

# Материалы с особыми электрическими свойствами

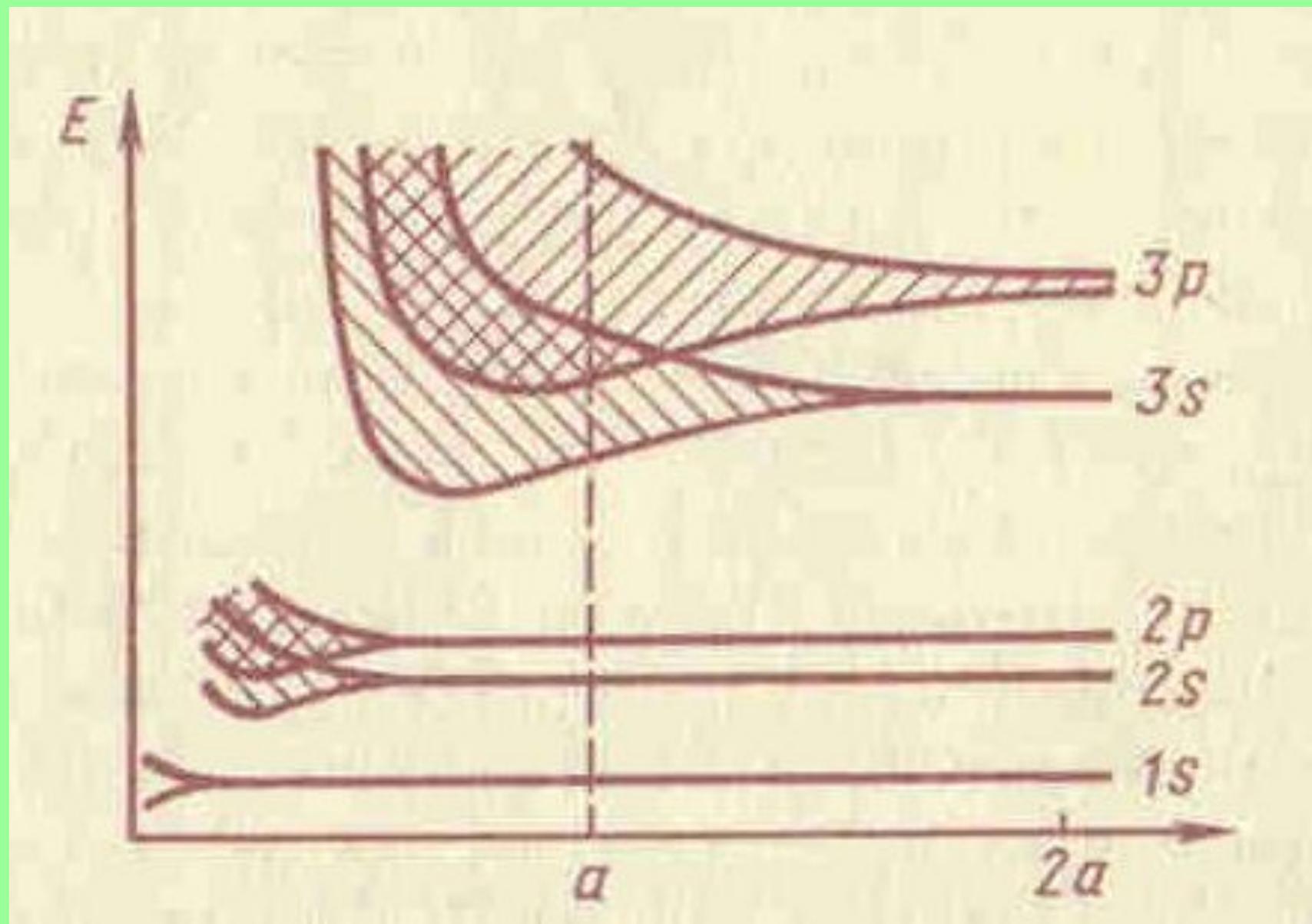
Материалы по электрическим свойствам подразделяют на три группы:

