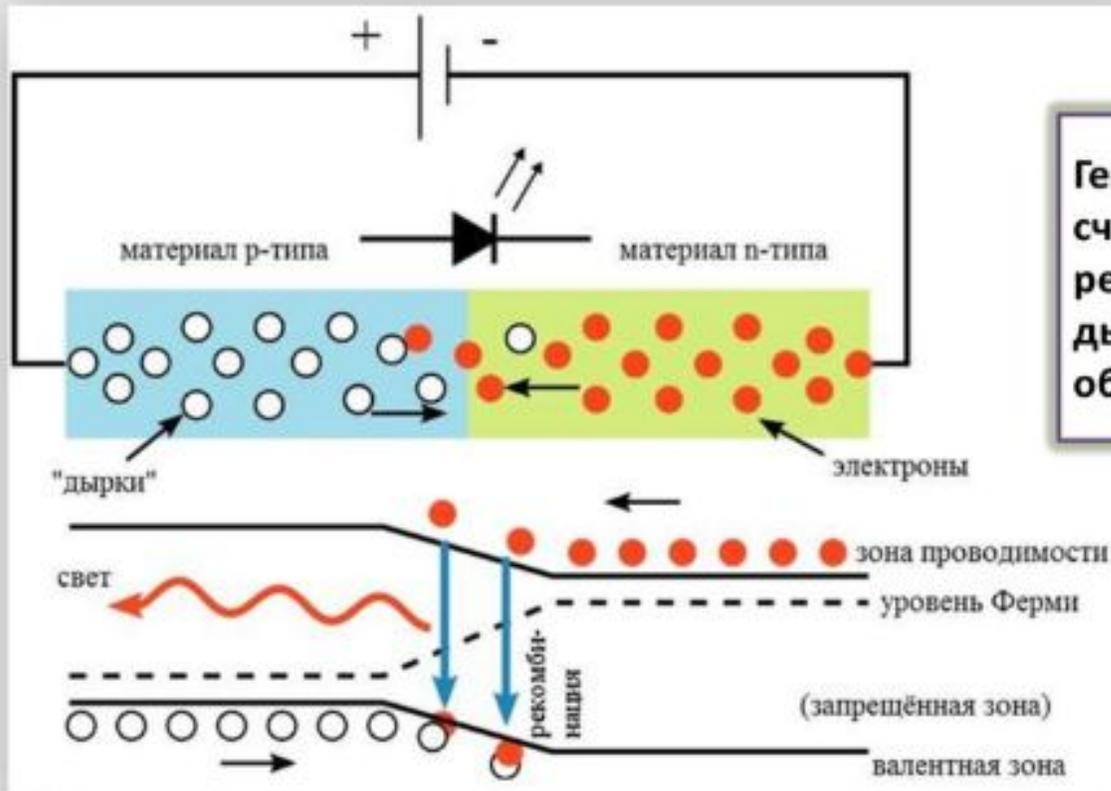
На основе теллурида кадмия

На основе селенида меди-индия

Полимерные

## Светодиод

Светодиод – ещё один прибор на основе  $p-n$ -перехода  
Принцип работы – обратный вентильному фотоэффекту:  
если через  $p-n$ -переход пропускать электрический ток, возникает излучение



Генерация света происходит за счет энергии, выделяемой при рекомбинации электронов и дырок на границе  $p$ - и  $n$ -областей

# История создания светодиода

Генри Раунд  
Маркони Рабс,  
1903  
синий, SiC

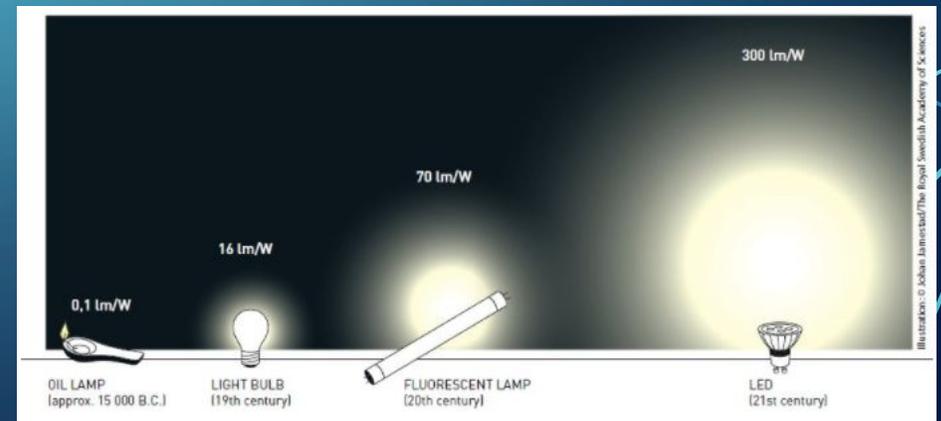


О. Лосев,  
световое реле  
1927  
синий, SiC

General  
Electric  
1962  
GaAs  
красный  
зеленый

Синий  
GaN 1971  
( $T_{пл}=2000^{\circ}\text{C}$   
 $p=40$  атм)

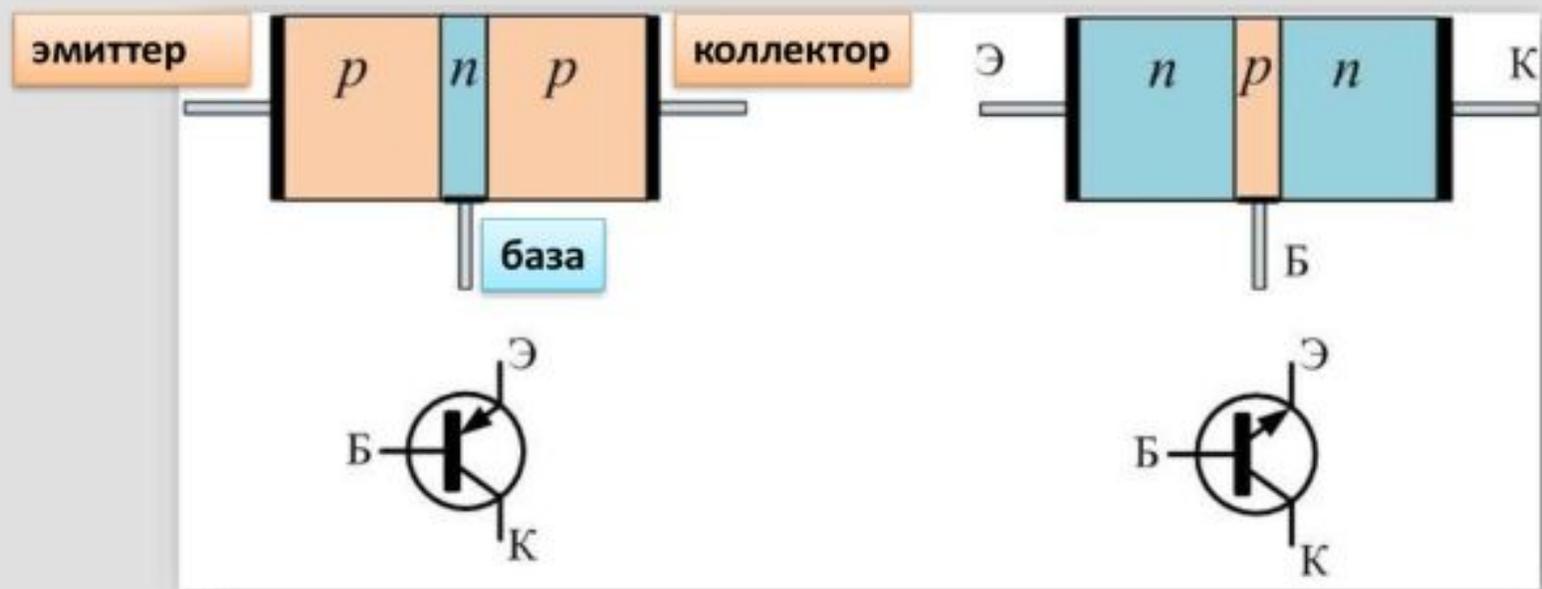
Жорес Алферов  
Гетероструктуры, 1970  
Исаму Акасаки,  
Хироси Амано  
Сюдзи Накамура  
Дешевый синтез синего  
Светодиода, 1990



## Транзистор

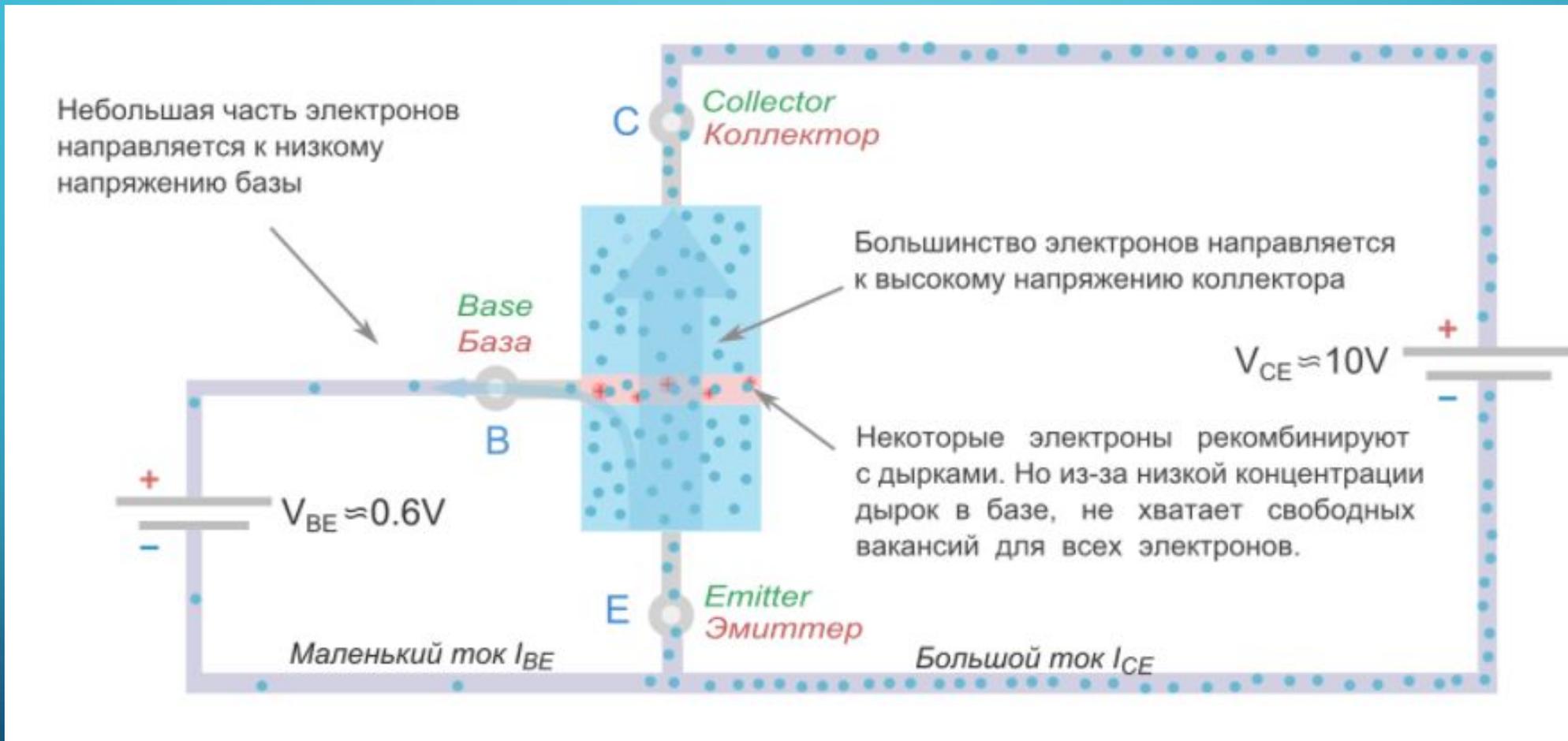
Транзистор – кристалл с двумя  $p$ - $n$ -переходами

