

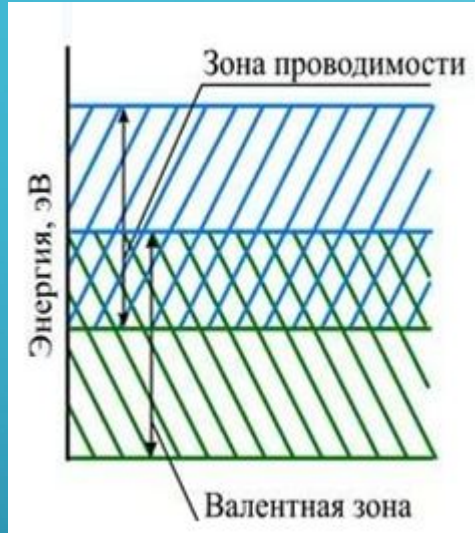


МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Материалы

Проводники

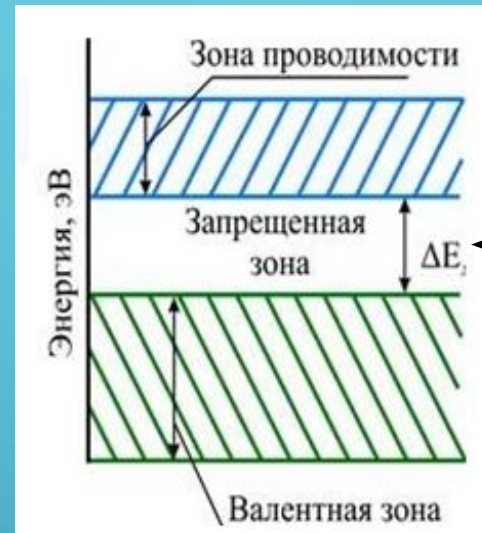


Тип связи -
металлическая

Носители заряда -
электроны

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

Полупроводники



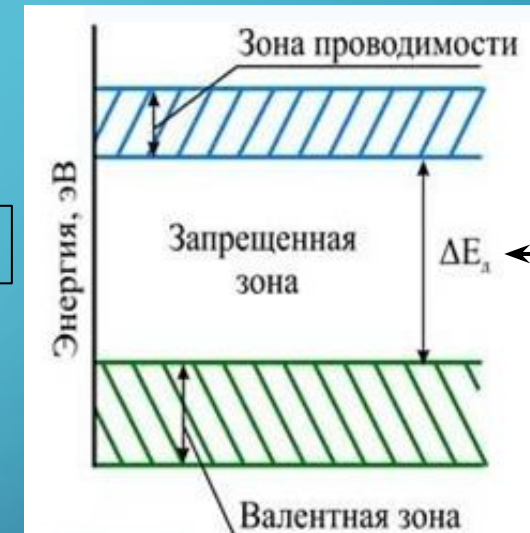
0,05-3 эВ

Тип связи —
ковалентная, ионная

Носители заряда —
электроны, дырки

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

Диэлектрики



> 3 эВ

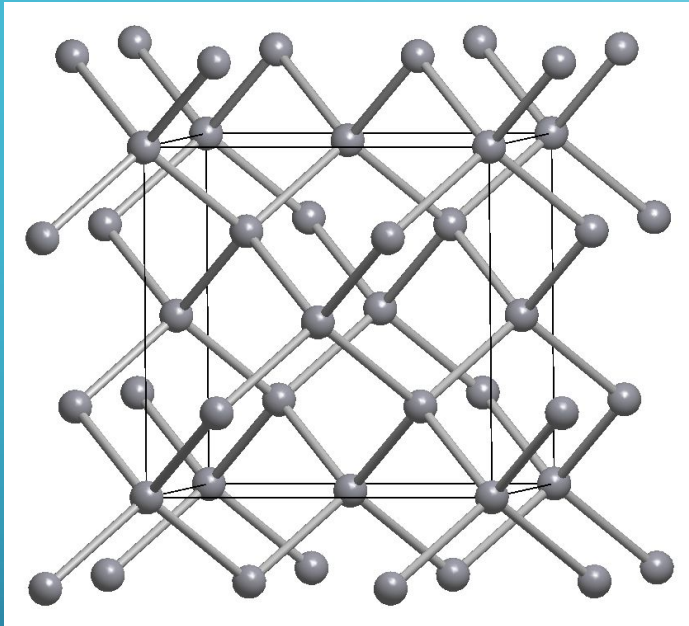
Тип связи —
ковалентная, ионная

Нет свободных
носителей заряда

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

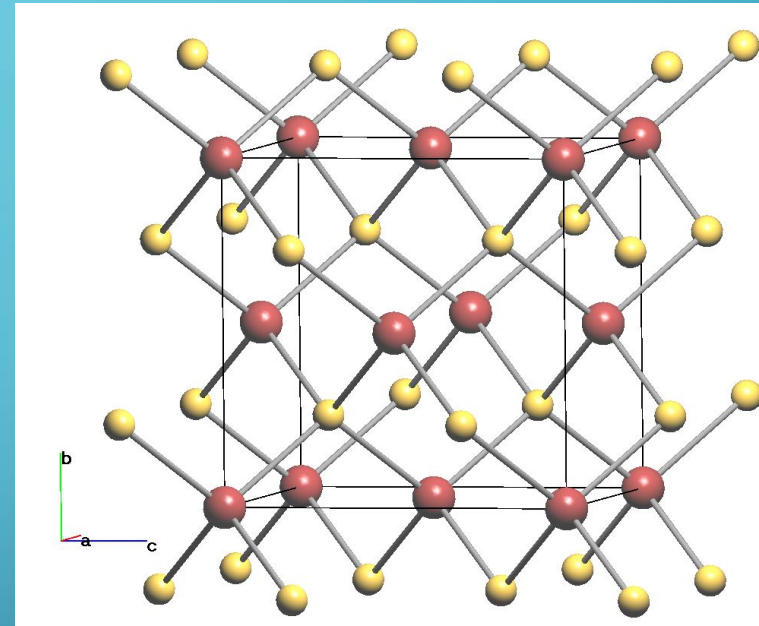
Электрические свойства полупроводников

Алмаз



Si, Ge -4e

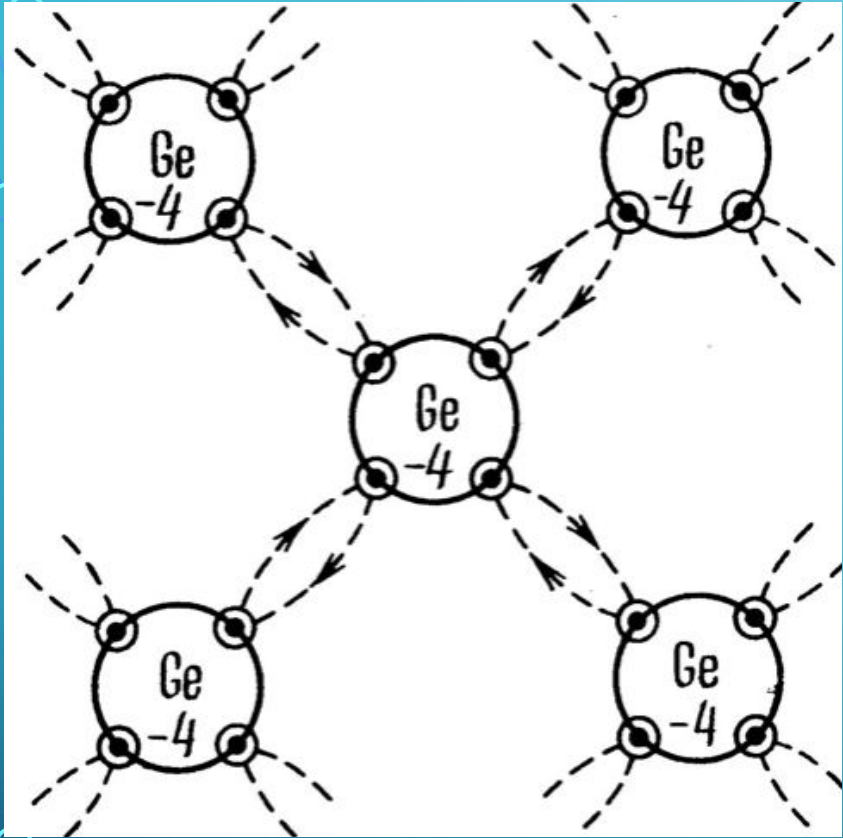
Сфалейт



A(II)B(VI) CdS, CdTe, α -ZnS

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

InSb, InP, AlP, AlSb, ³



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

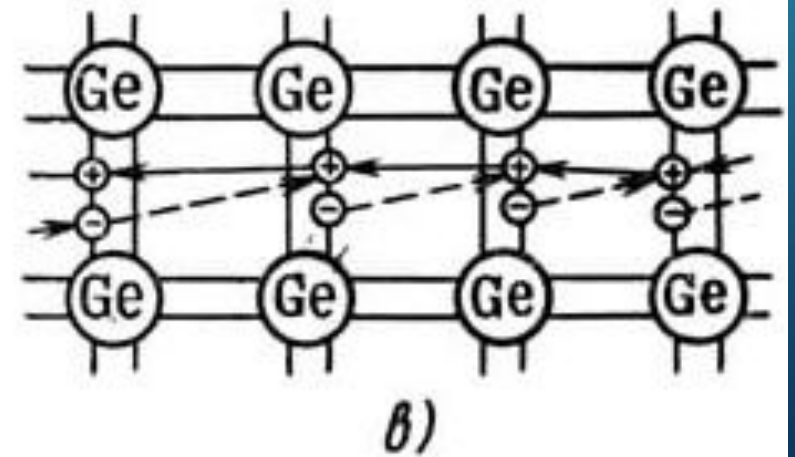
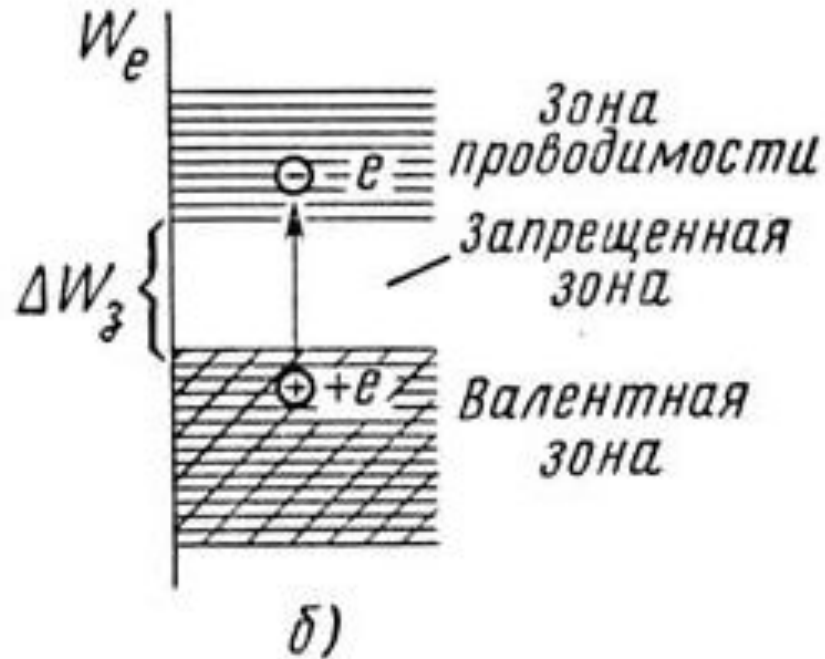
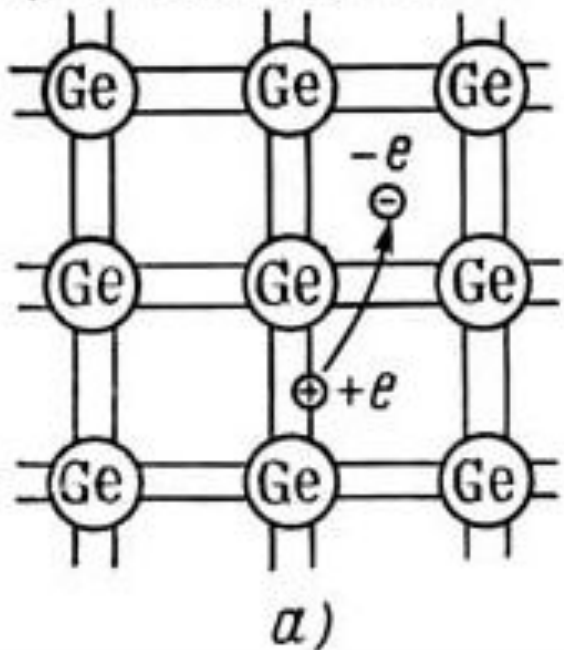
Халькогениды свинца

– ионная связь

$$Z_{\text{ср}} = (Z_A + Z_B)$$

Собственные носители заряда

Кристалл германия



а – образование носителей заряда,

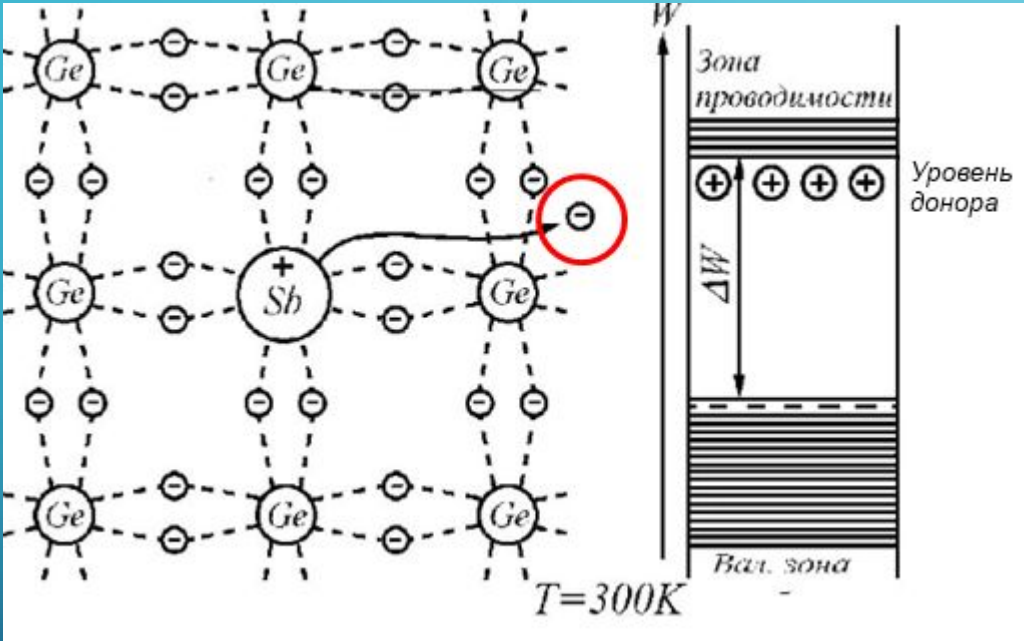
б – энергетическая шкала,

в – перемещение носителей заряда под действием напряжения

Связанная пара электрон-дырка - экситон

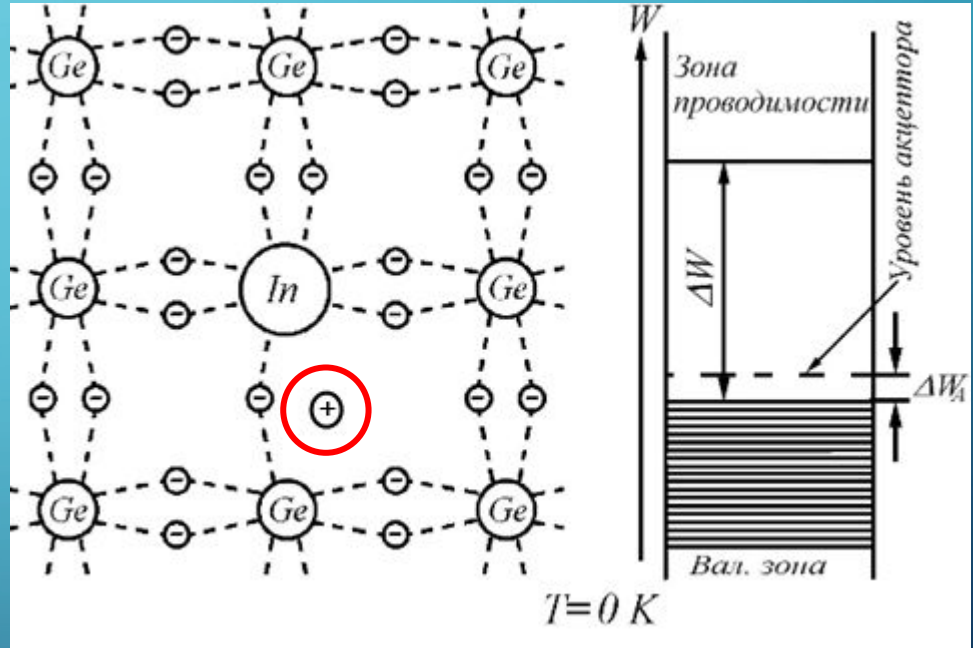
Примесные носители заряда

Примесь Sb (5e)