- Проводники
- Полупроводники
- Диэлектрики

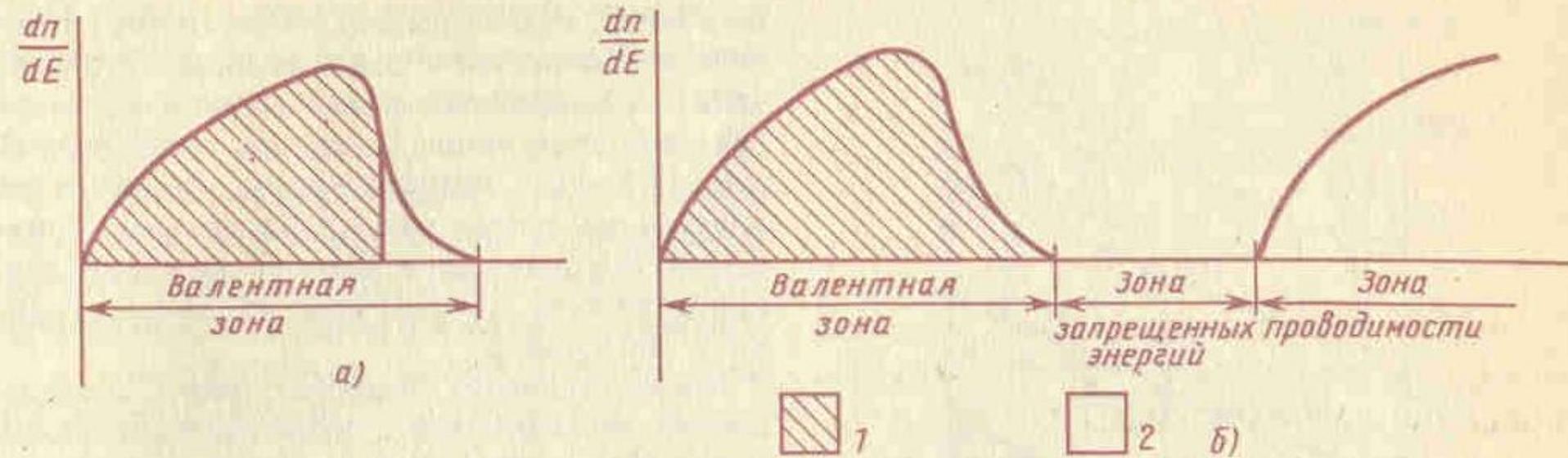
Электрическая проводимость определяется электронным строением атомов

В твердых телах в результате взаимодействия электромагнитных полей атомов энергетические электронные подуровни расщепляются, образуя энергетические зоны