По типу чередования дырочной и электронной проводимостей:





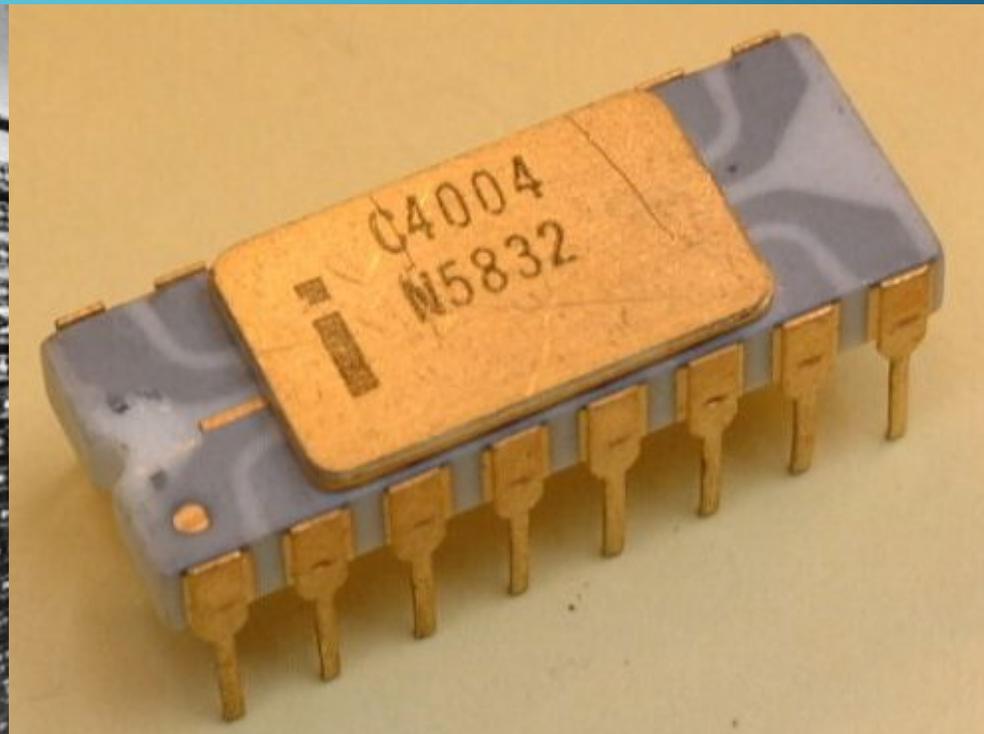
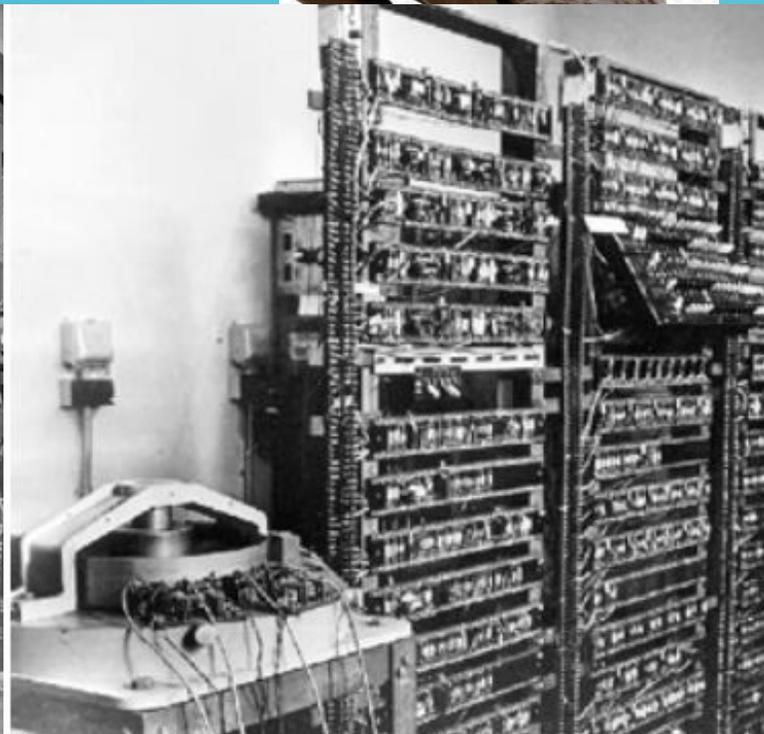
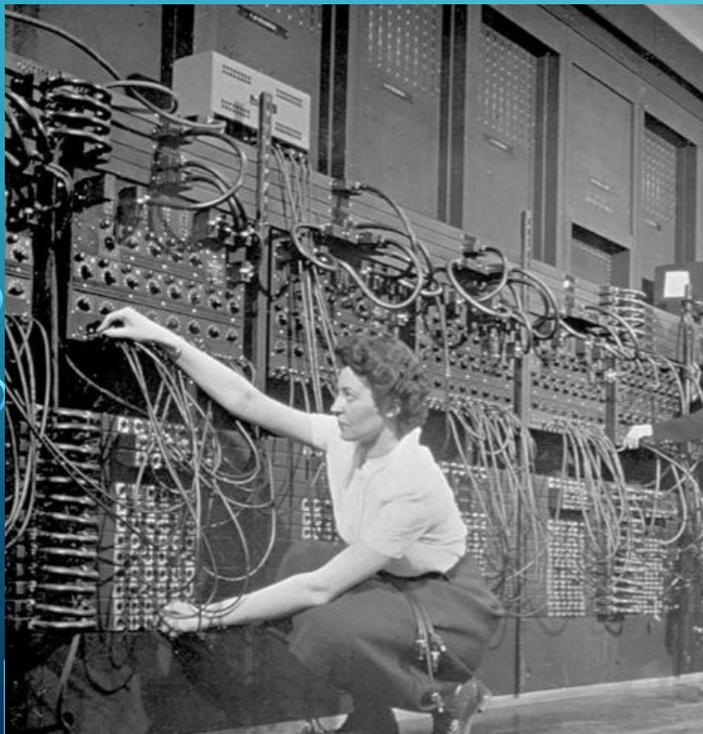
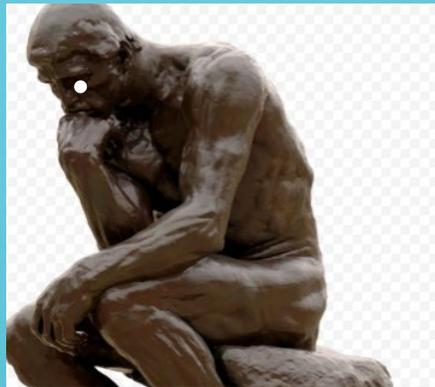
# Принцип работы транзистора



Ток идет

# Принцип работы компьютера

0 или 1?

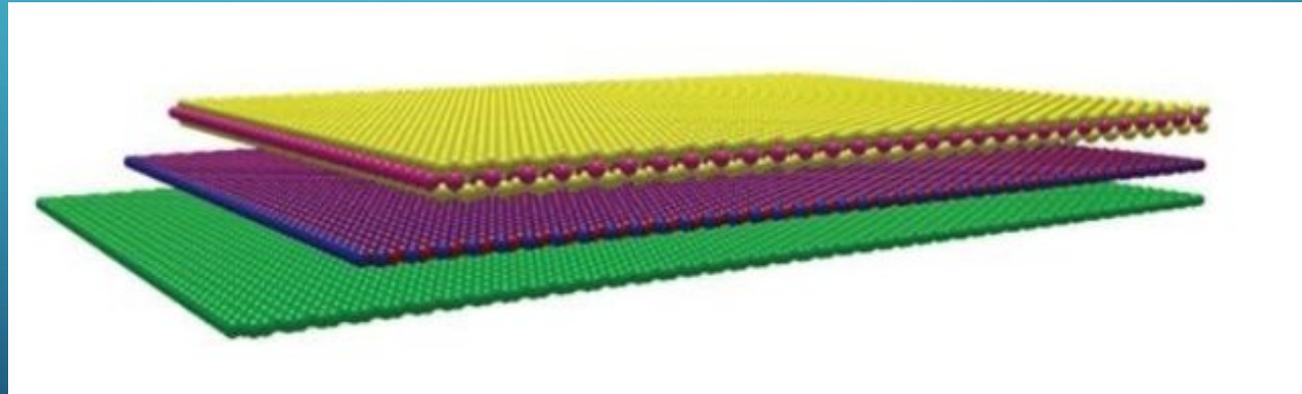
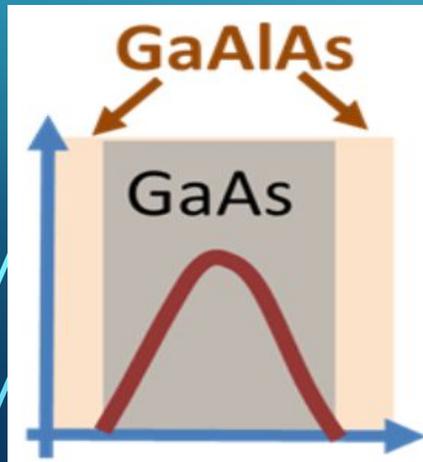


Первый транзисторный компьютер, 1953

Первый микропроцессор, 1971

# Гетероструктура

Гетероструктура — полупроводниковая структура с несколькими p-n гетеропереходами (ГП);. Между двумя различными материалами формируется ГП, на котором возможна повышенная концентрация носителей, и отсюда — вырожденный двумерный электронный газ. Возможность изменять на границах ГП ширину запрещенной зоны и диэлектрическую проницаемость позволяет в гетереструктурах эффективно управлять движением носителей заряда, их рекомбинацией, а также управлять световыми потоками внутри гетереструктур.