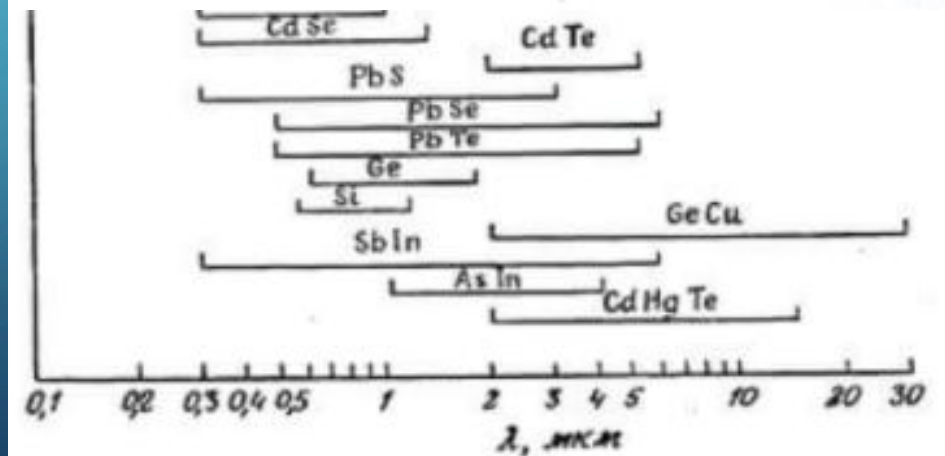
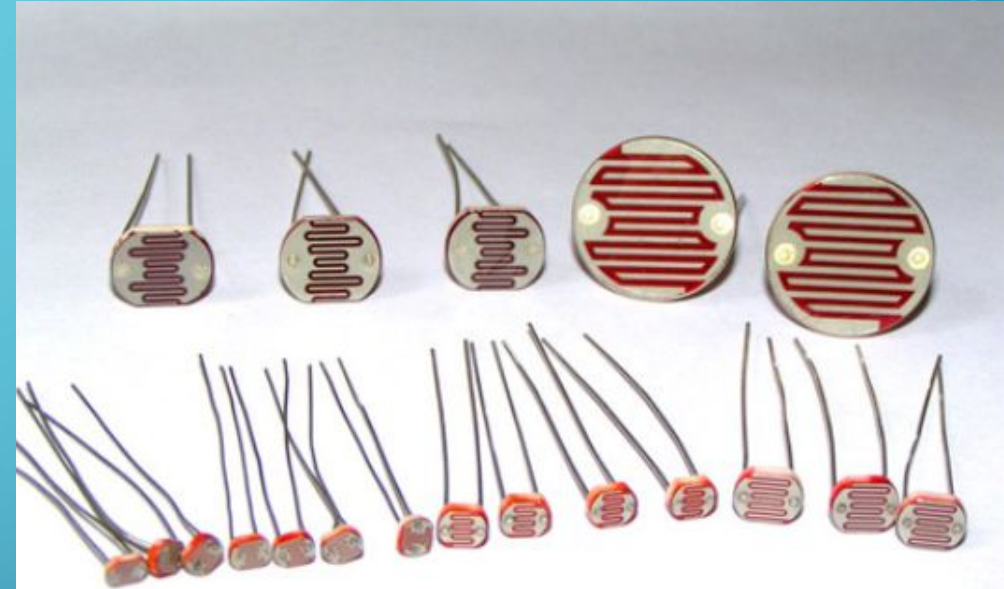
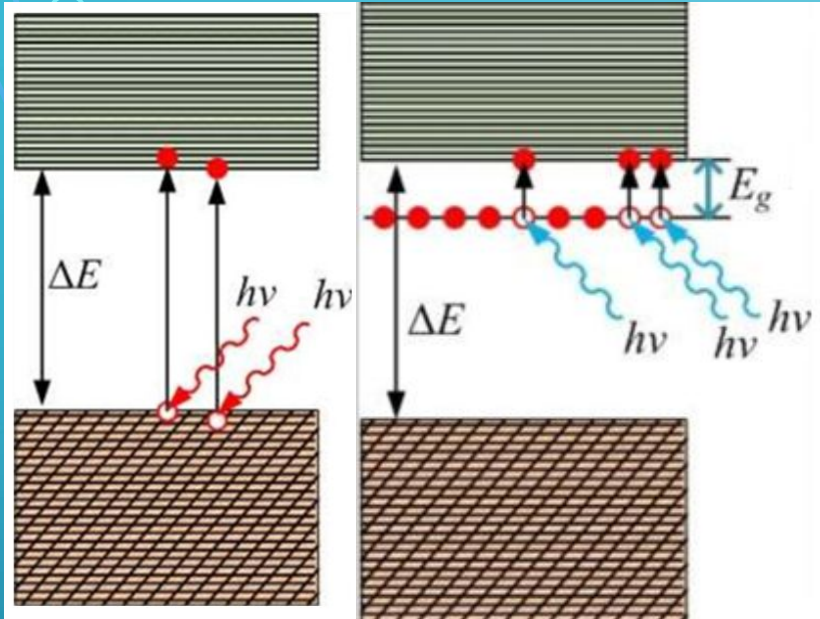
Донор e
электронная проводимость
n-типа (negative)

Примесь In (3e)



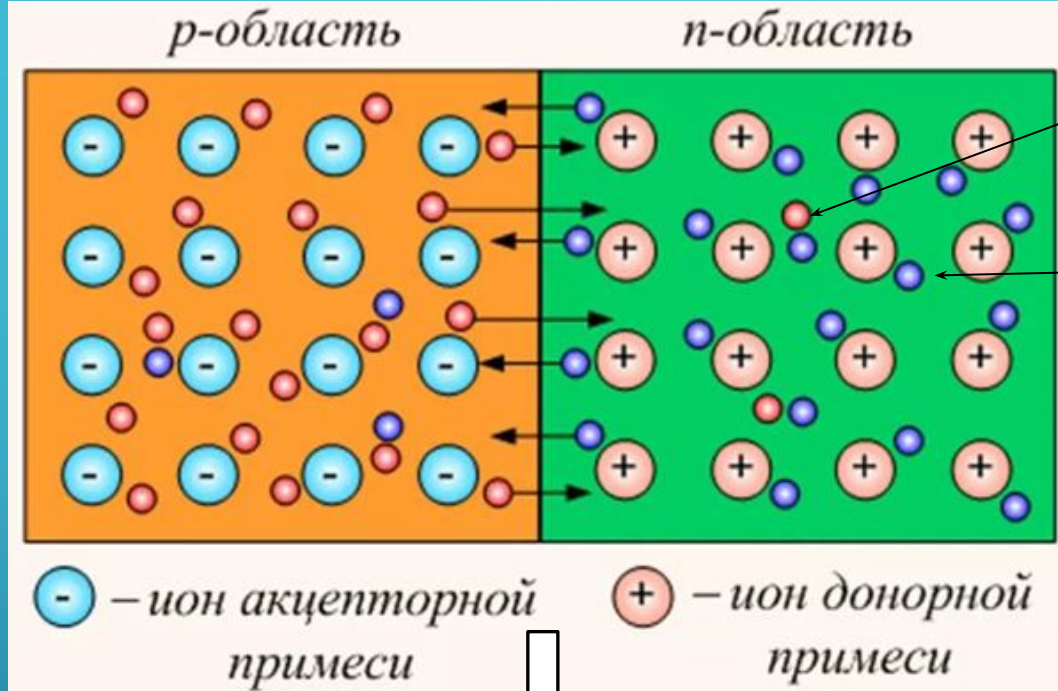
Акцептор e
дырочная проводимость
p-типа (positive)

Фотопроводимость



Фоторезисторы
CdS, ZnS, CdSe
Фотореле, сигнализация,
датчики наличия, датчики
светоосвещенности

p-n (электронно-дырочный) переход

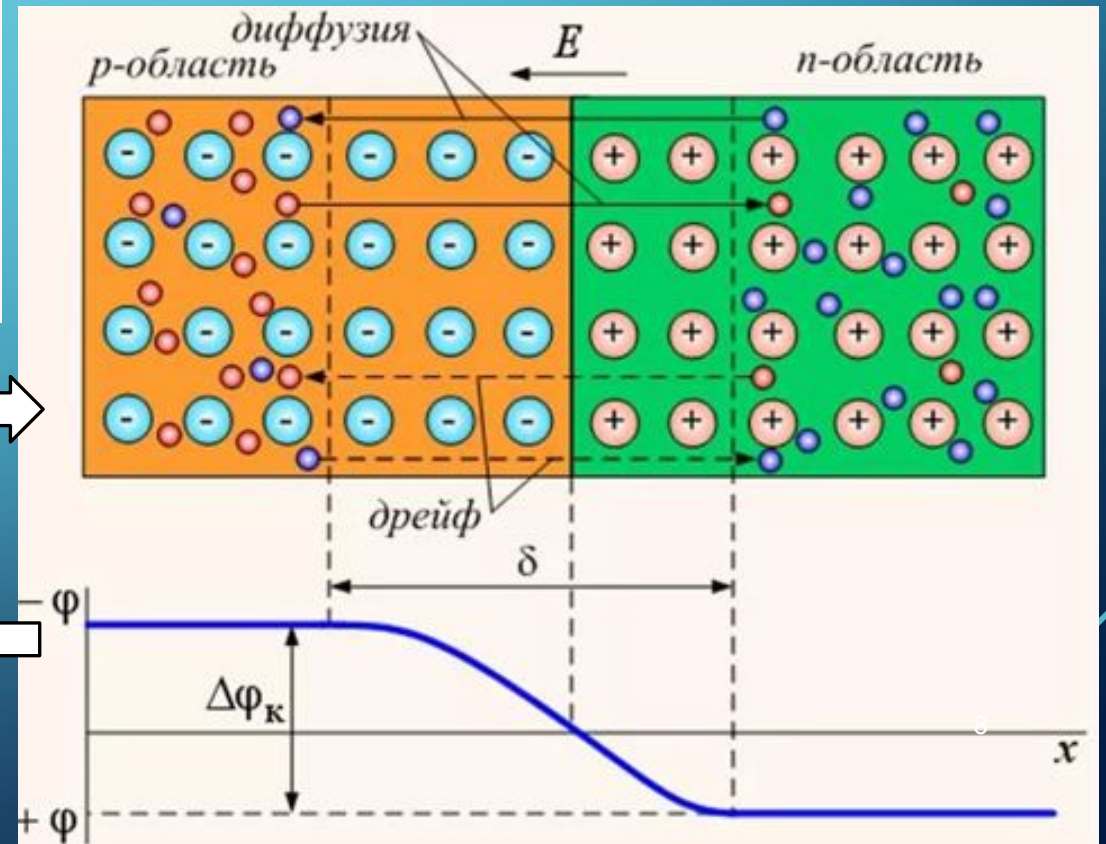


дырка

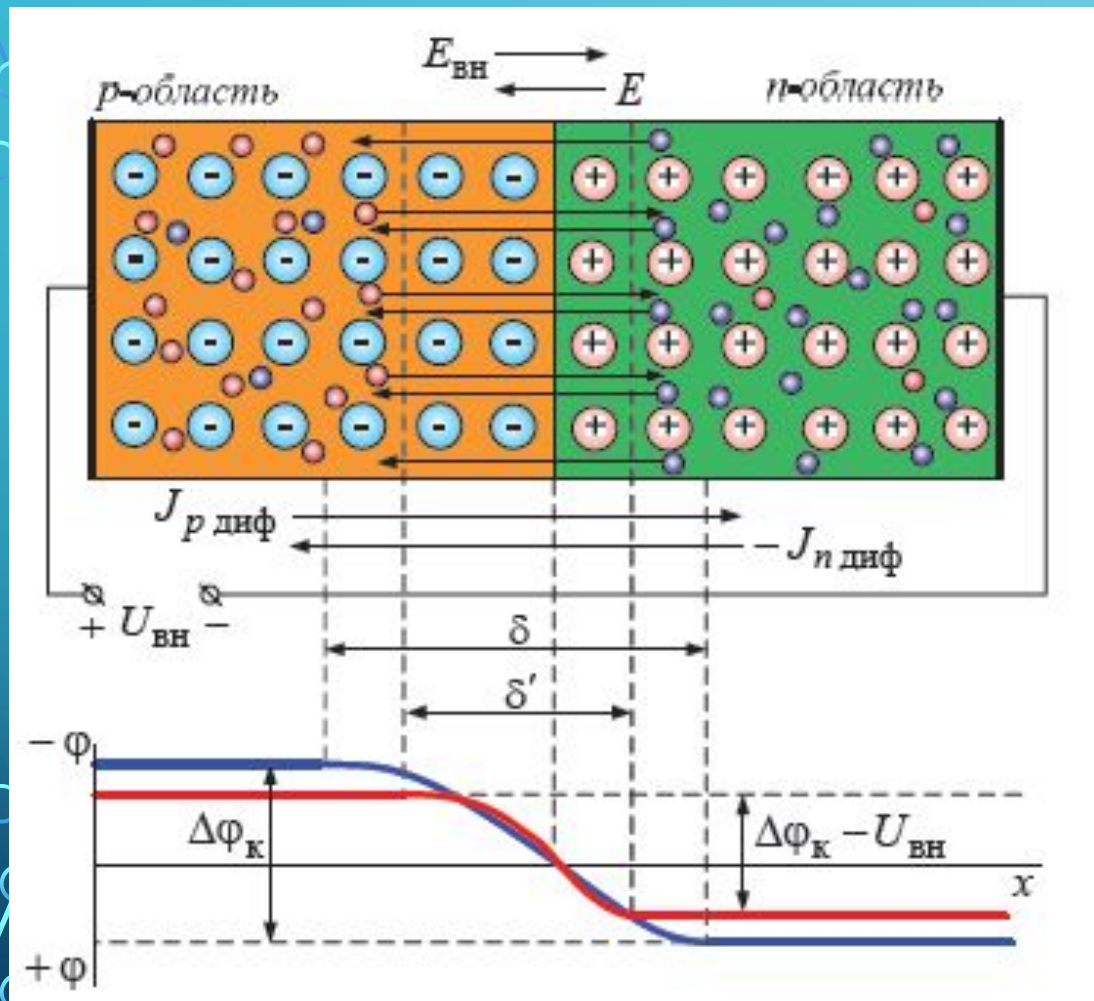
электрон

Диффузия носителей заряда

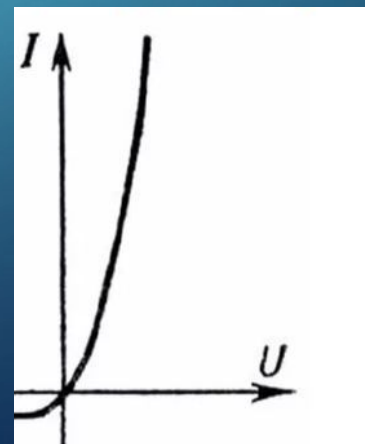
Возникновение слоя двойного заряда – запирающего слоя