# Образование энергетических зон при сближении атомов натрия



# Функция распределения электронов по энергиям



а-в проводнике

б-в полупроводнике и диэлектрике

1-заполненные подуровни

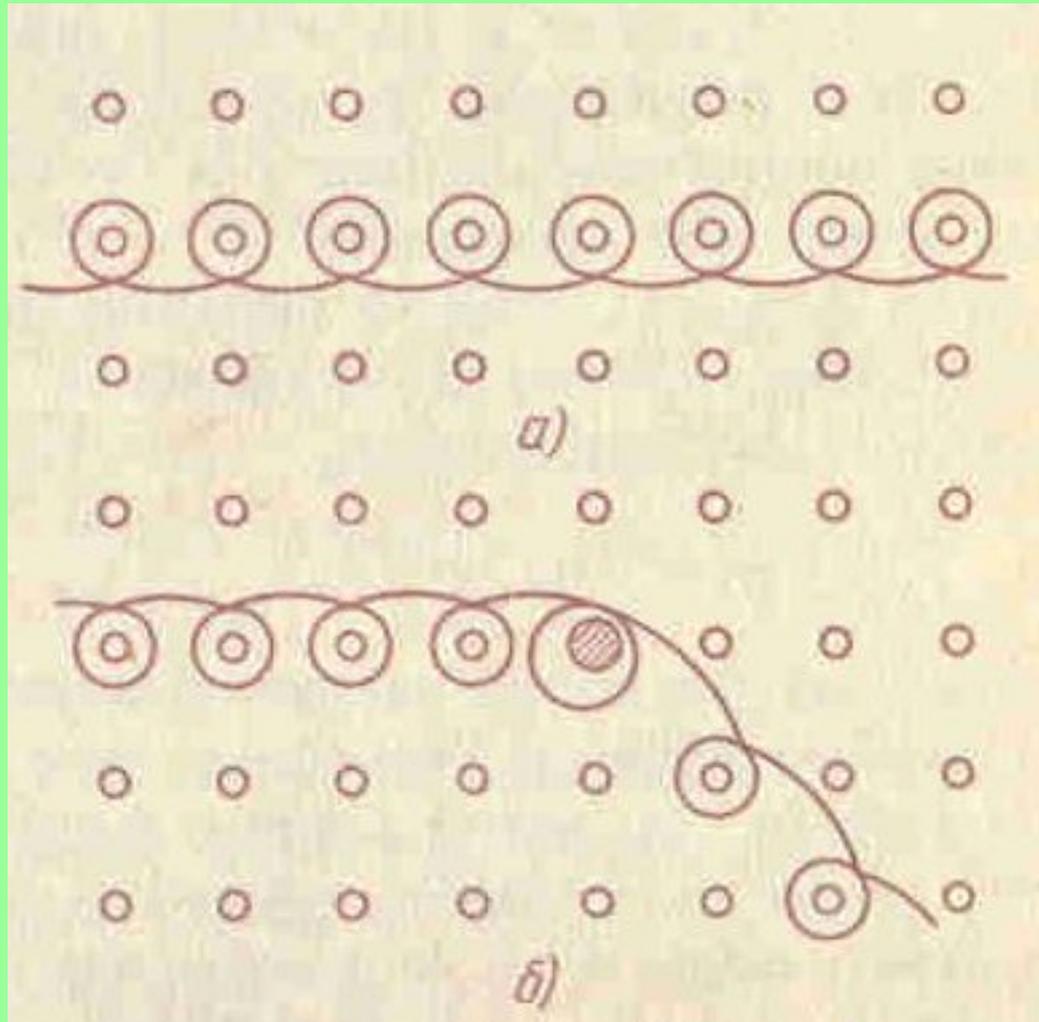
2-свободные подуровни

Ширина запрещенной зоны определяет электрическую проводимость полупроводников

- Для химически чистого германия –  $1,2 \times 10^{-19}$  Дж
- Алмаз -  $8,5 \times 10^{-19}$  Дж

Электроны в проводниках при наложении электрического поля испытывают тормозящее влияние кристаллической решетки