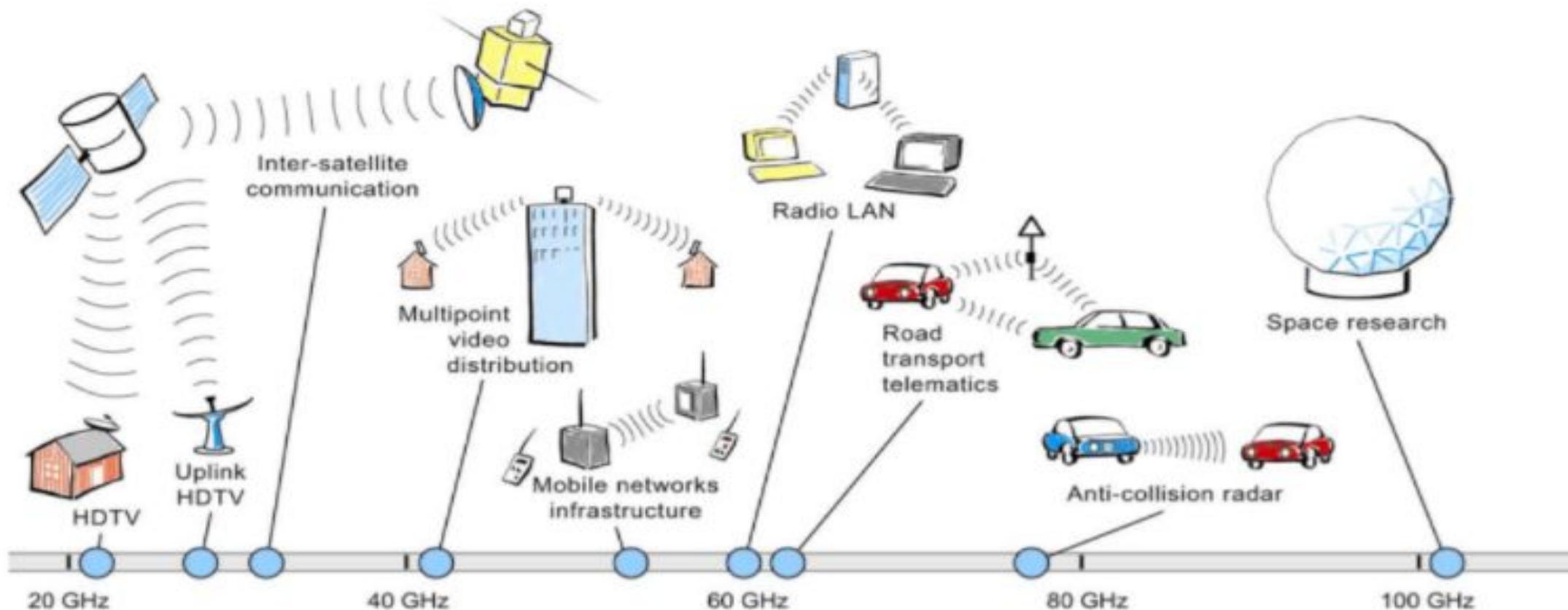


Жорес Алферов, Герберт Крёмер,  
Нобелевская премия 2000



# Применение гетероструктурных транзисторов

## Applications >20 GHz in Europe year 2008

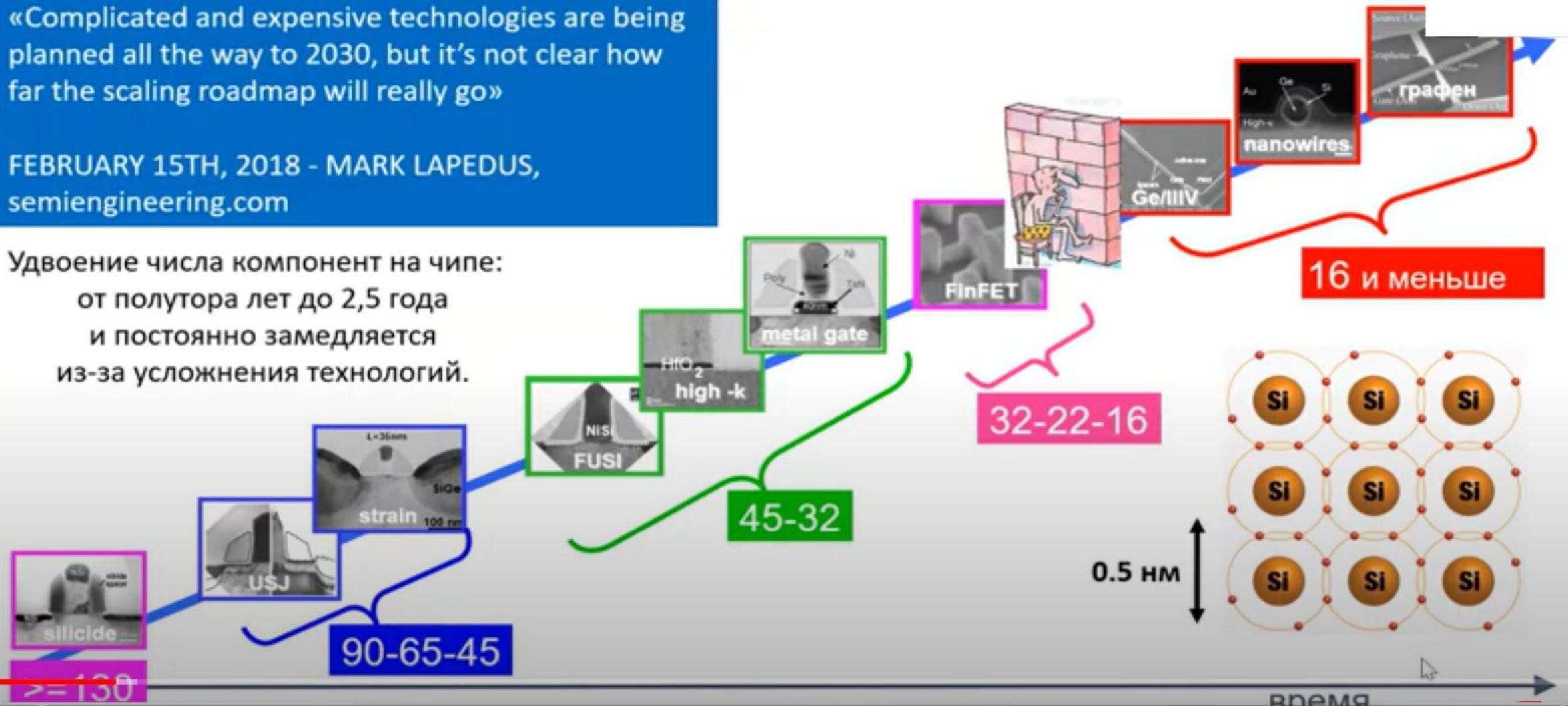


# Закон Мура

«Complicated and expensive technologies are being planned all the way to 2030, but it's not clear how far the scaling roadmap will really go»

FEBRUARY 15TH, 2018 - MARK LAPEDUS, semiengineering.com

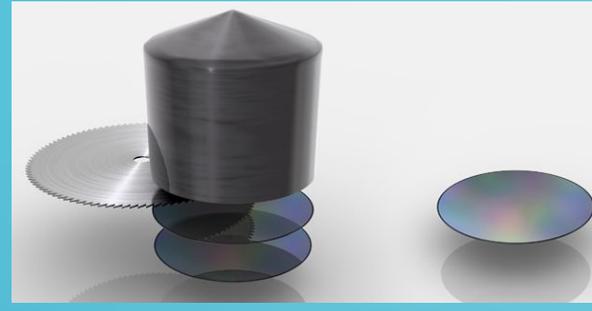
Удвоение числа компонент на чипе:  
от полутора лет до 2,5 года  
и постоянно замедляется  
из-за усложнения технологий.