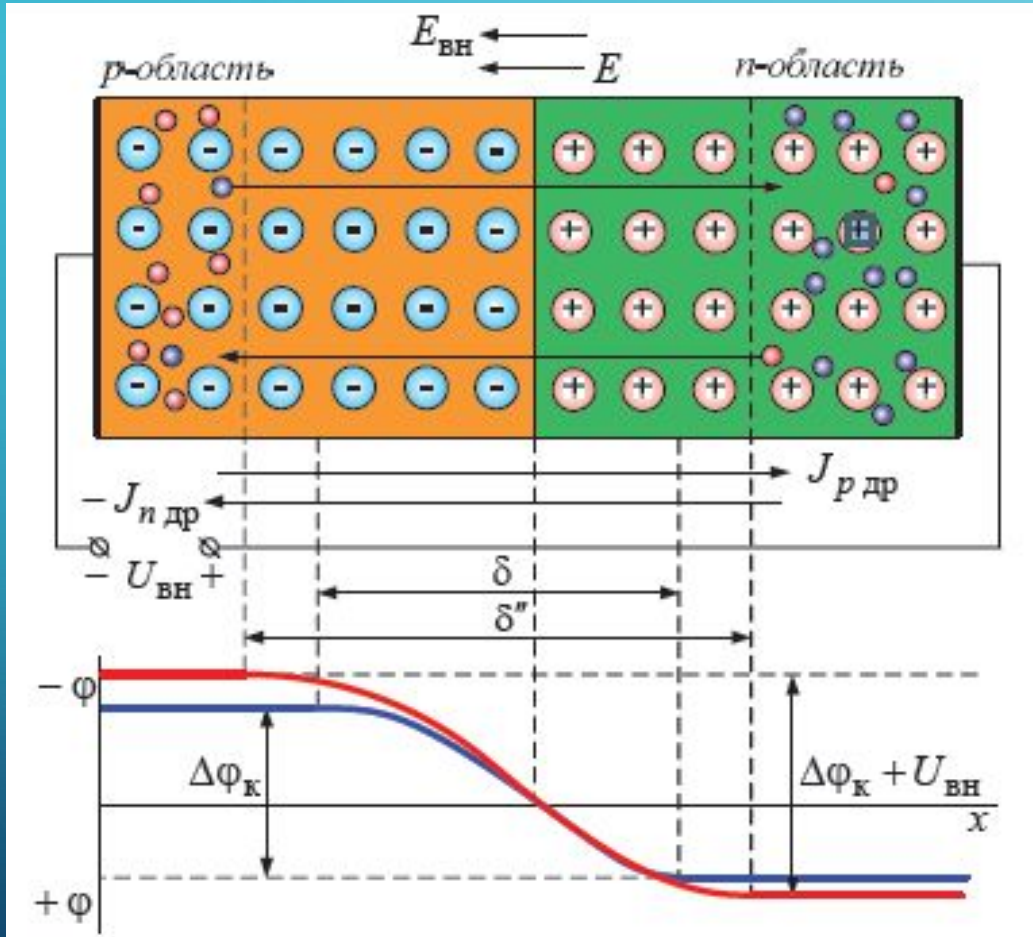
Прямое включение р-п перехода



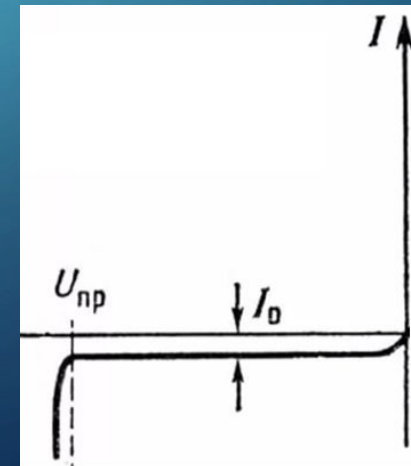
+ источника к р-области
- источника к n-области
Движение е источника
увеличивает поток носителей
Высота барьера понижается
При \uparrow силы тока, напряжение \uparrow



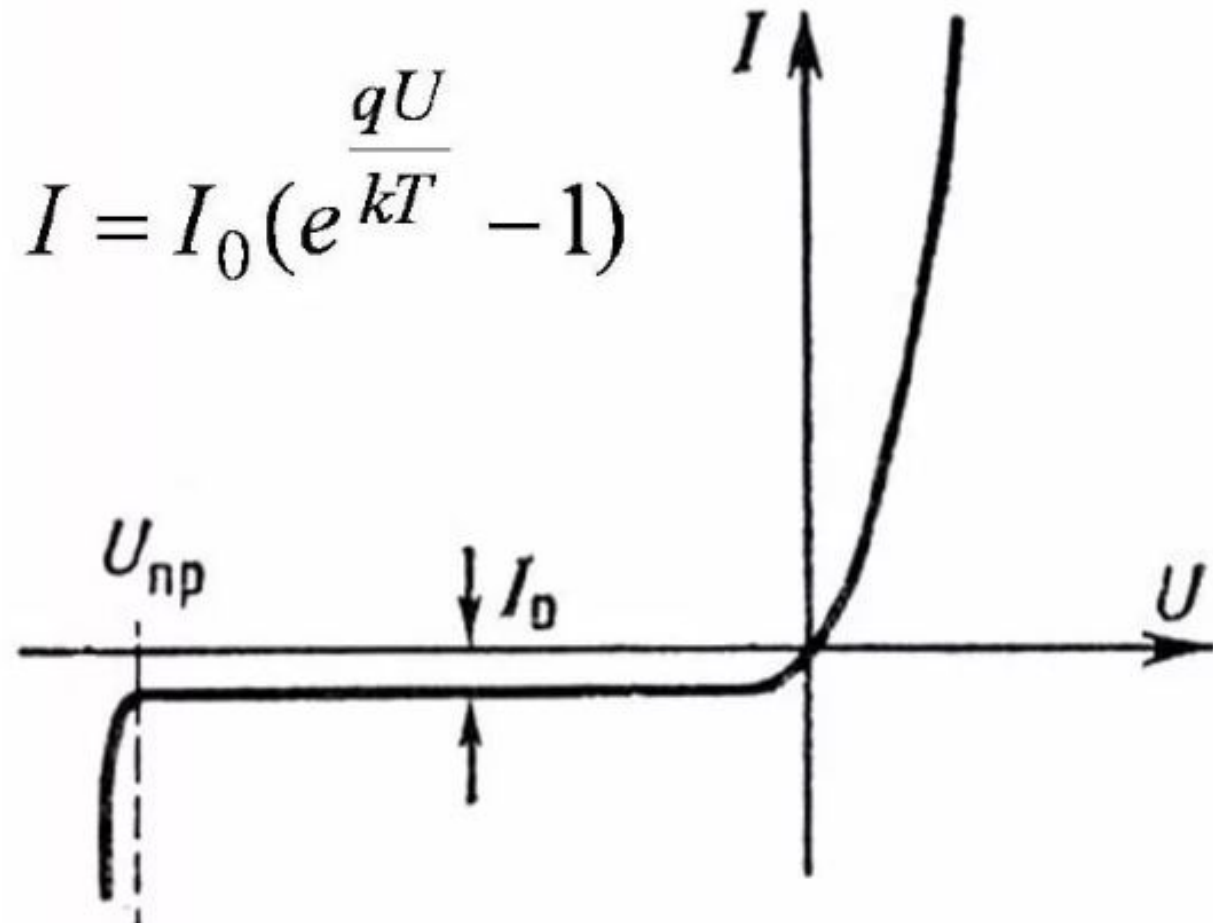
Обратное включение р-п перехода



- 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

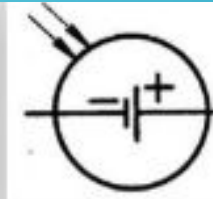
В результате диффузии в р-n переходе возникает электрическое поле – потенциальный барьер, препятствующий выравниванию концентраций носителей заряда.

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

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

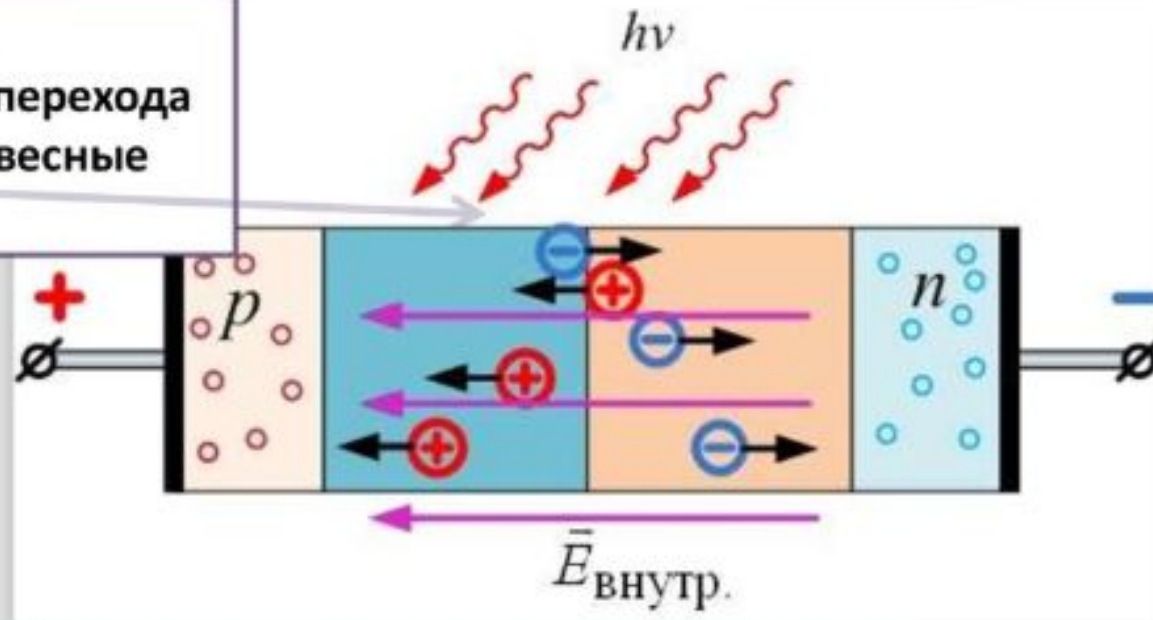
Р-n переход образуется на границах р- и n- областей, созданных в кристалле полупроводника

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)