# Движение электронов в решетке кристалла

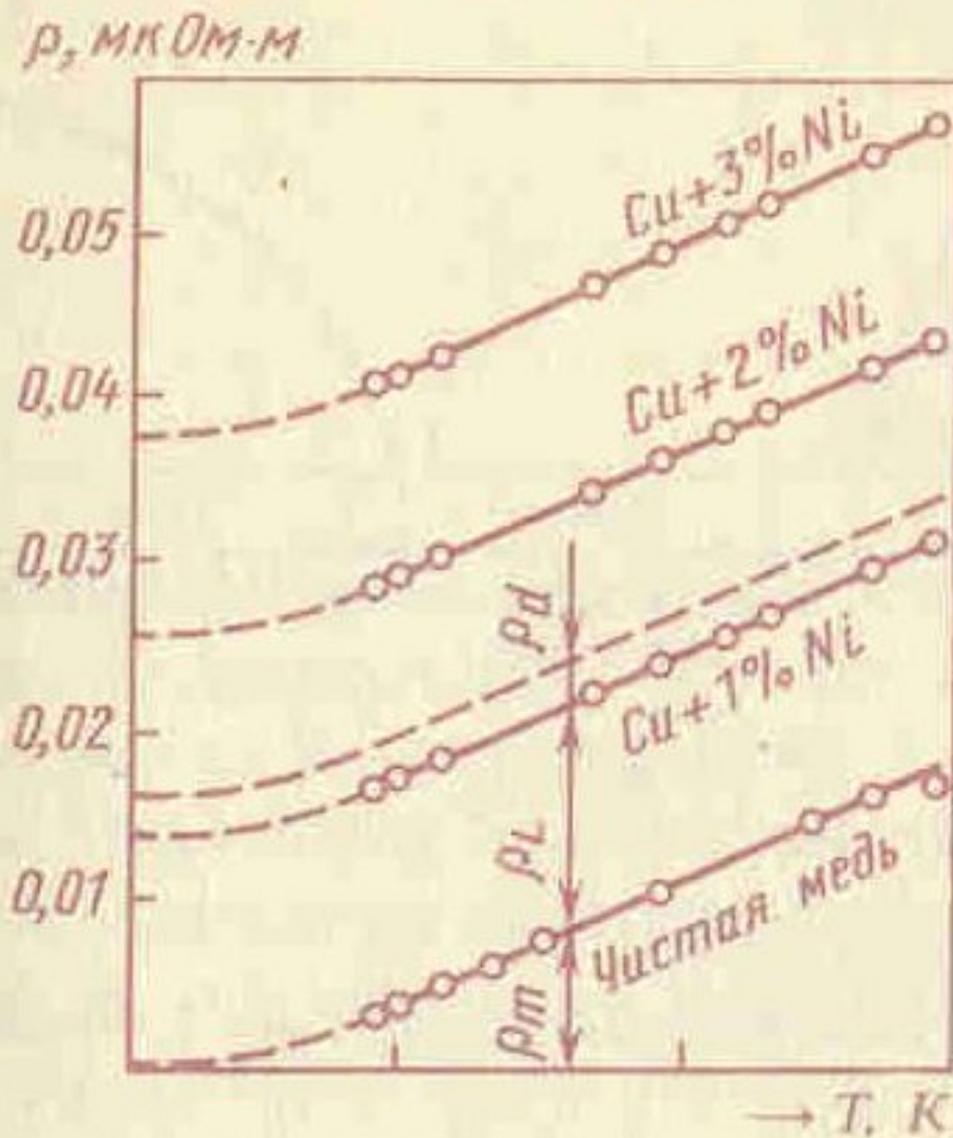


а-идеальной

б-реальной с примесью чужого атома

Общее электрическое сопротивление металла складывается из сопротивлений, обусловленных тепловым и примесным рассеянием. Деформация и остаточные напряжения создают искажения в кристаллической структуре