# Схема производства ИМС



Выращивание кристалла



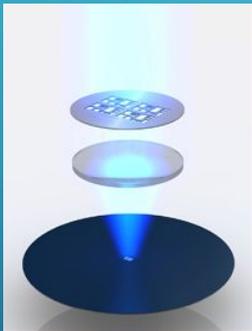
Получение пластин



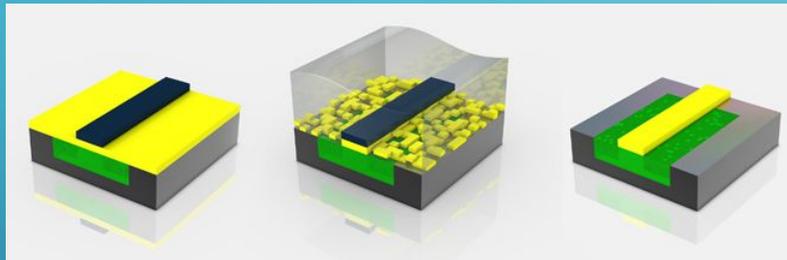
Нанесение защитного слоя



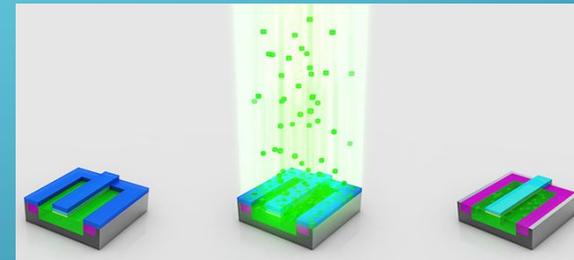
Фоторезист



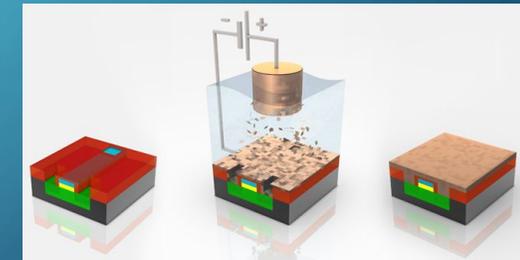
Фотолитография



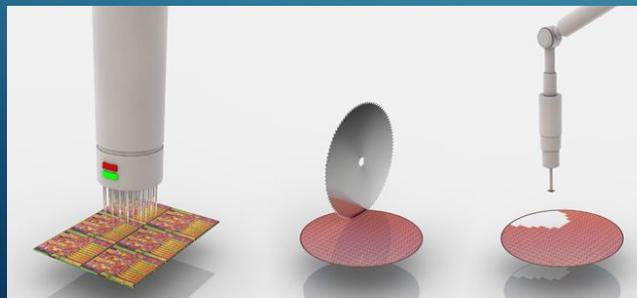
Травление



Легирование



Соединение радиоэлементов

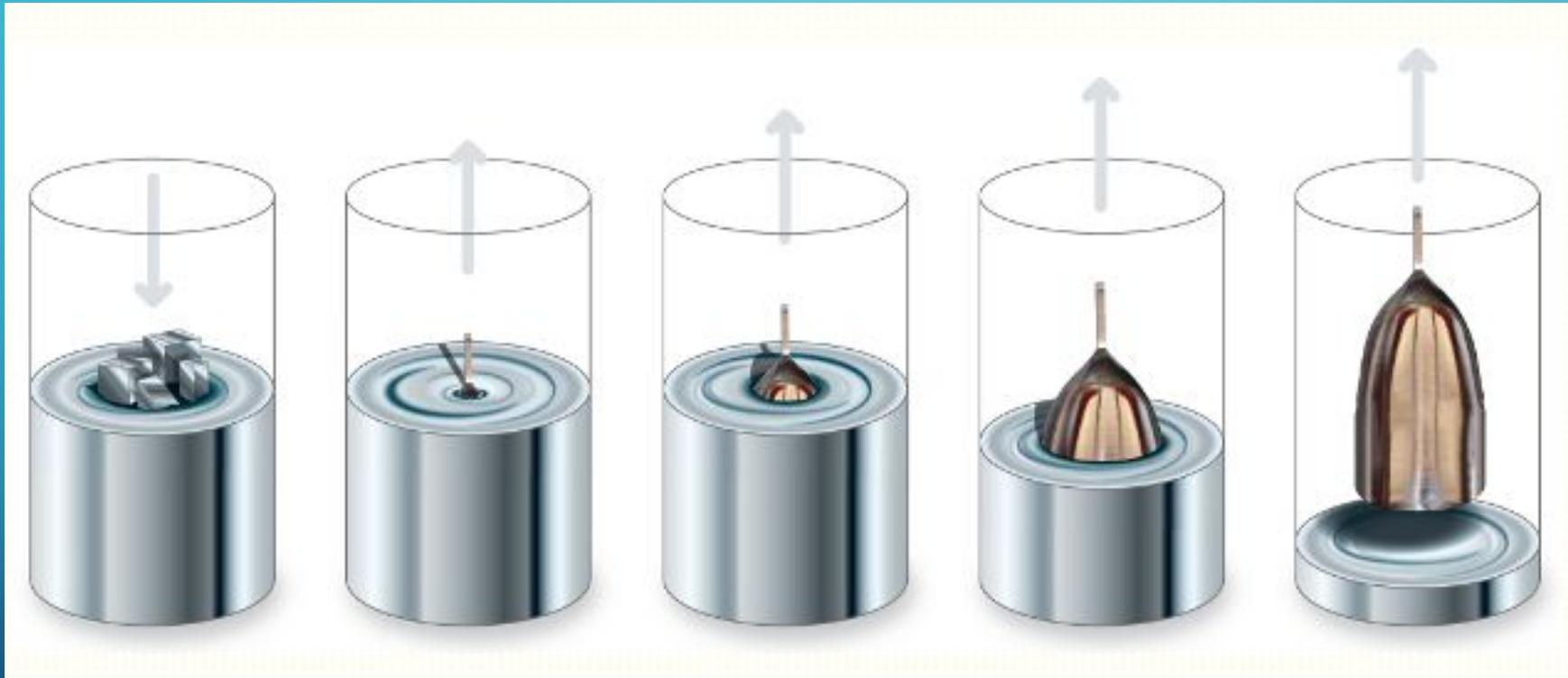


Вырезание чипов



Упаковка  
в  
подложку

# Метод направленной кристаллизации Ян Чохральский 1916



Плавление  
исходного  
вещества

Введение  
затравки