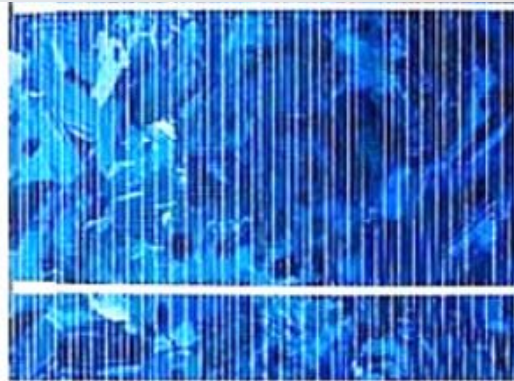
Солнечные батареи

Кремниевые

Поликристаллические

Монокристаллические

Аморфные



Солнечный элемент из поликристаллического кремния

Плёночные

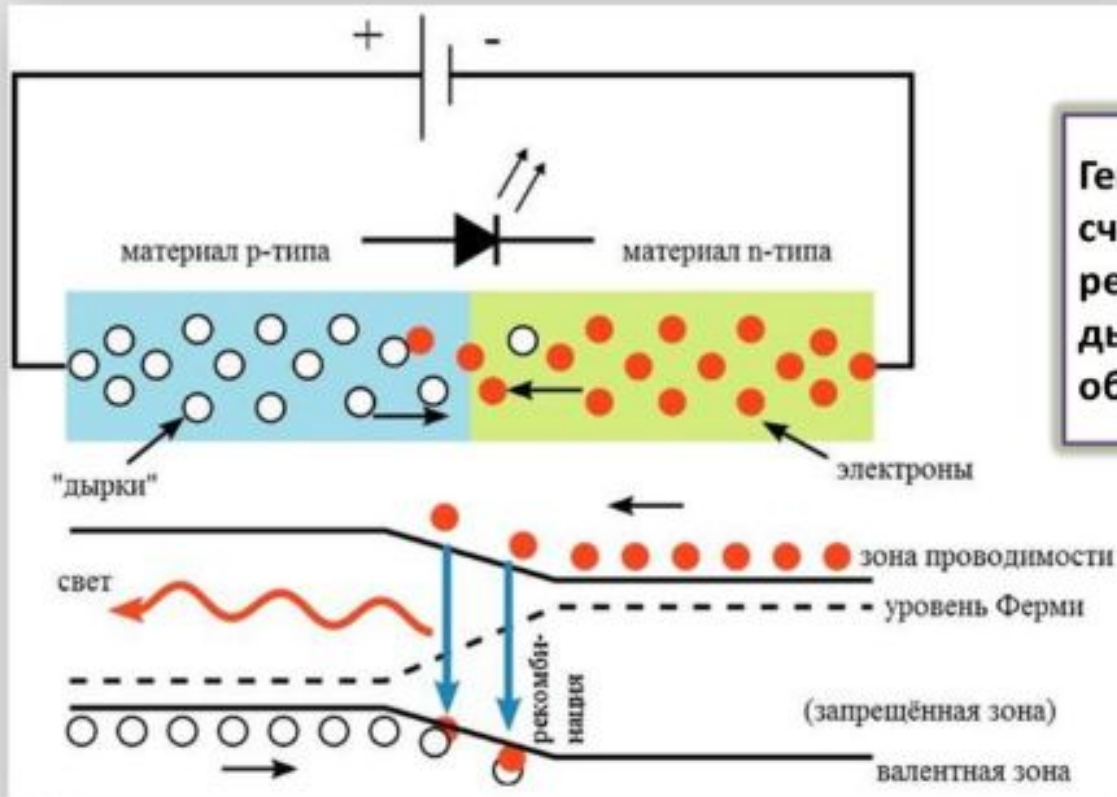
На основе теллурида кадмия

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

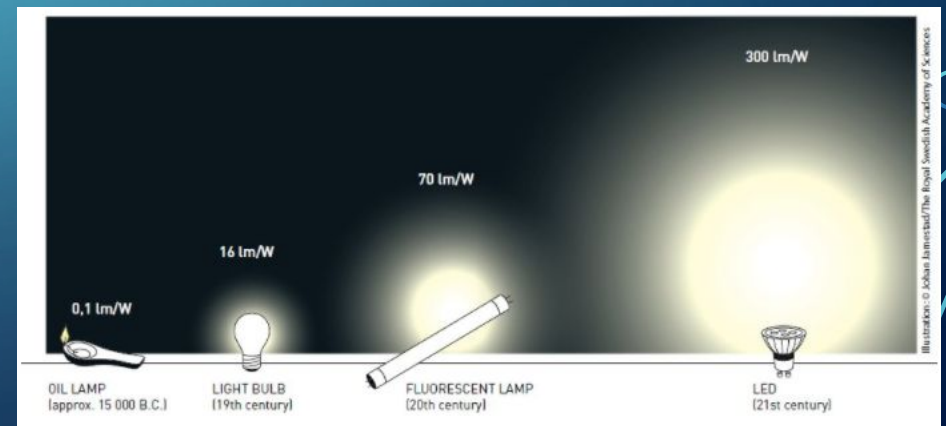


О. Лосев,
световое реле
1927
синий, SiC

General
Electric
1962
GaAs
красный
зеленый

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

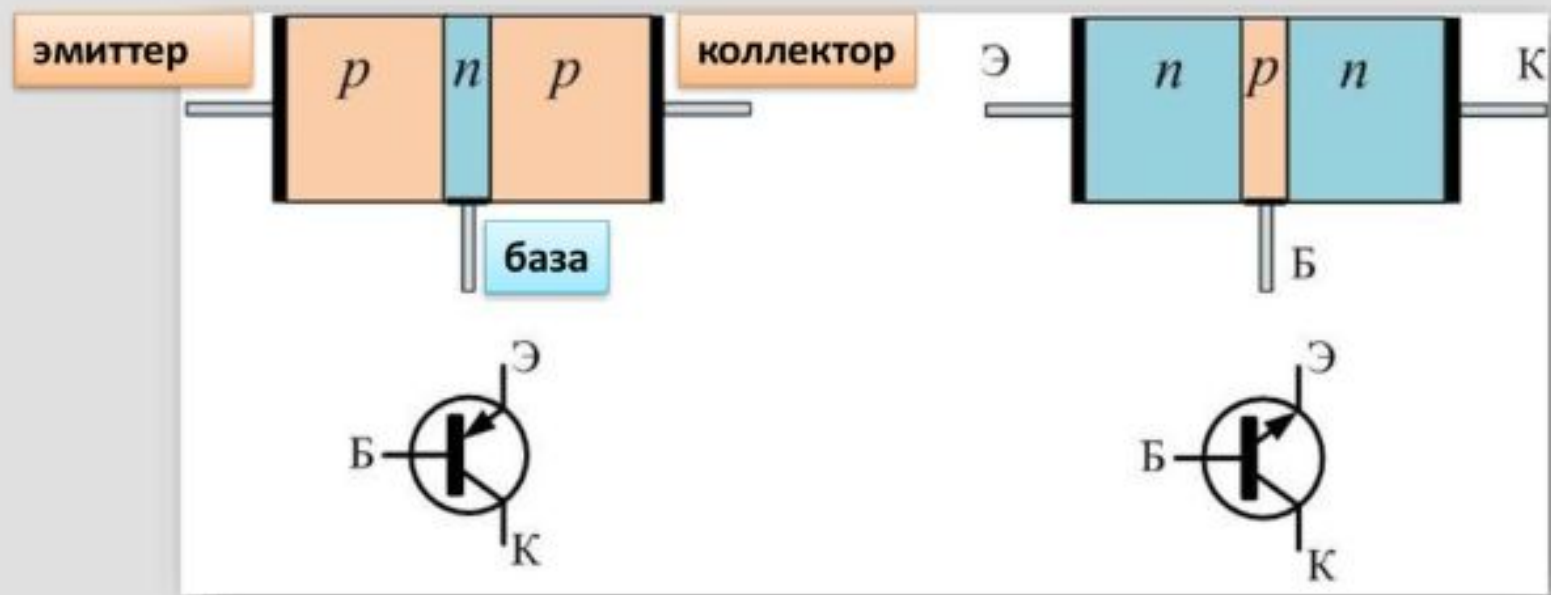
Жорес Алферов
Гетероструктуры, 1970
Исаму Акасаки,
Хироси Амано
Сюдзи Накамура
Дешевый синтез синего
Светодиода, 1990



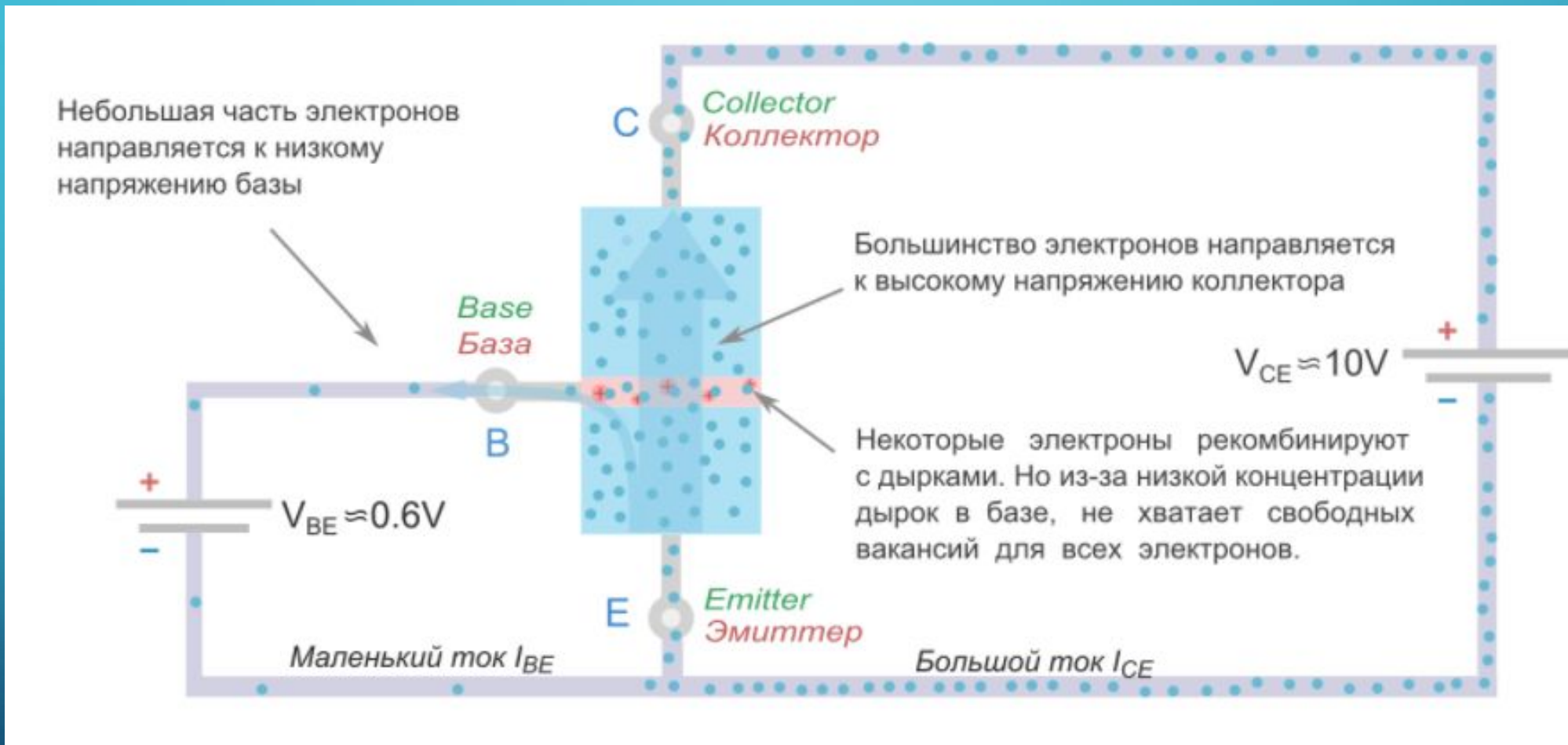
Транзистор

Транзистор – кристалл с двумя p - n -переходами

По типу чередования дырочной и электронной проводимостей:



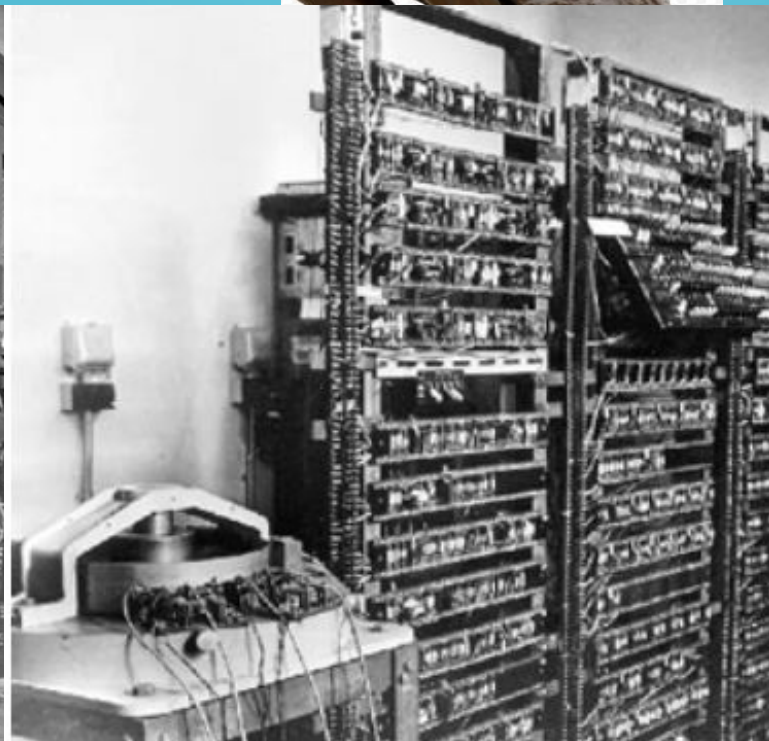
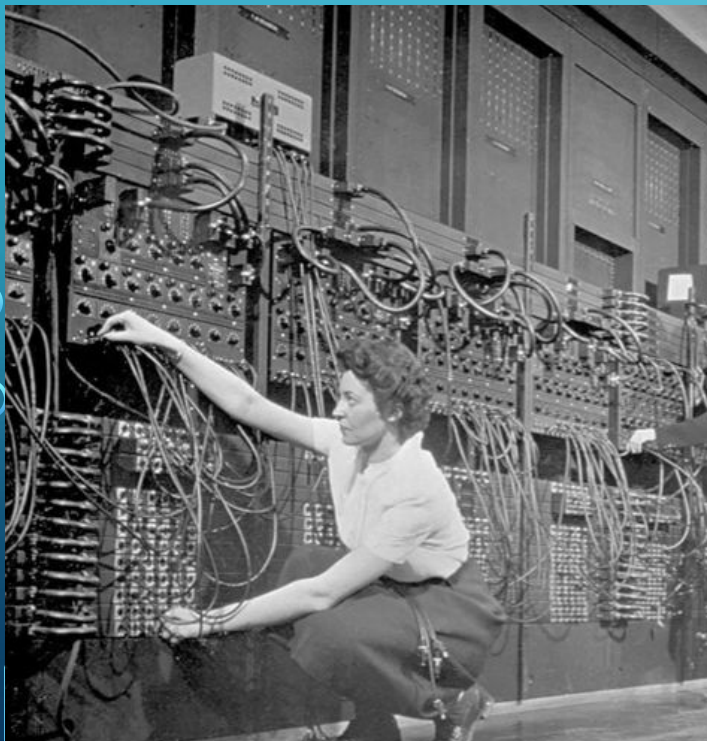
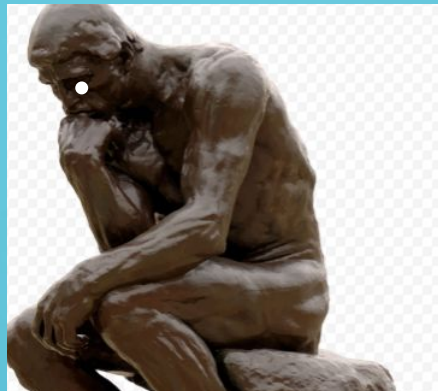
Принцип работы транзистора



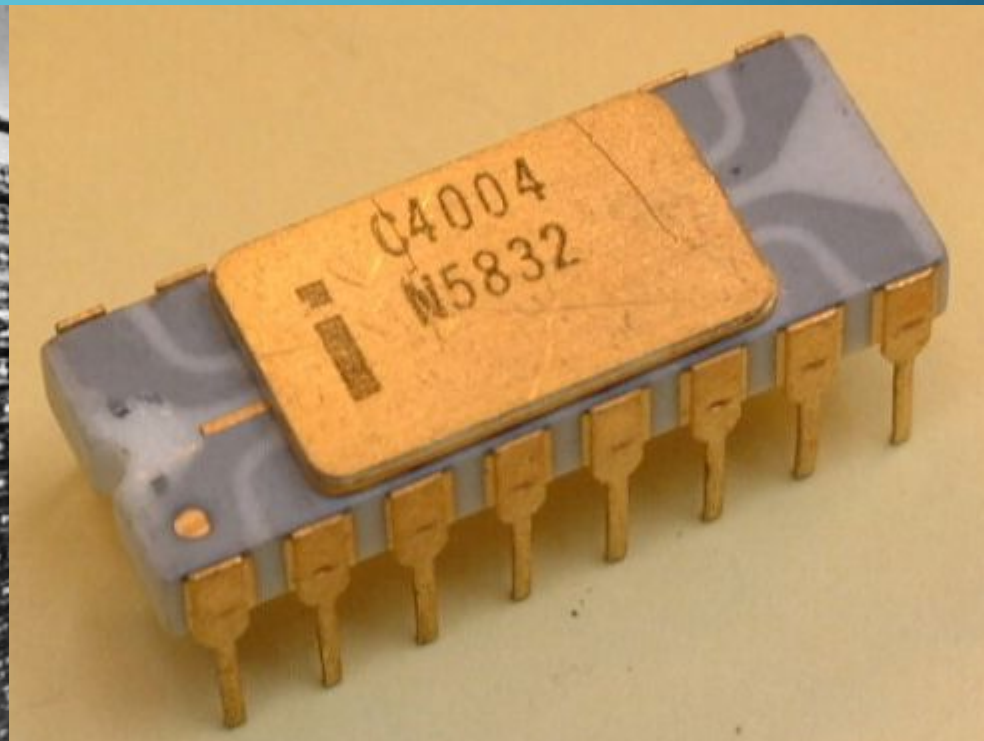
Ток идет

Принцип работы компьютера

0 или 1?



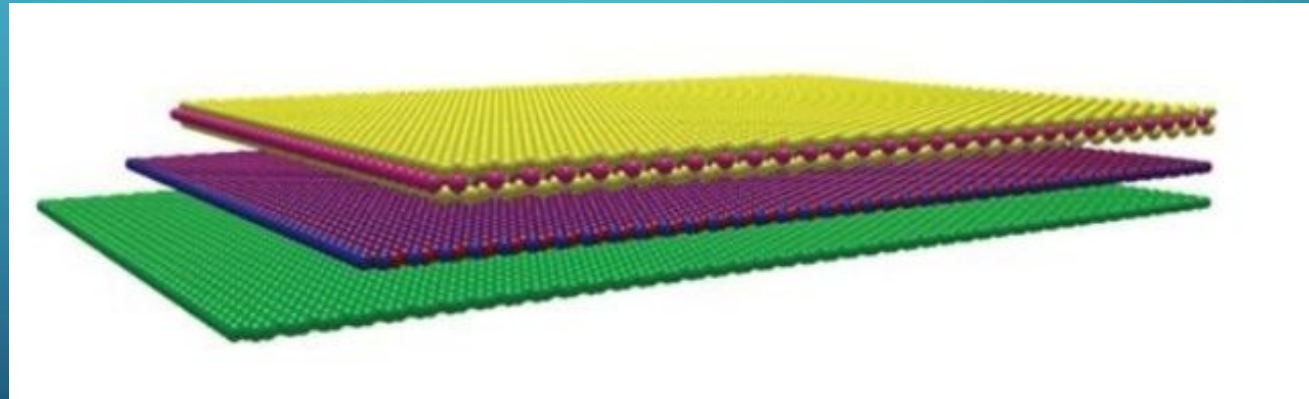
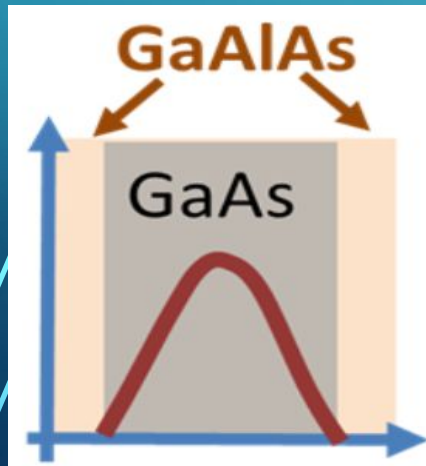
Первый транзисторный компьютер, 1953



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.

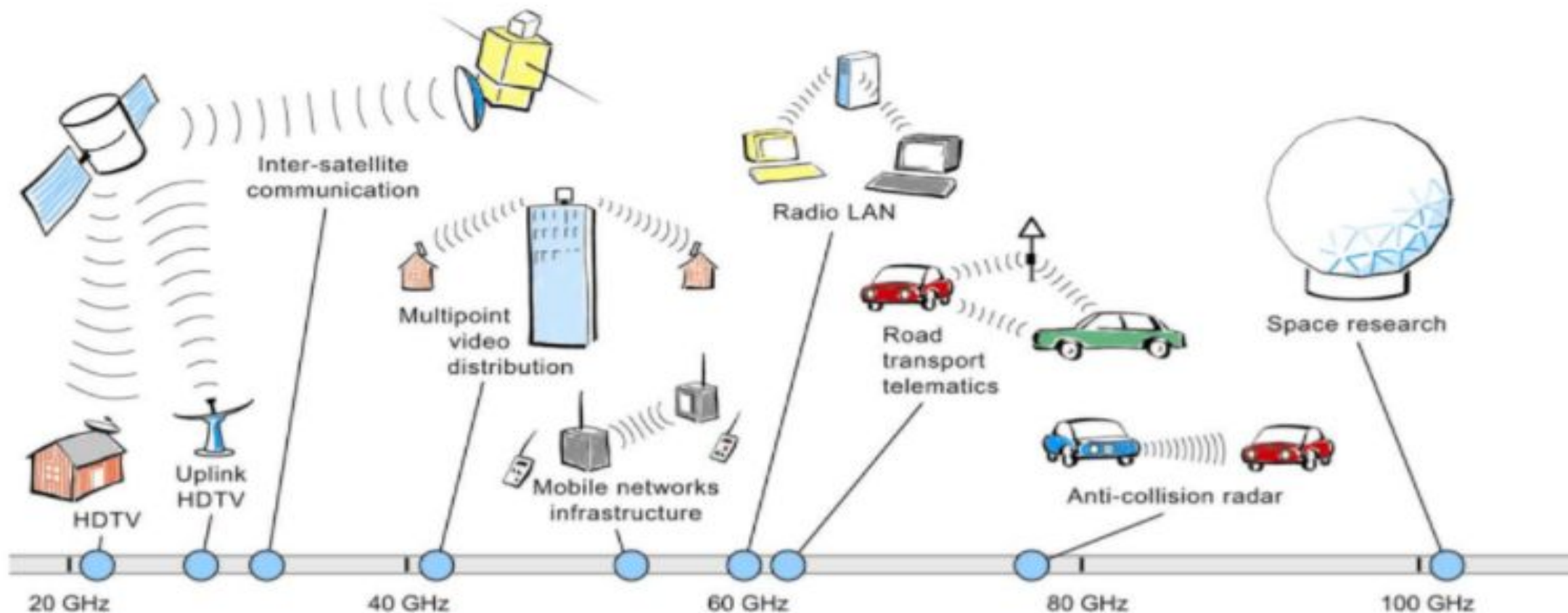


Жорес Алферов, Герберт Крёмер,
Нобелевская премия 2000



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.

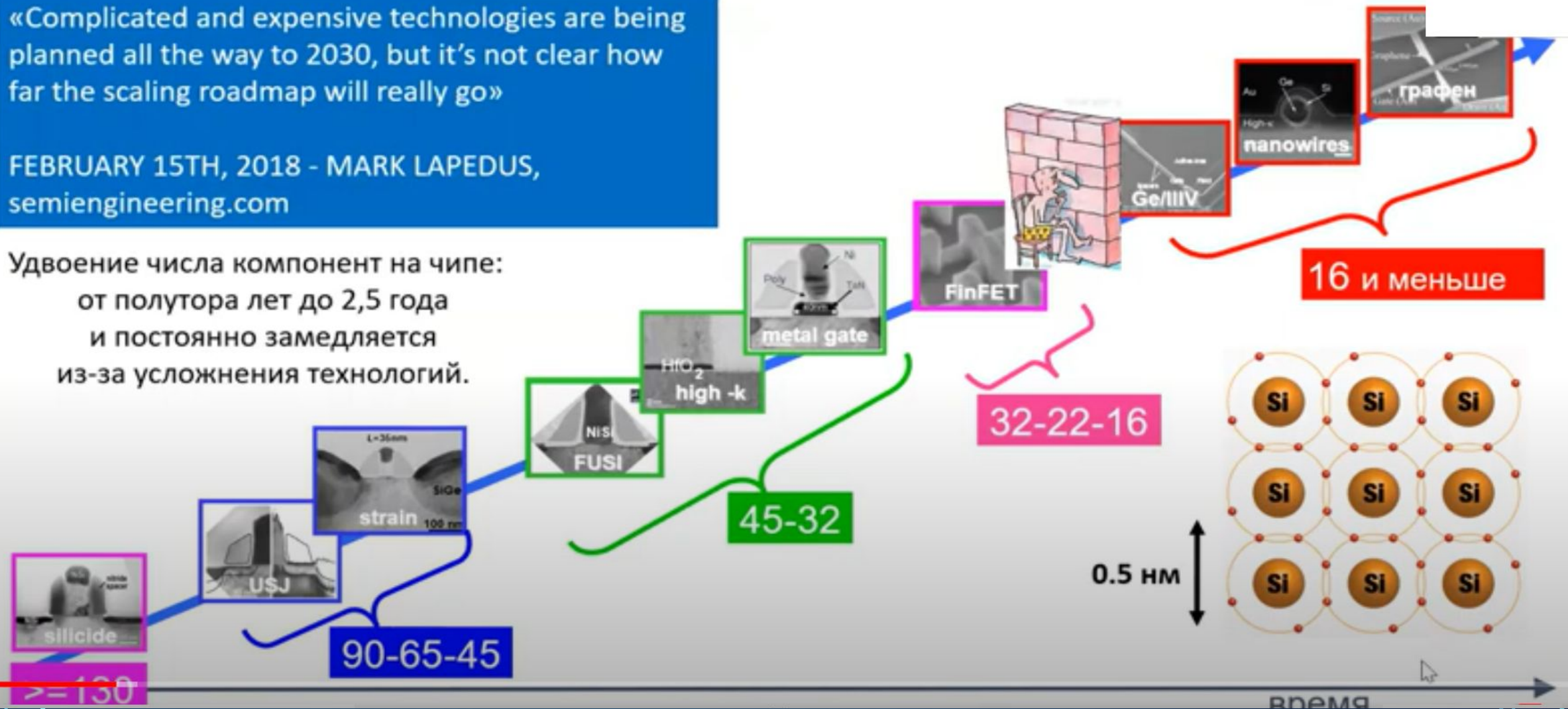
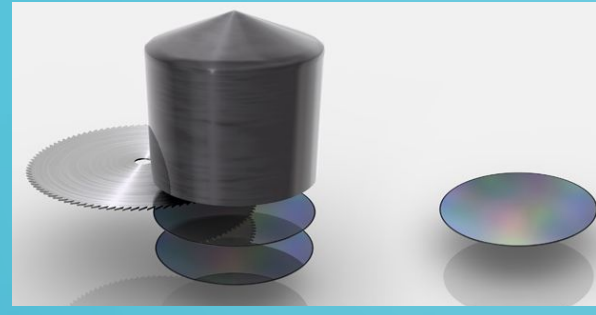