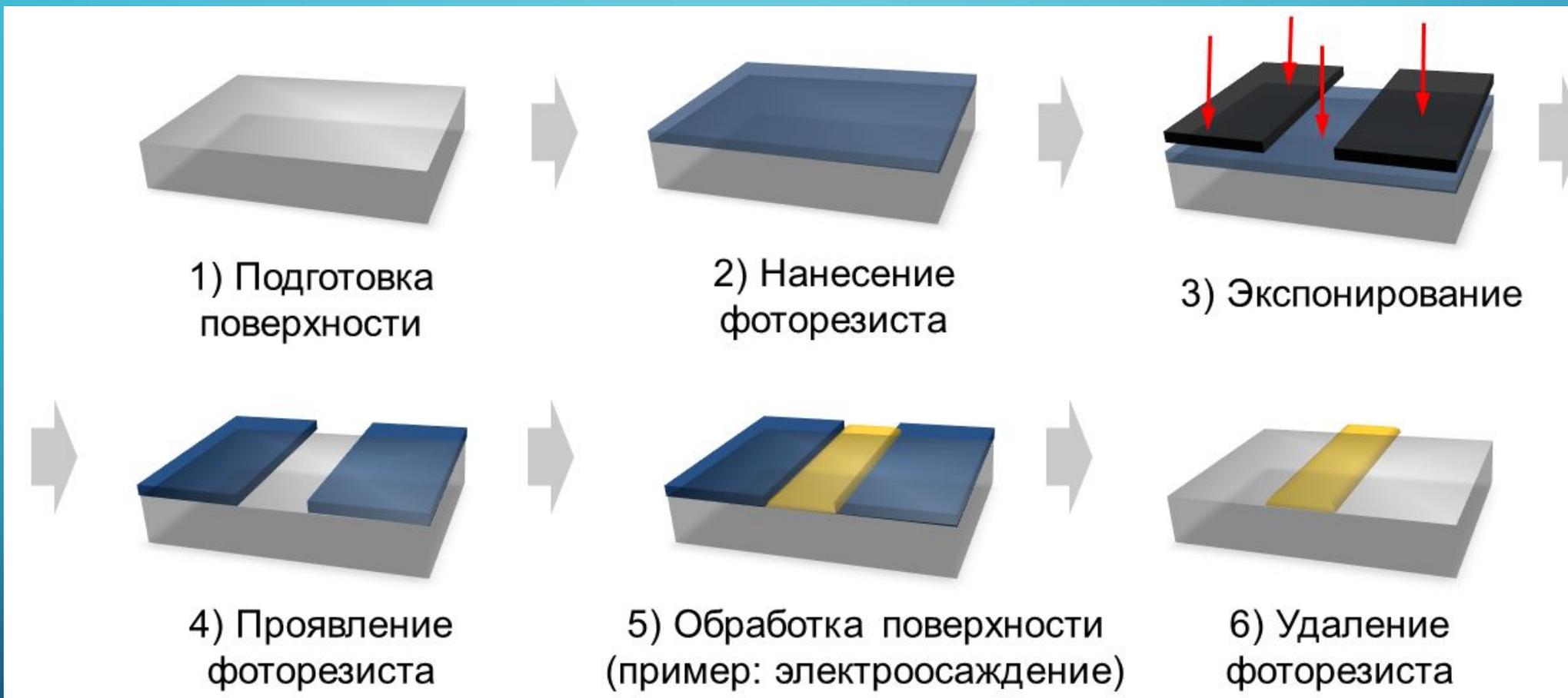
Начало  
выращивания  
кристалла

Вытягивание  
кристалла

Выращенный  
кристалл

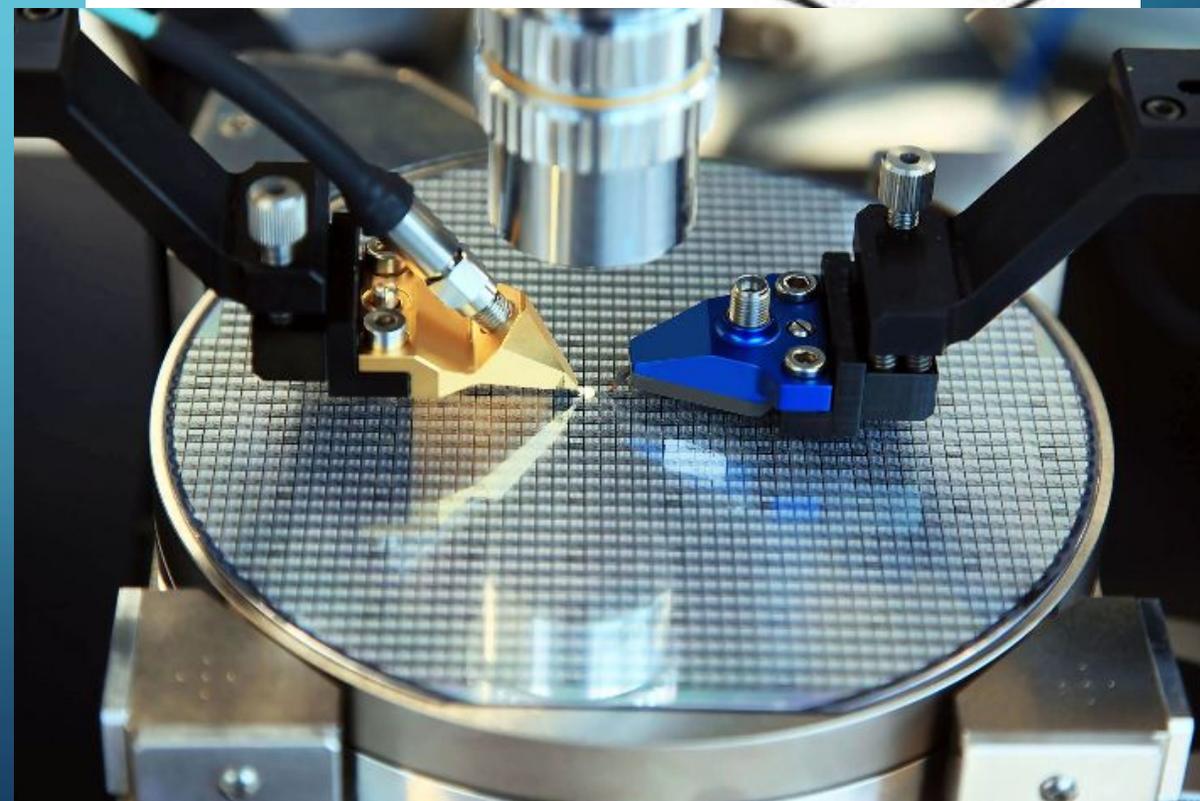
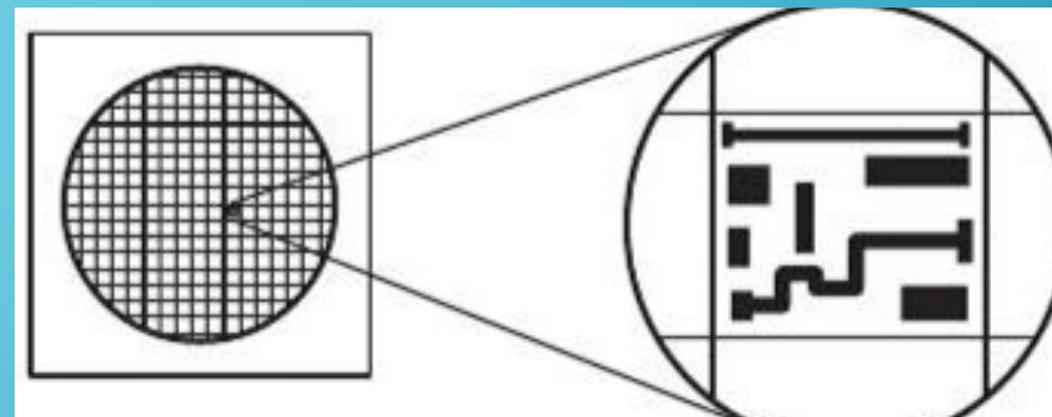
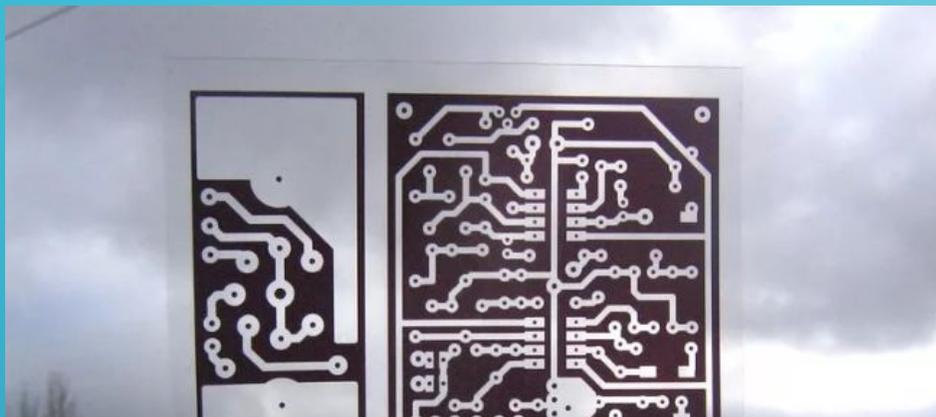


# Литография – формирование отверстий в масках



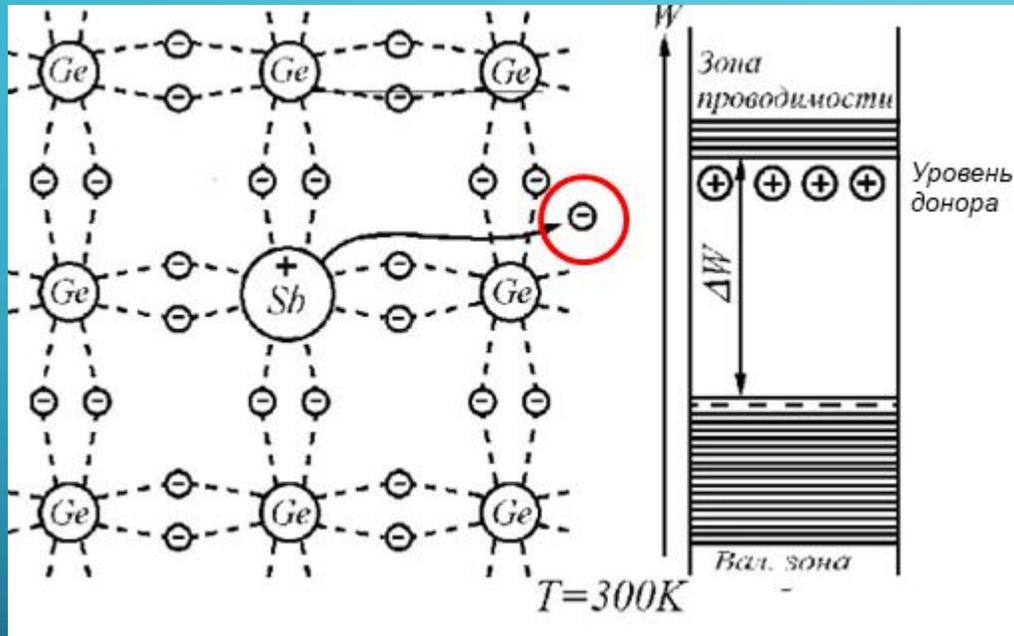
Фоторезист - вещество в котором под воздействием излучения протекают хим. реакции

# Фотолитография → Рентгенолитография → Электронолитография



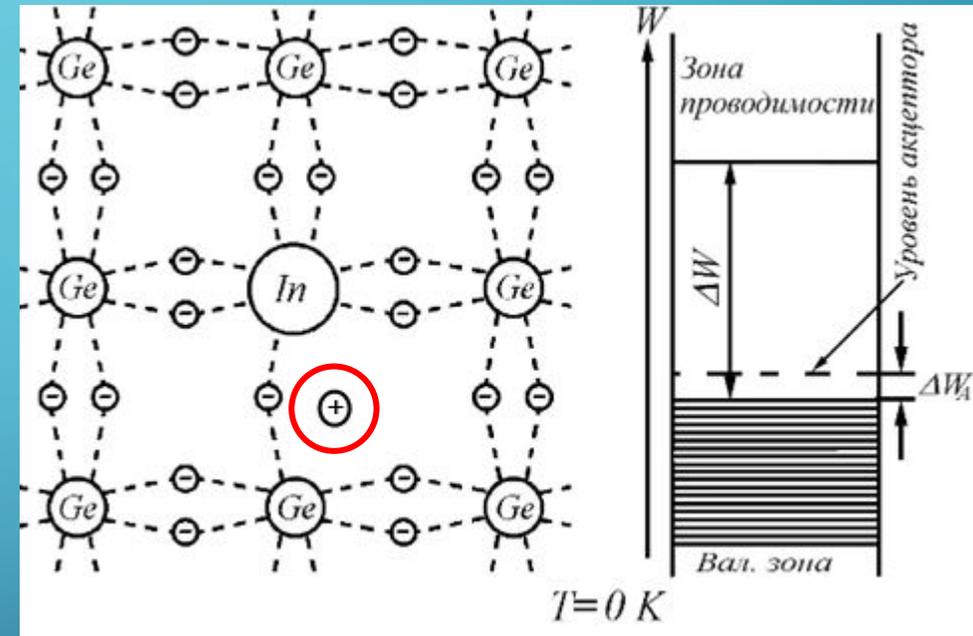
Легирование – локальное введение в подложку донорных или акцепторных примесей, для образования р-п переходов