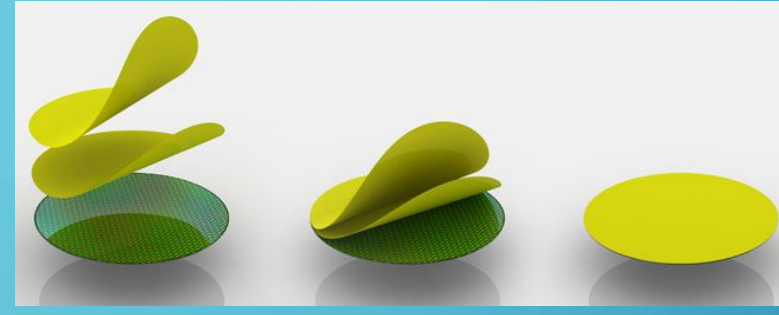
Схема производства ИМС



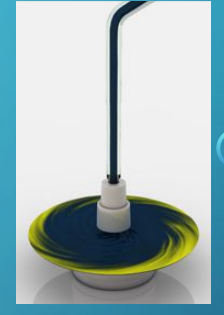
Выращивание кристалла



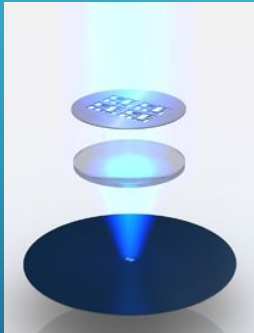
Получение пластин



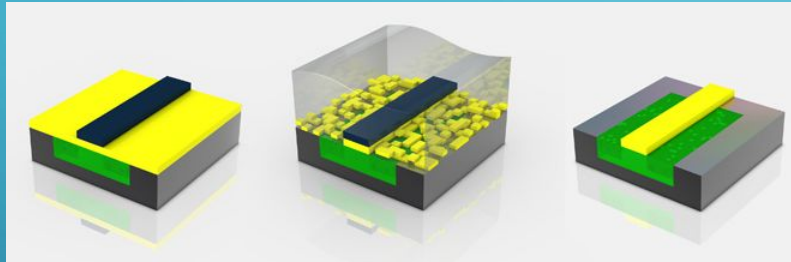
Нанесение защитного слоя



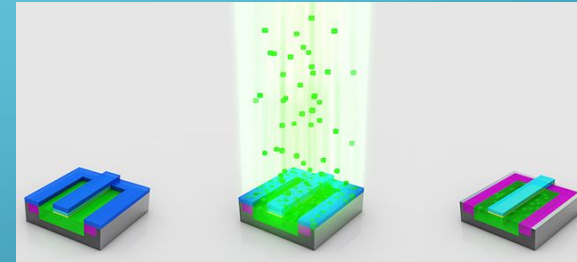
Фоторезист



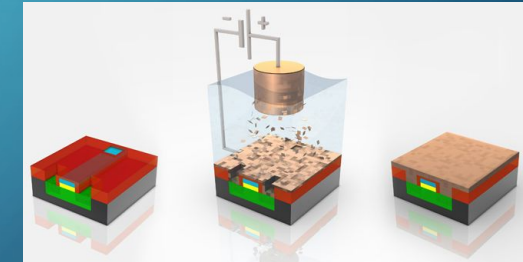
Фотолитография



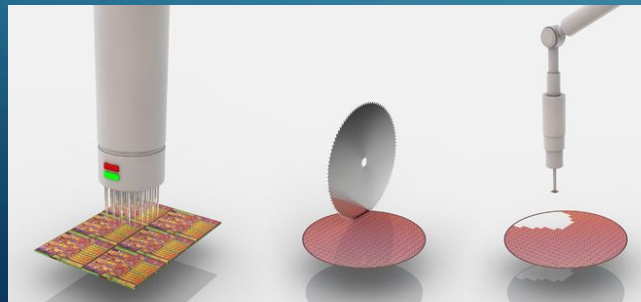
Травление



Легирование



Соединение радиоэлементов

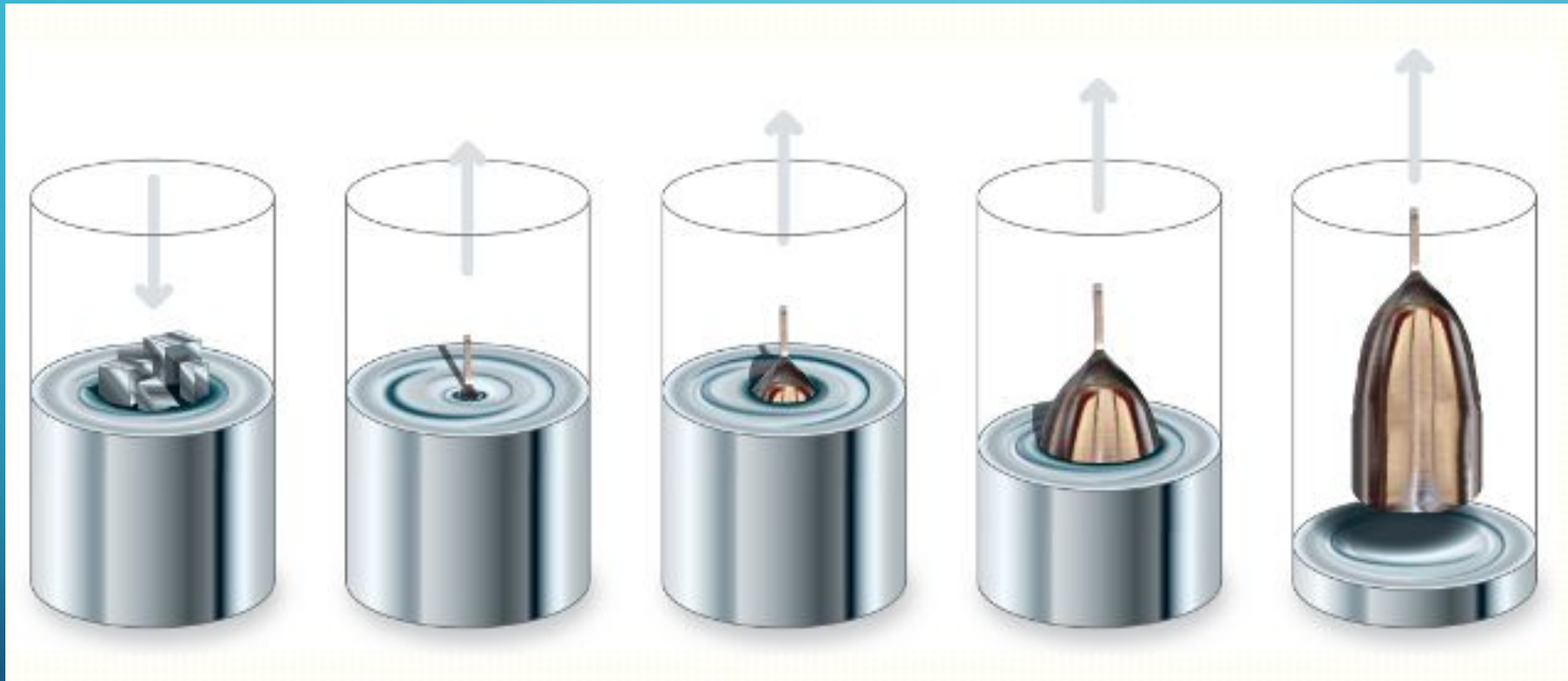


Вырезание чипов



Упаковка
в
подложку

Метод направленной кристаллизации Ян Чохральский 1916



Плавление
исходного
вещества

Введение
затравки

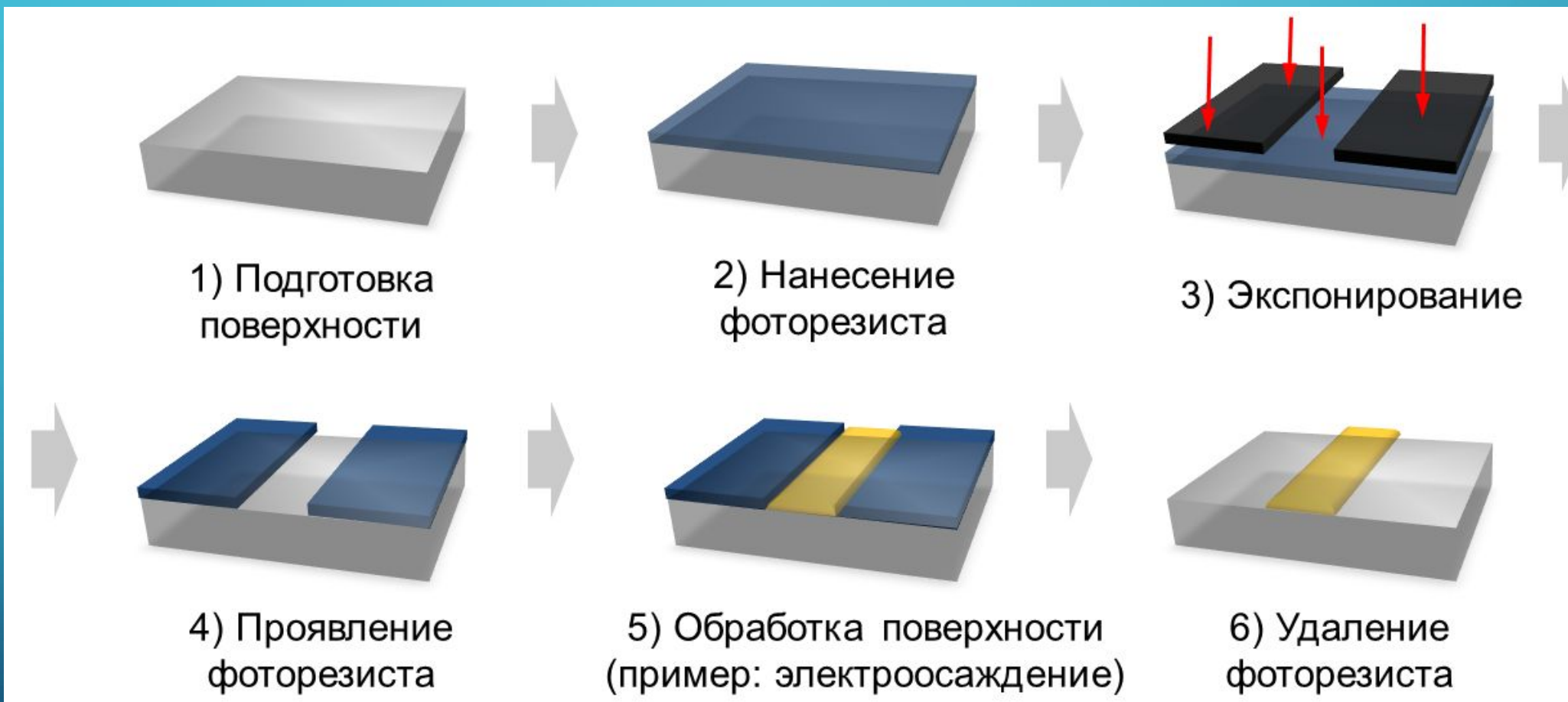
Начало
выращивания
кристалла

Вытягивание
кристалла

Выращенный
кристалл

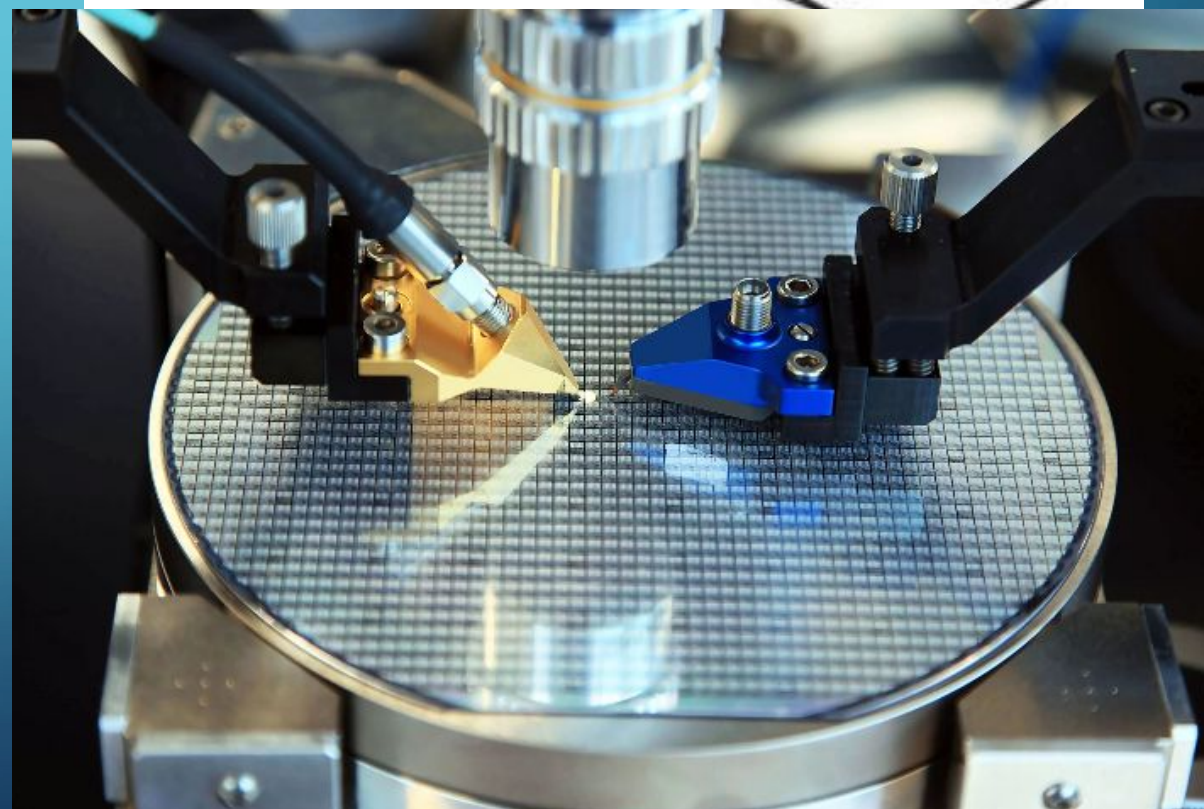
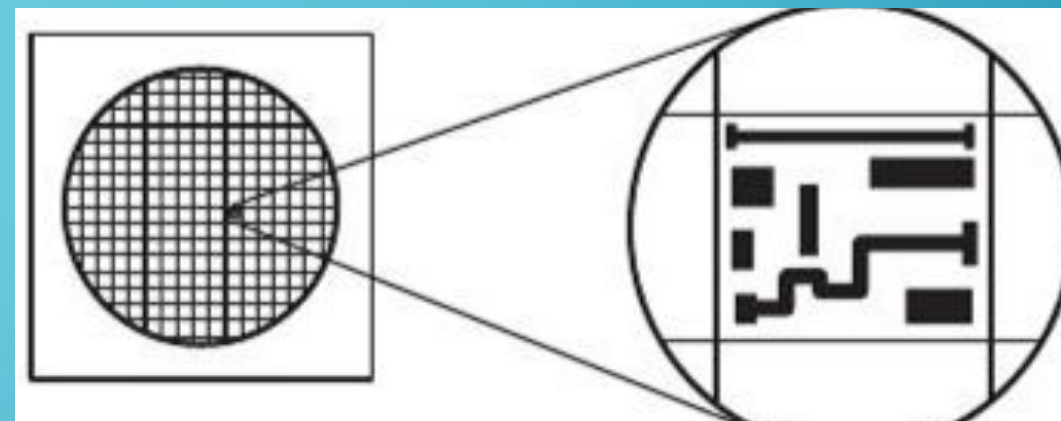
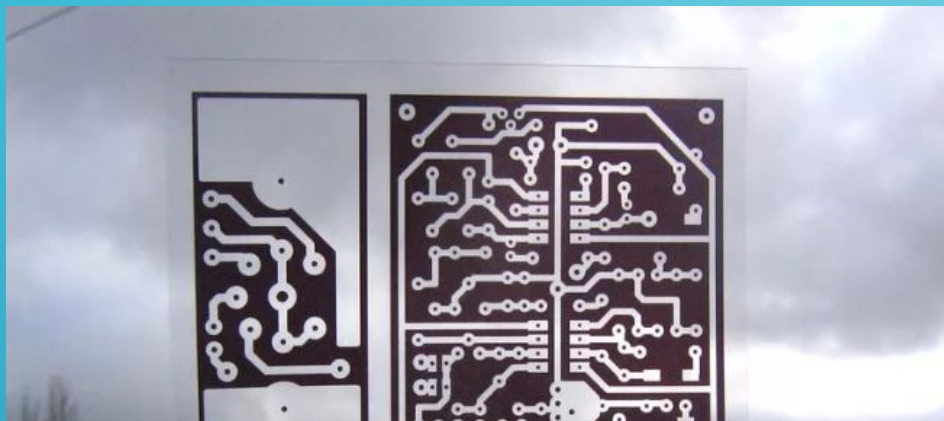


Литография – формирование отверстий в масках



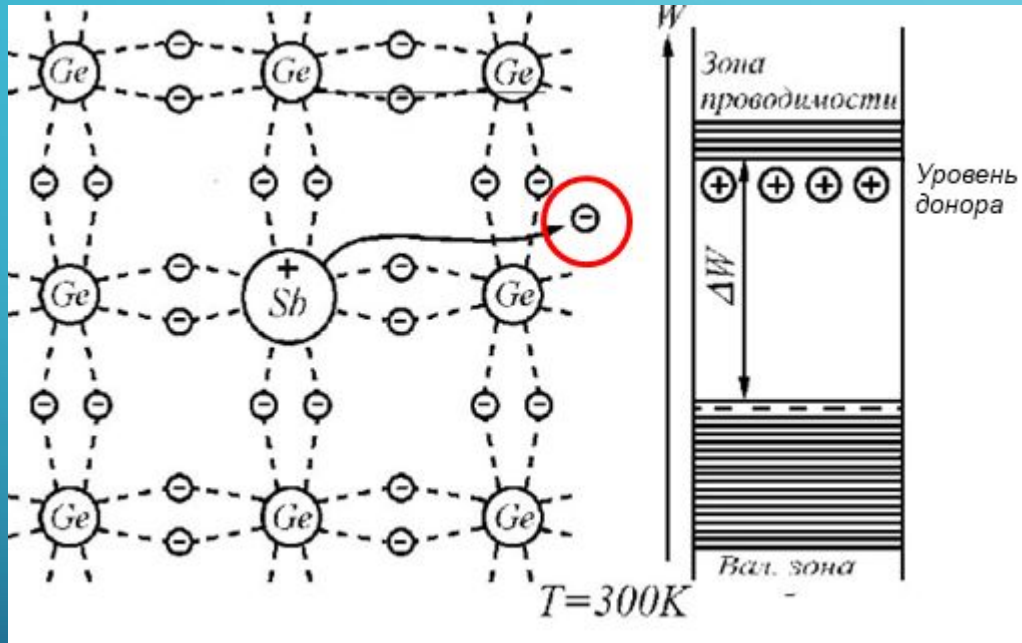
Фоторезист - вещество в котором под воздействием излучения протекают хим. реакции

Фотолитография → Рентгенолитография → Электронолитография



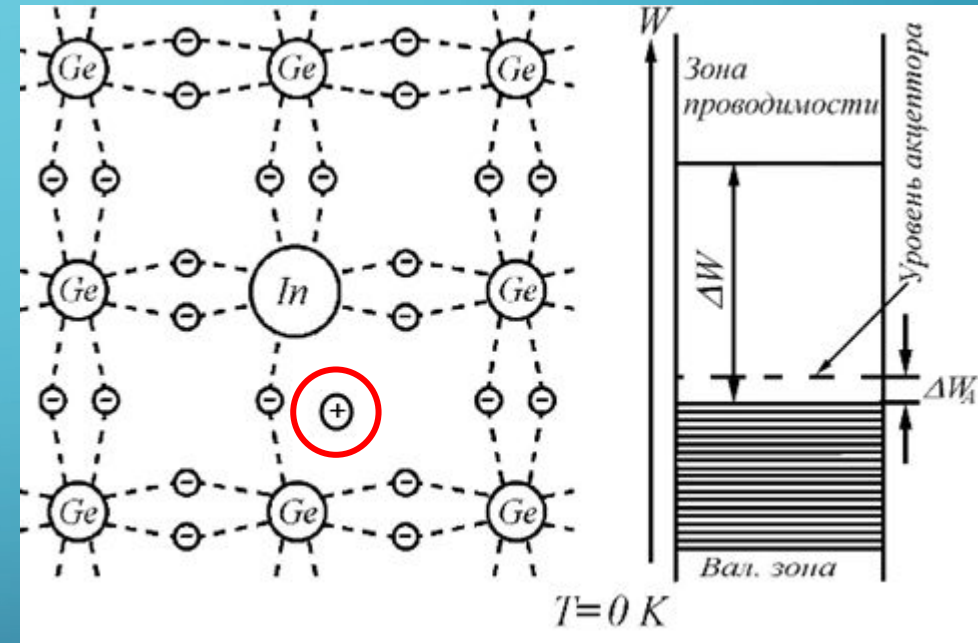
Легирование – локальное введение в подложку донорных или акцепторных примесей, для образования р-п переходов