## Примесь Sb (5e)



п-типа

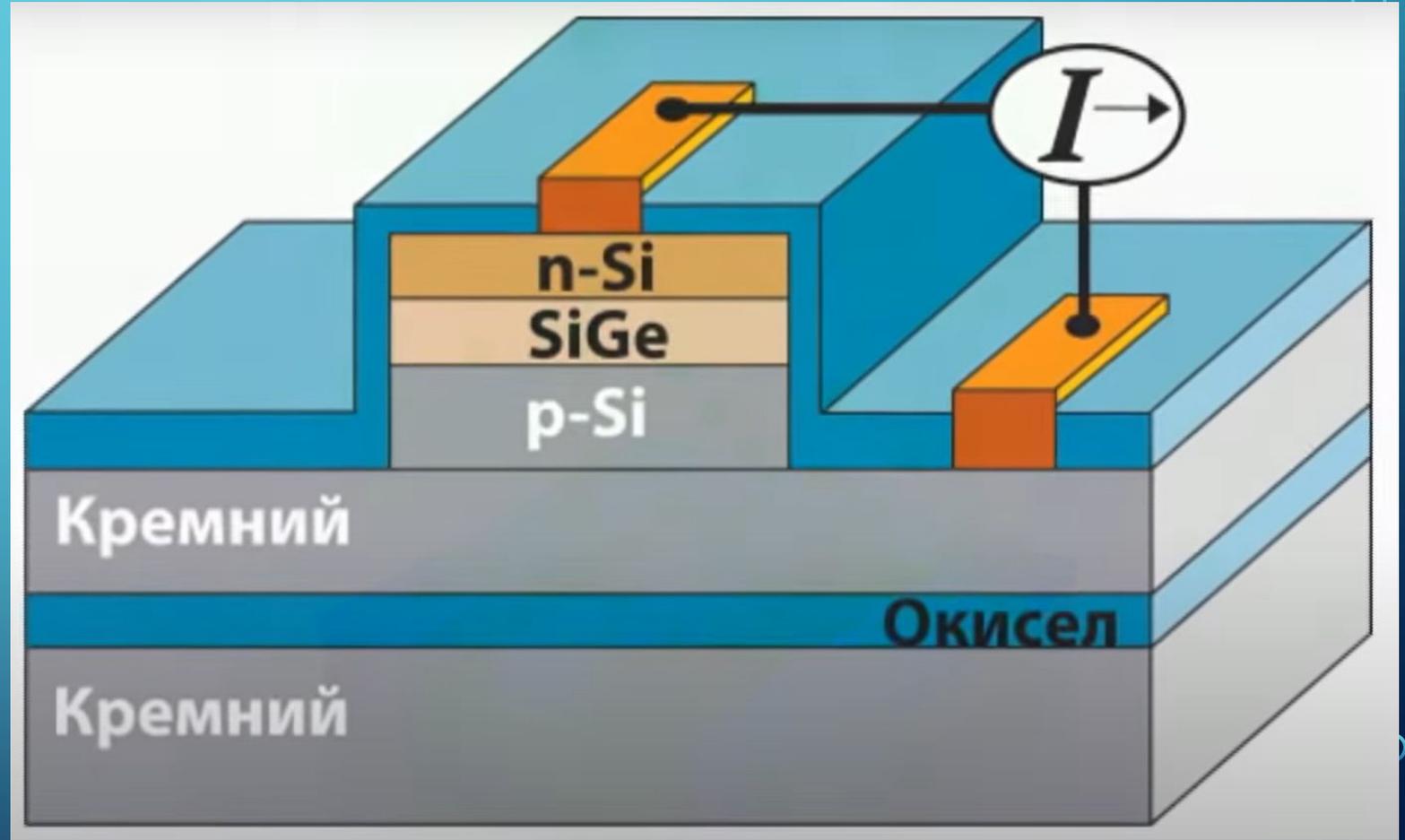
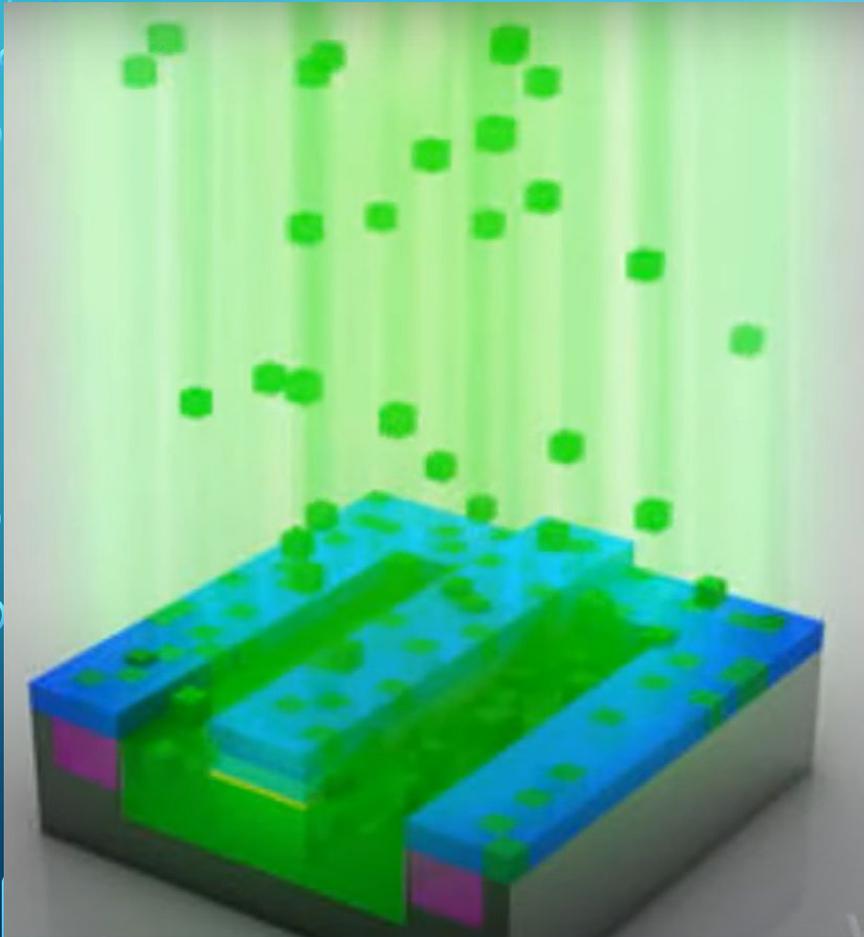
## Примесь In (3e)

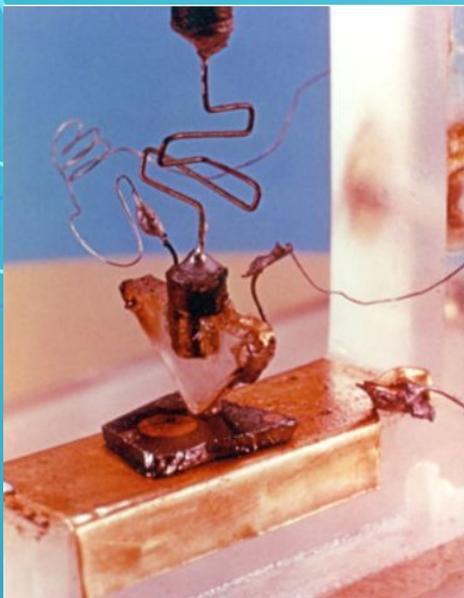


р-типа

Полупроводник	Донор	Акцептор
Si, Ge	V группа (B, In, Al, Ga)	III группа (P, As, Sb)
A <sup>III</sup> B <sup>V</sup>	VI группа (S, Se, Te, S, Se, Te)	II группа (Be, Mg, Be, Mg, Zn, Cd, Zn, Cd).

Легирование – локальное введение в подложку донорных или акцепторных примесей, для образования p-n переходов