Примесь Sb (5e)



n-типа

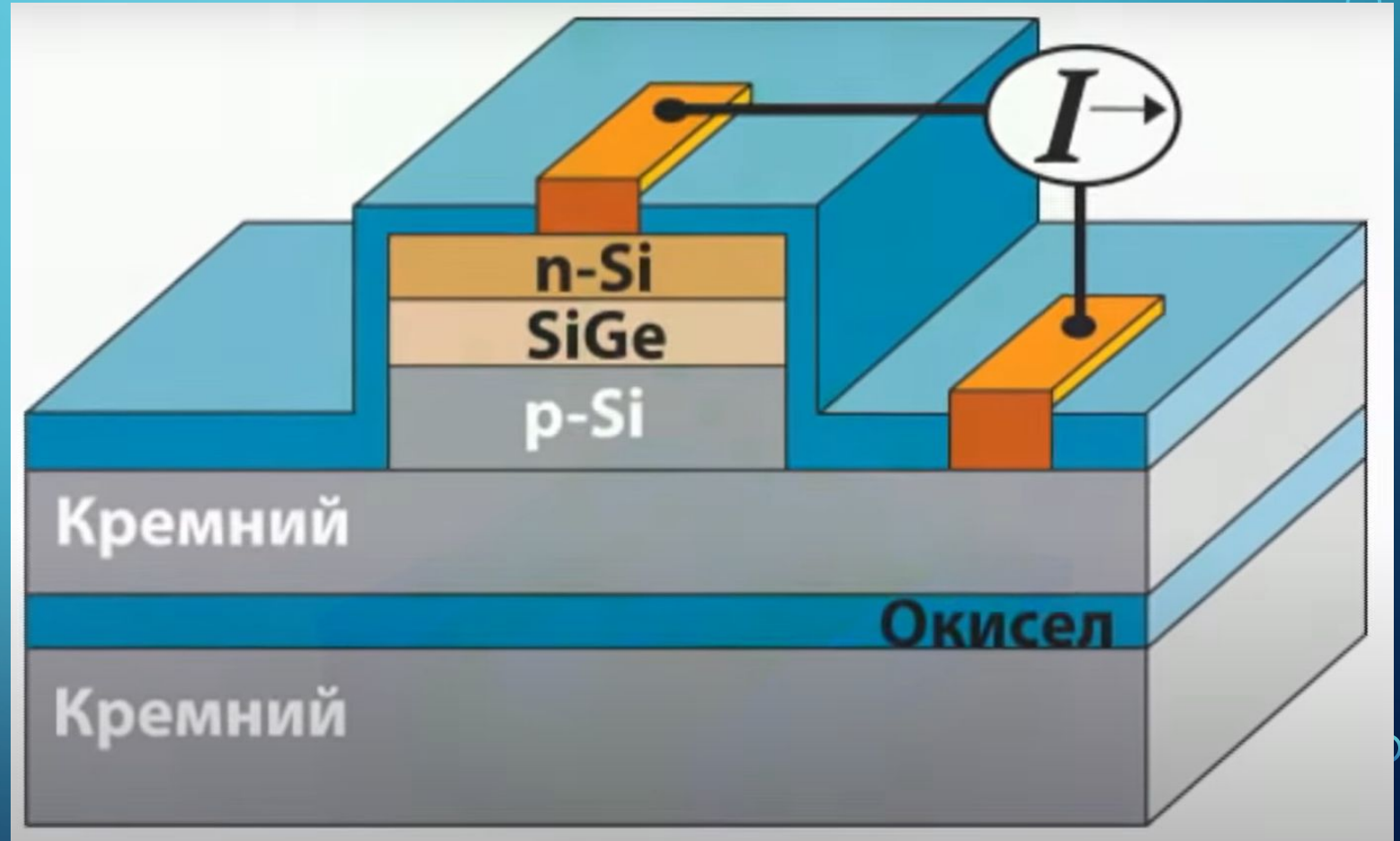
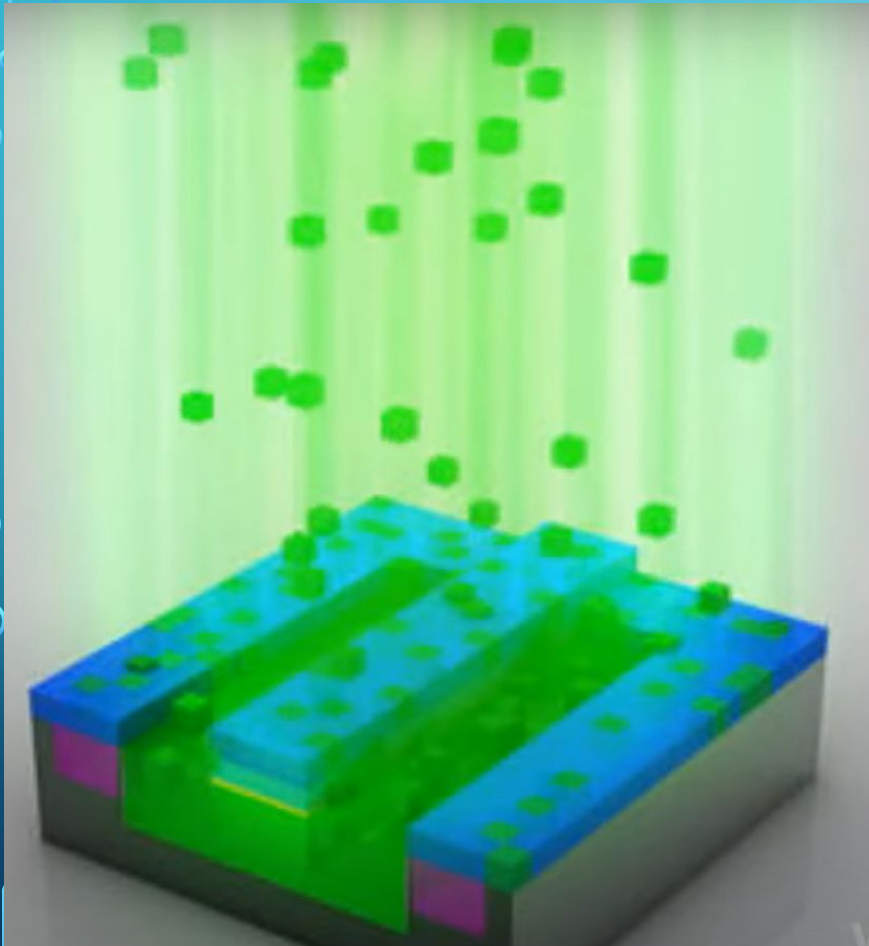
Примесь In (3e)

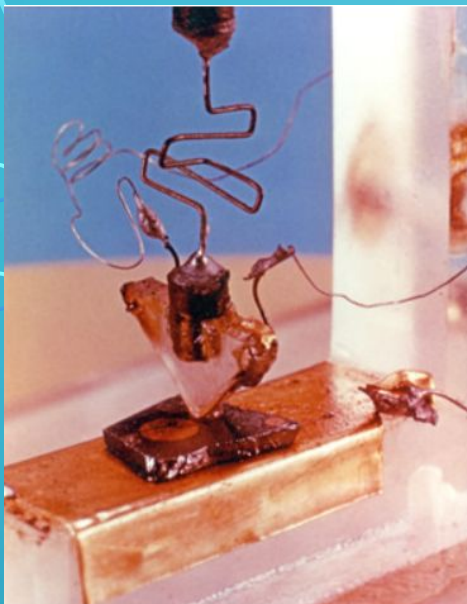


p-типа

Полупроводник	Донор	Акцептор
Si, Ge	V группа (B, In, Al, Ga)	III группа (P, As, Sb)
A ^{III} B ^V	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

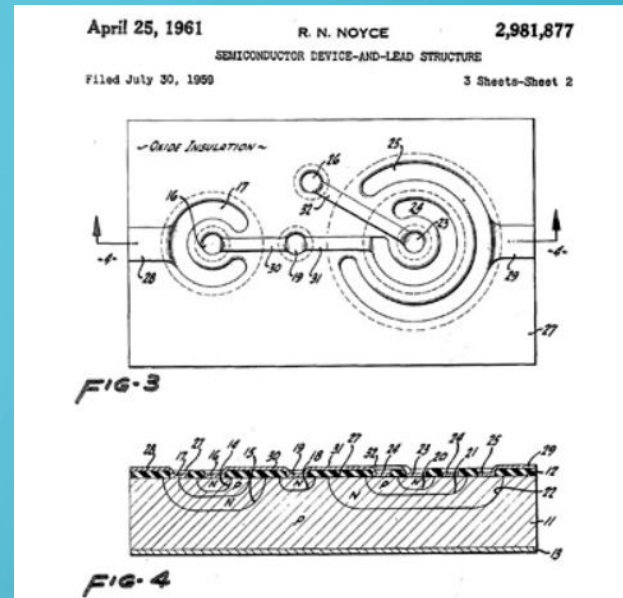




Транзистор, 1948



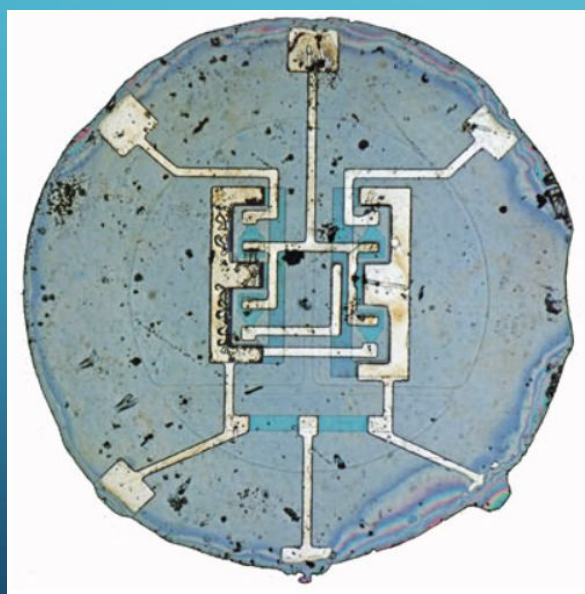
Первая легированная надпись



Патент первой планарной микросхемы, 1961



Транзисторное радио, 1953

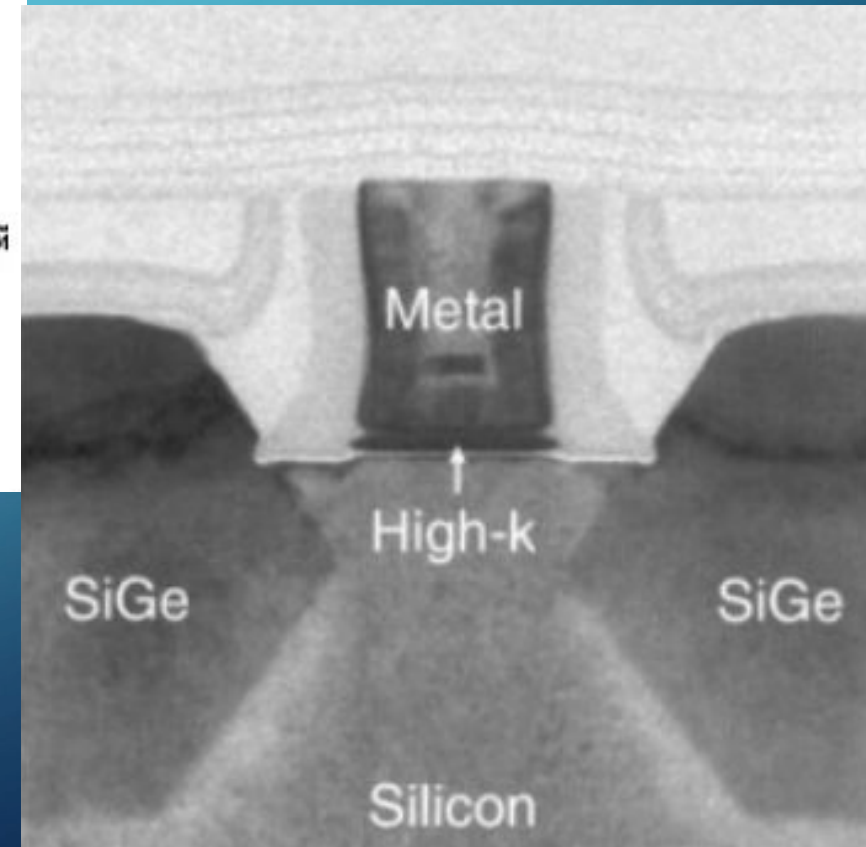
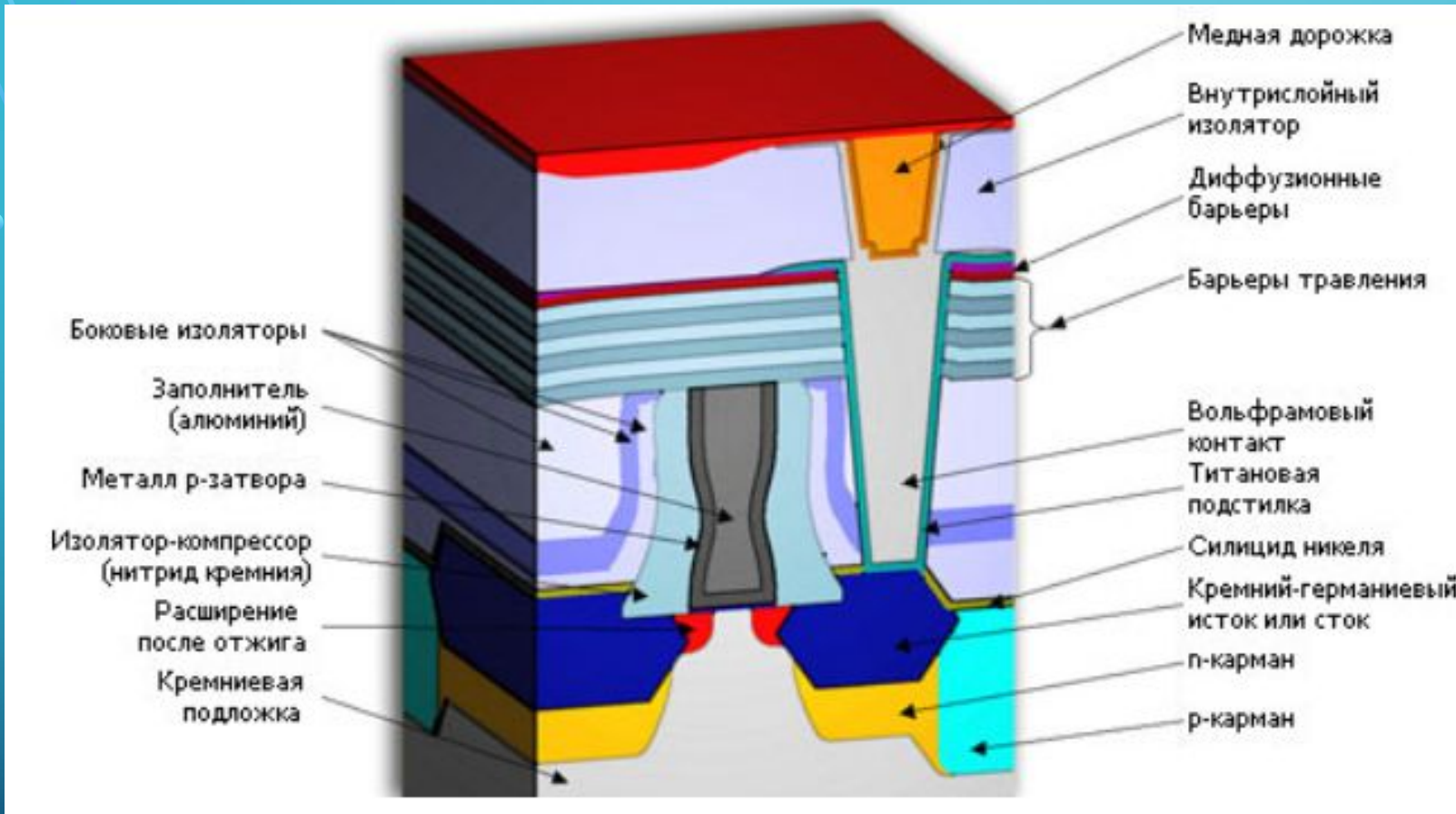