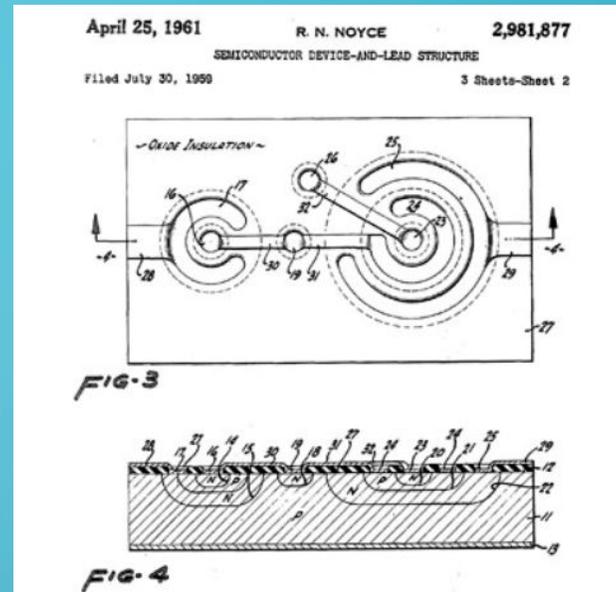




Транзистор, 1948



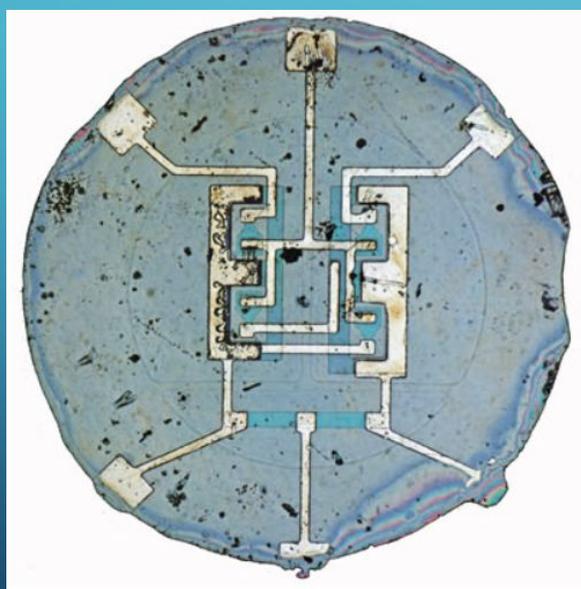
Первая легированная надпись



Патент первой планарной микросхемы, 1961



Транзисторное радио, 1953

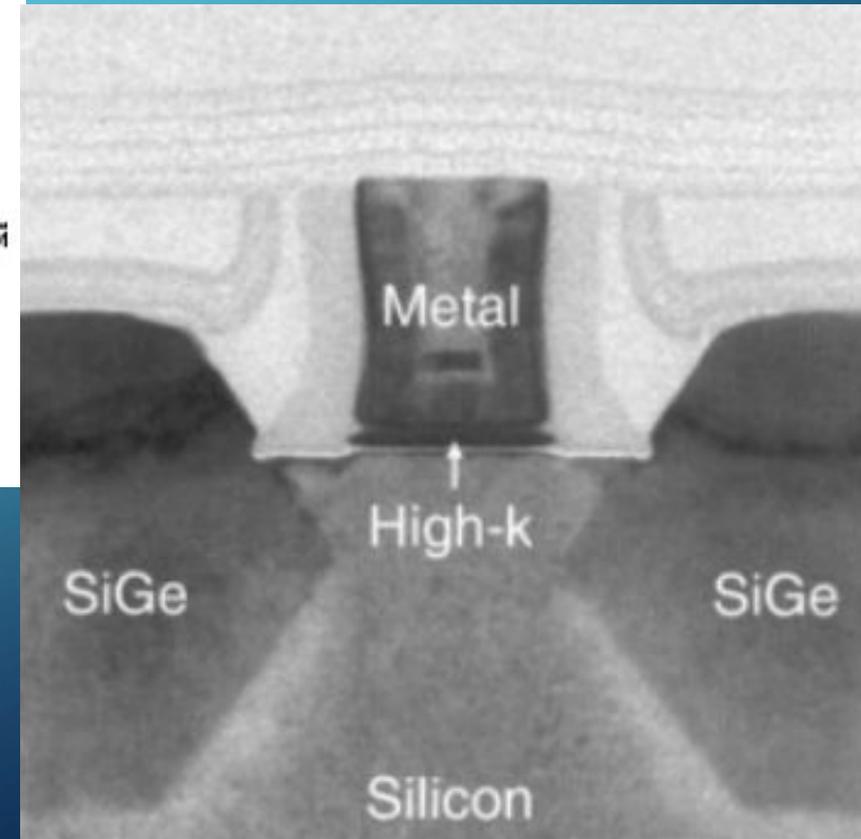
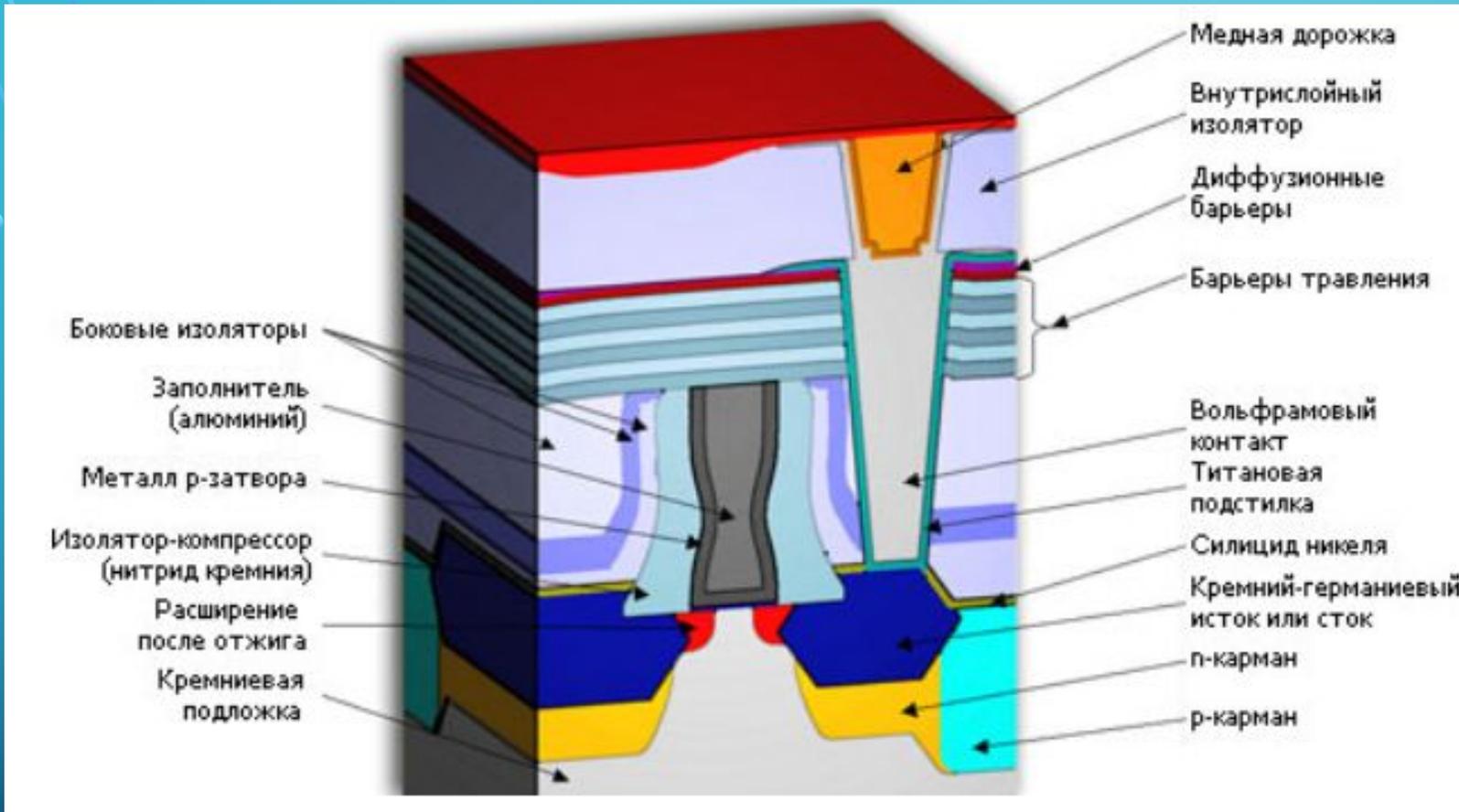


Кристалл микросхемы, 1960



Ручная нарезка маски, до 1970

# 45-нанометровый p-канальный транзистор



Элементарные  
ПП

Соединения  
 $A^{III}B^V$

Соединения  
 $A^{I-V}B^{VI}$

Полупроводниковые (ПП)  
материалы

Соединения  
 $A^{II}B^{IV}C_2^V$

Соединения  
 $A^{IV}B^{IV}$

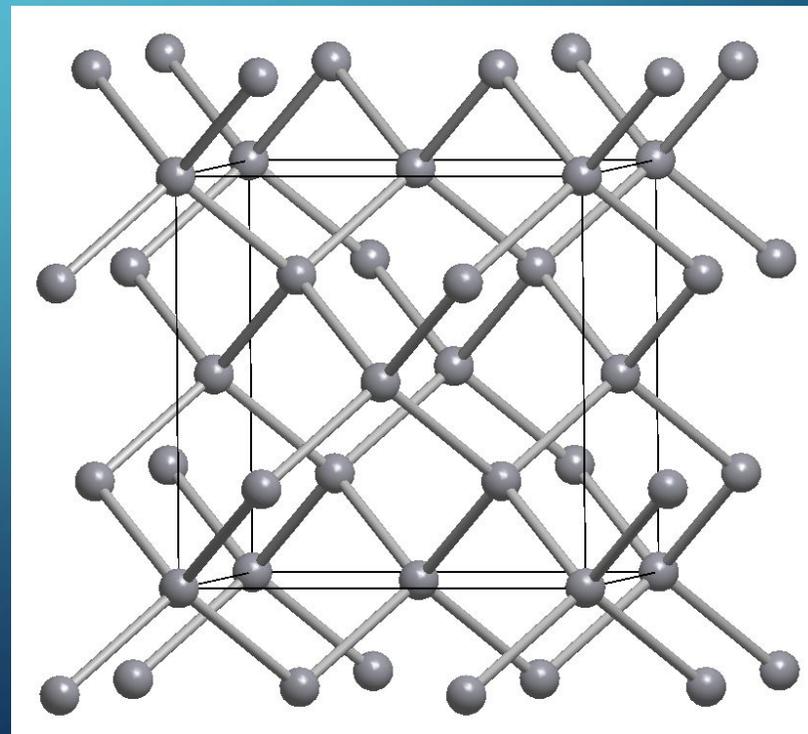
Аморфные  
ПП

Органические  
ПП

# Простые ПП

**Si, Ge, Si-Ge (быстродействие в 2-4 раза↑),  
C (алмаз и графит),  $\alpha$ -Sn (серое олово), Se, Te**

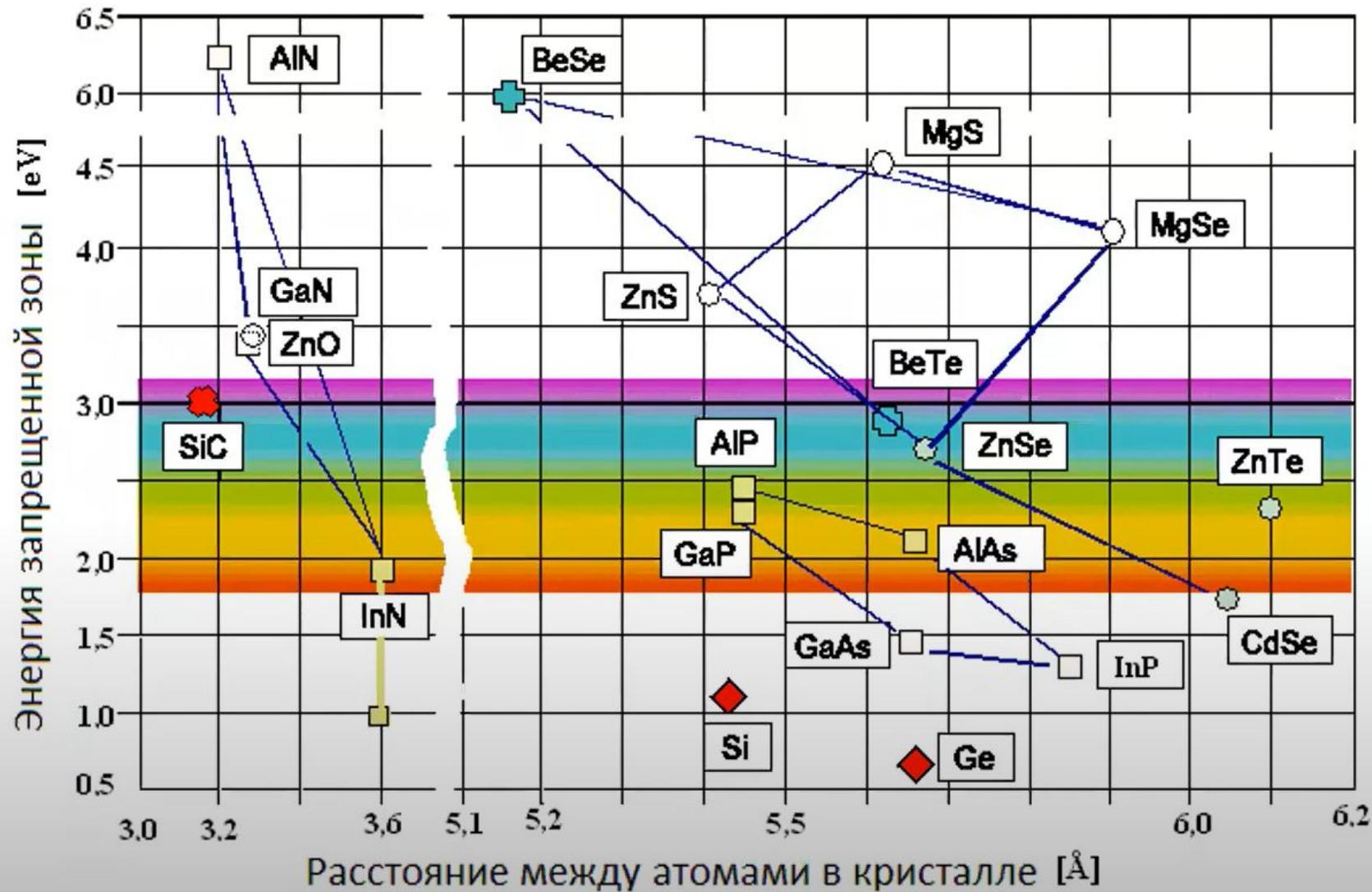
Период	Группа				
	III	IV	V	VI	VII
1					
2	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>
3	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>
4	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>
5	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>
6	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>



# Элементарные ПП и ПП соединения

Материал	$Z_{\text{ср}}$	Температура плавления, С	Ширина запрещенной зоны, эВ
Кремний	14	1417	1,12
Фосфид алюминия AlP	14	2550	2,45
Германий	32	937	0,66
Арсенид галлия GaAs	32	1238	1,428
Серое олово $\alpha$ -Sn*	50	—	0,08
Антимонид индия InSb	50	525	0,18

# Полупроводниковые соединения



Энергия (ширина) запрещенной зоны определяет **область применения** отдельных полупроводников и гетероструктур на их основе.

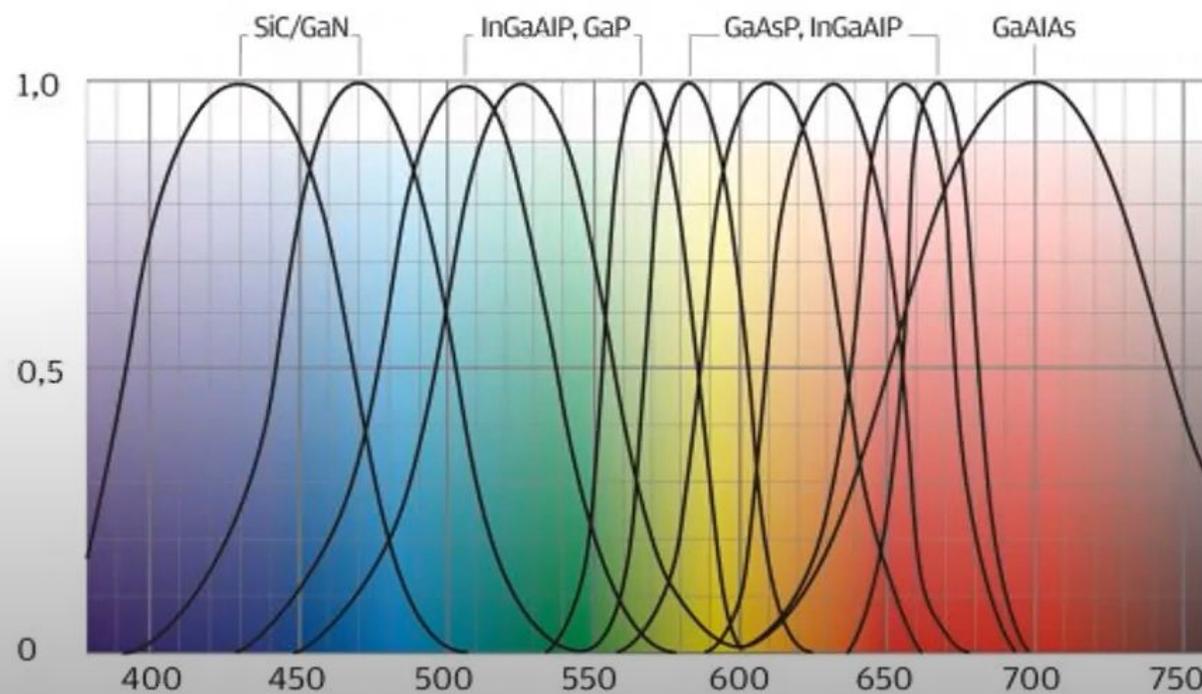
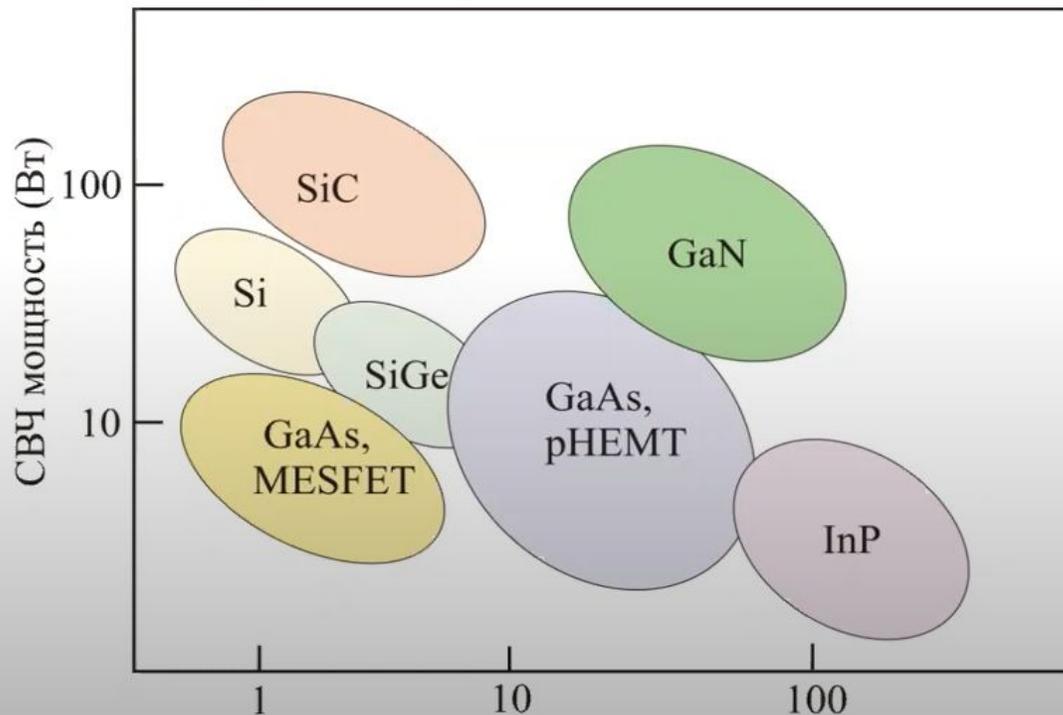
А расстояние между атомами в кристалле (постоянная решетки) – **механическую совместимость** материалов и возможность создания тех или иных гетероструктур.

# Полупроводниковые соединения

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

У каждого полупроводника – своя область применения мощности, частоте и излучаемой/поглощаемой длине волны. Но есть и другие факторы: стоимость, технология и совместимость.

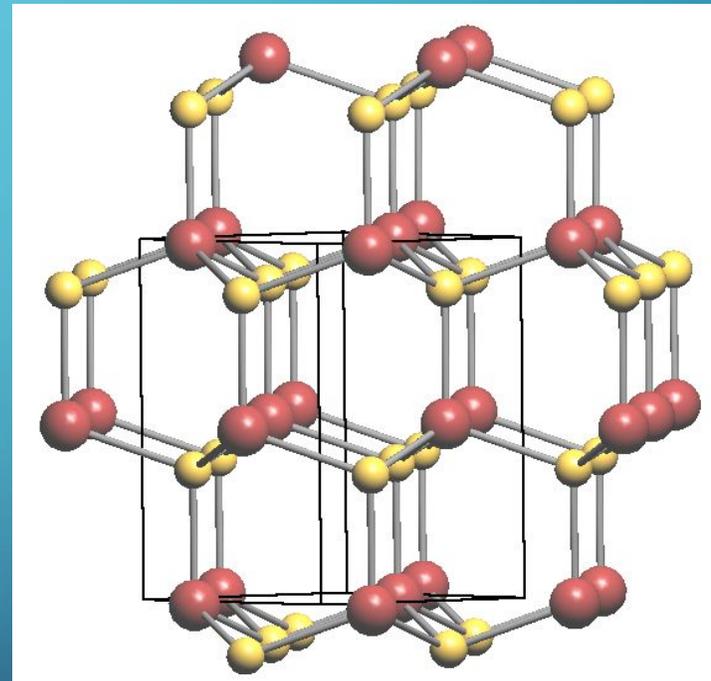
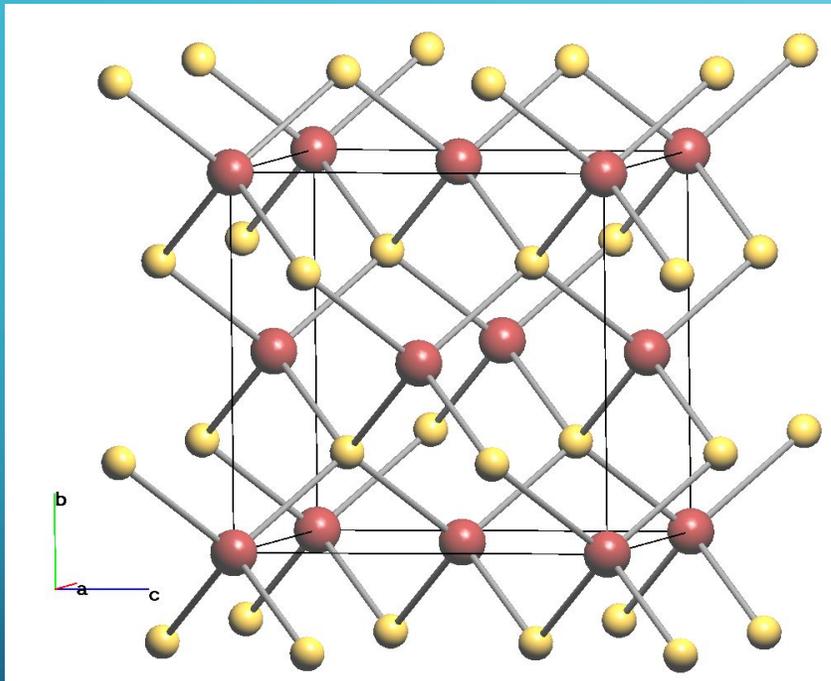
**Тенденция последних лет – переход к наноматериалам, таким как графен.**



# Соединения $A^{III}B^V$

$A=B, Al, Ga, In; B=P, As, Sb$

$A=B, Al, Ga, In; B=N$



GaAs, InP, InAs, InSb, GaP

$(Ga_x Al_{1-x} As, GaAs_x P_{1-x}, Ga_x In_{1-x} P, Ga_x In_{1-x} As_y P_{1-y})$

# Органические ПП

Наличие  $\pi$ -связей

Возбуждение молекул при поглощении света

Генерация носителей тока при возбуждении

$\pi$ -электронов

Дешевое производство, пластичность,  
легкоплавкость, стойкость к радиации,

высокая светочувствительность

(светочувствительные материалы, датчики)