Кристалл микросхемы, 1960



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
 $A^{IV}B^{IV}$

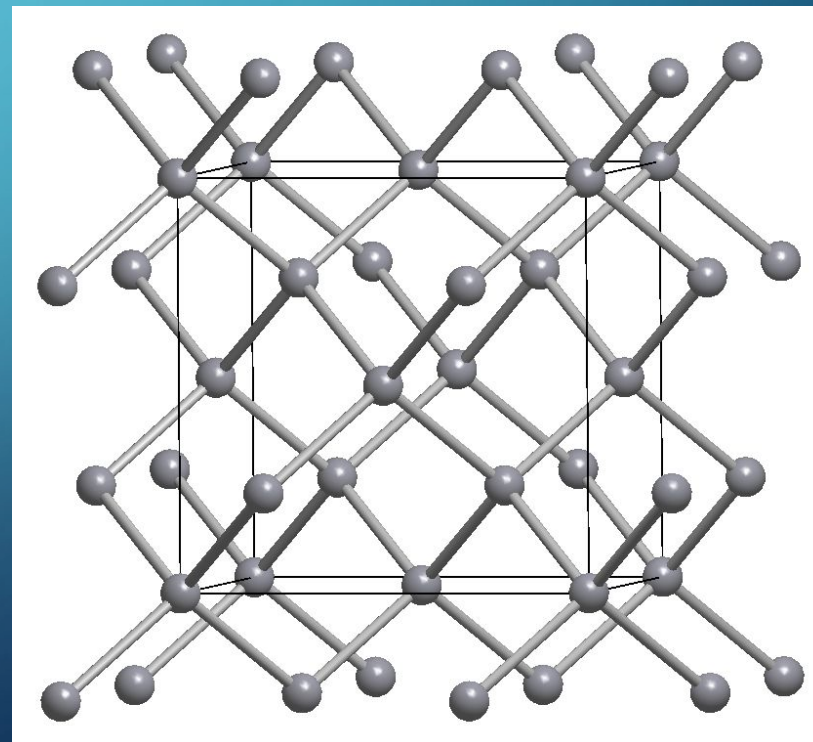
Аморфные
ПП

Органические
ПП

Простые ПП

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

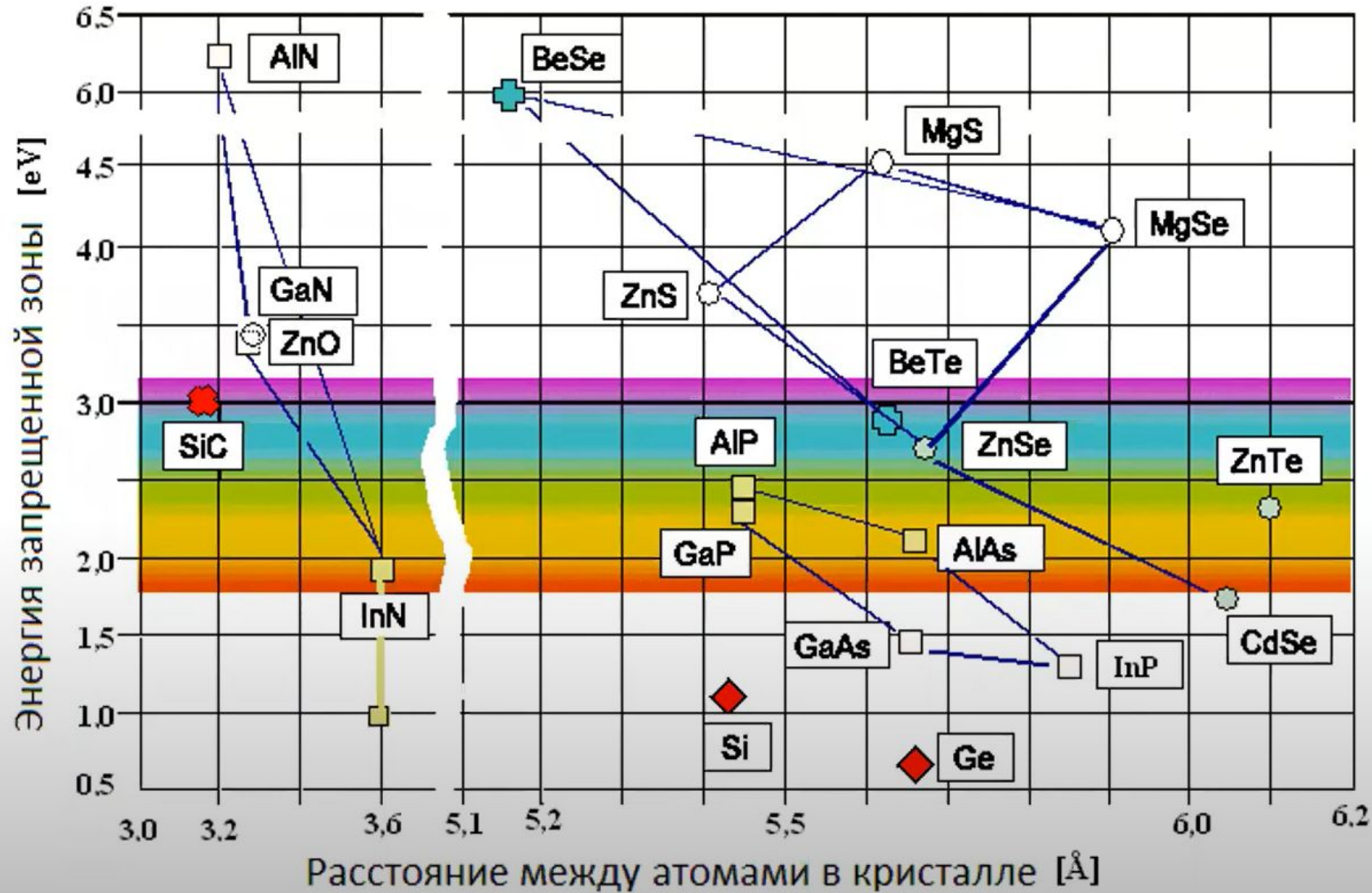
Период	Группа				
	III	IV	V	VI	VII
1					
2	B	C	N	O	F
3	Al	Si	P	S	Cl
4	Ga	Ge	As	Se	Br
5	In	Sn	Sb	Te	I
6	Tl	Pb	Bi	Po	At



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 α -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.

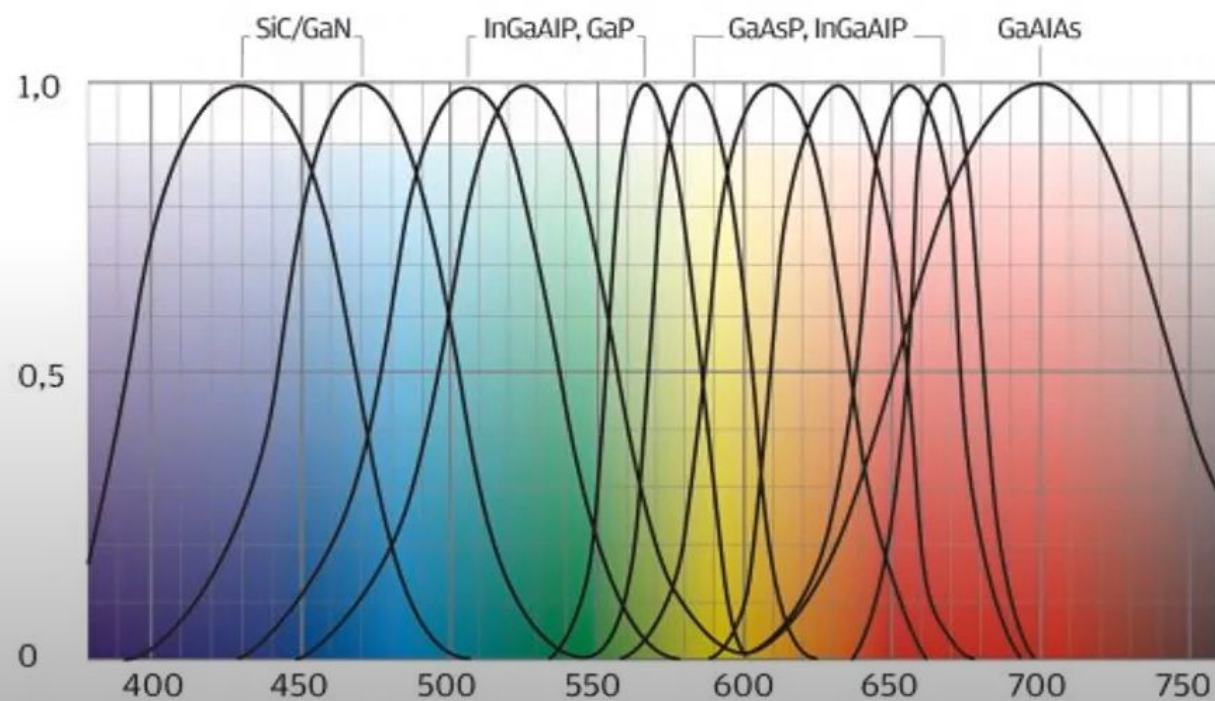
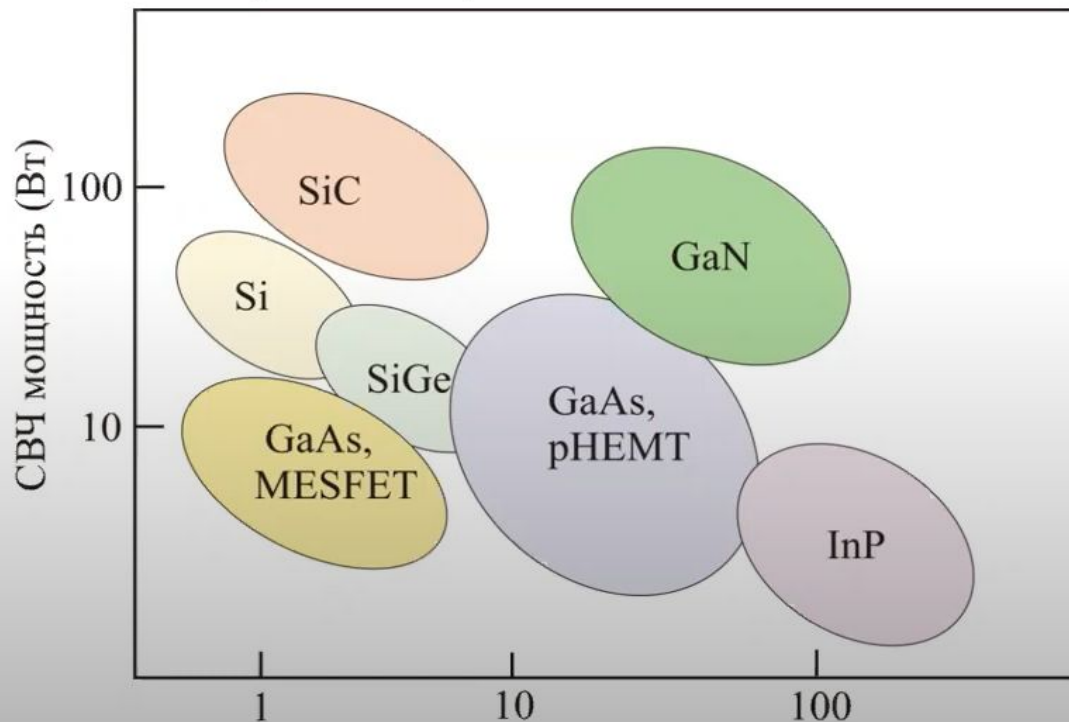
А расстояние между атомами в кристалле (постоянная решетки) — **механическую совместимость** материалов и возможность создания тех или иных гетероструктур.

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.

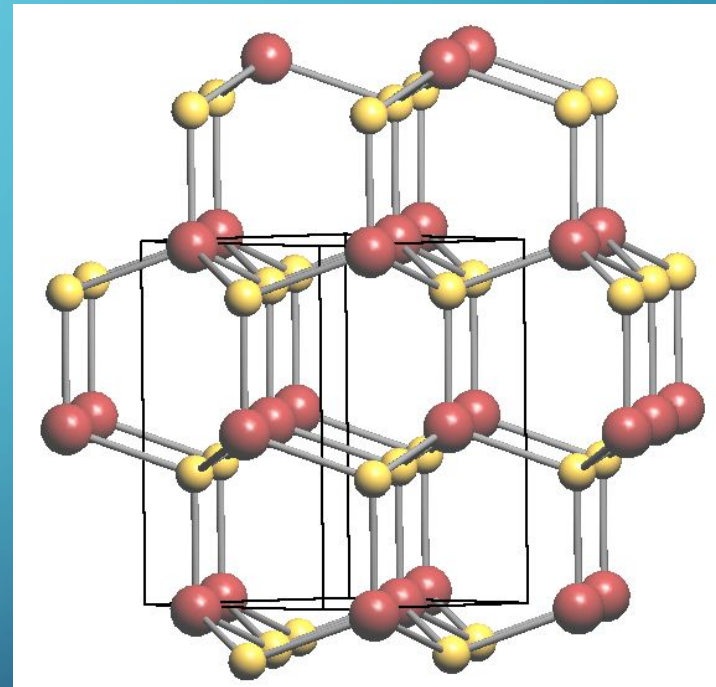
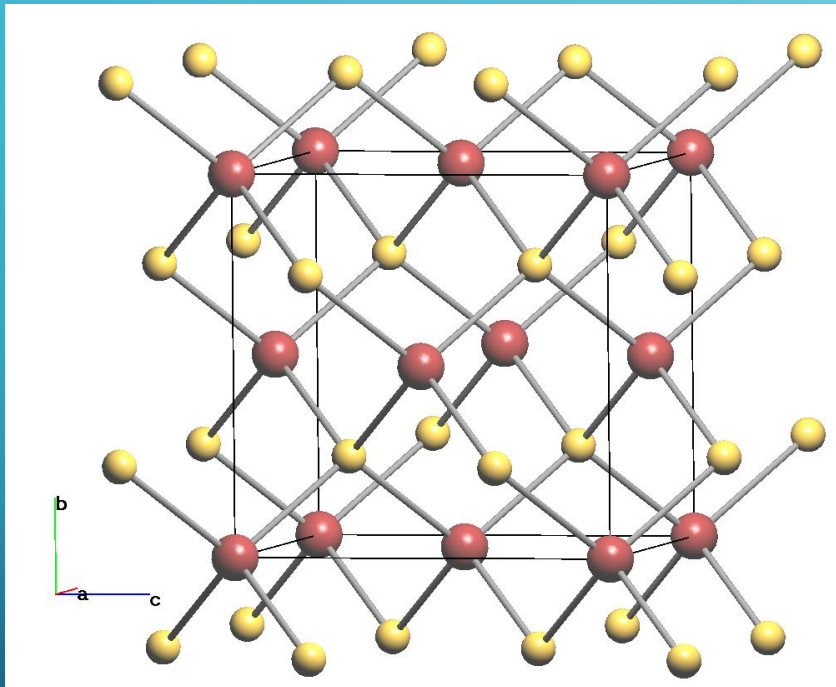
Тенденция последних лет – переход к наноматериалам, таким как графен.



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 π -связей

Возбуждение молекул при поглощении света

Генерация носителей тока при возбуждении

π -электронов

Дешевое производство, пластичность,
легкоплавкость, стойкость к радиации,

высокая светочувствительность

(светочувствительные материалы, датчики)