# Изменение электрического сопротивления меди и сплавов при нагреве

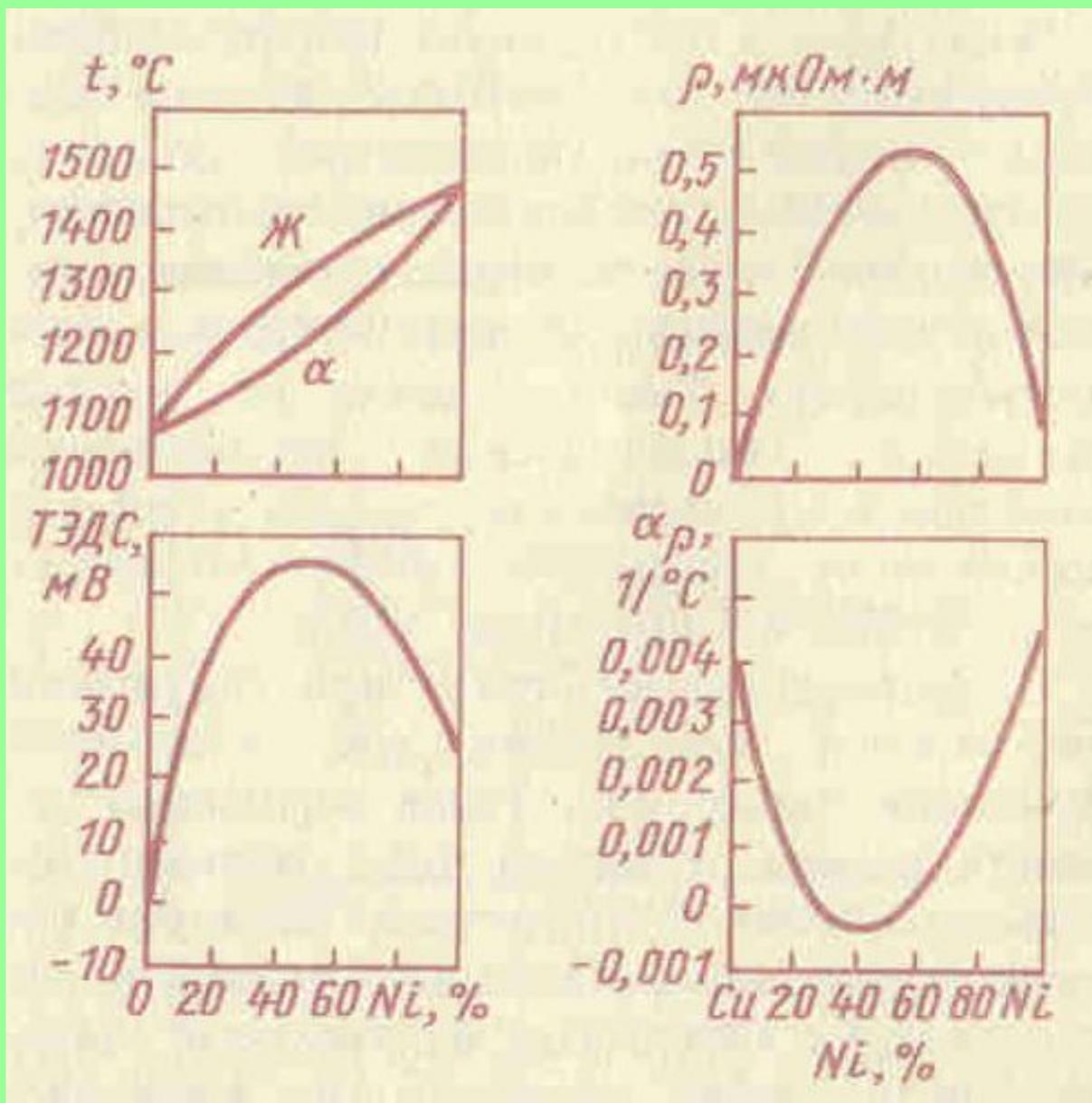


$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha_\rho T)$$

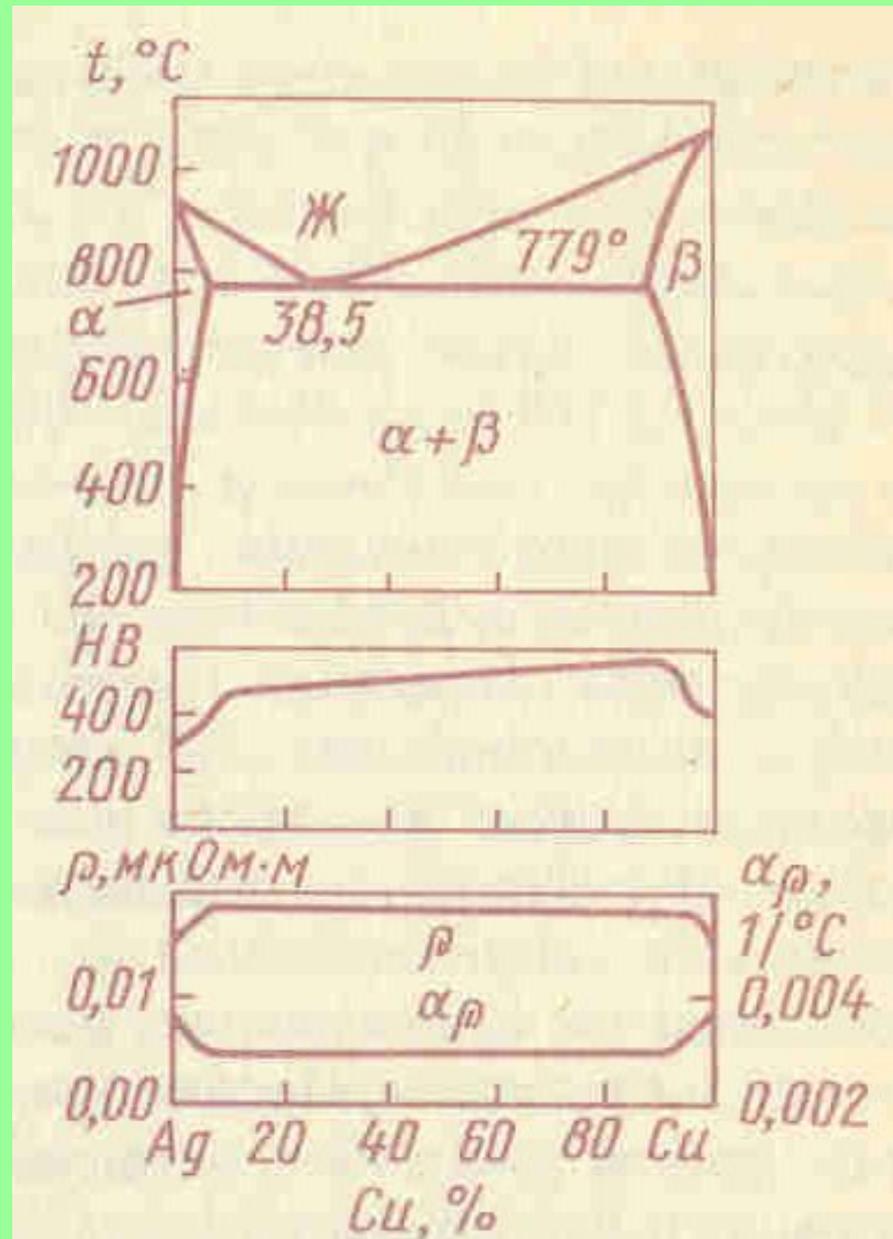
Из формулы можно определить температурный коэффициент электрического сопротивления

$$\alpha_\rho = (\Delta\rho / T)(1 / \rho_0)$$

# Диаграмма состояния и свойства сплавов *Cu-Ni*



# Диаграмма состояния и свойства сплавов *Ag-Cu*



# Проводниковые материалы

- Металлы и сплавы высокой проводимости
- Припой
- Сверхпроводники
- Контактные материалы
- Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением

# Электрические свойства металлов при 20 °С

Свойства	Ag	Cu	Au	Al	Fe	Sn	Zn	W
$\rho$ , мкОм·м	0,006	0,017	0,022	0,028	0,098	0,120	0,059	0,055
$\alpha_{\rho}$ , °С <sup>-1</sup>	0,004	0,004	0,004	0,004	0,006	0,004	0,004	0,005

# Механические свойства и удельное электрическое сопротивление меди и алюминия

Свойства	Медь		Алюминий	
	отож- женная	нагарто- ванная	отож- женный	нагарто- ванный
$\rho$ , мкОм·м	0,0175	0,0182	0,0295	0,0295
$\sigma_B$ , МПа	250— 280	340— 390	60	130
$\delta$ , %	20—30	0,5—2,0	28	5

# Припои

Должны обеспечивать небольшое переходное сопротивление. Различают:

- Низкотемпературные – температура плавления до 400 °С
- На основе Sn, Pb, Zn, Ag, имеют хорошую проводимость
- ПОС-61 183 °С, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50, ПОС-90(%Sn)

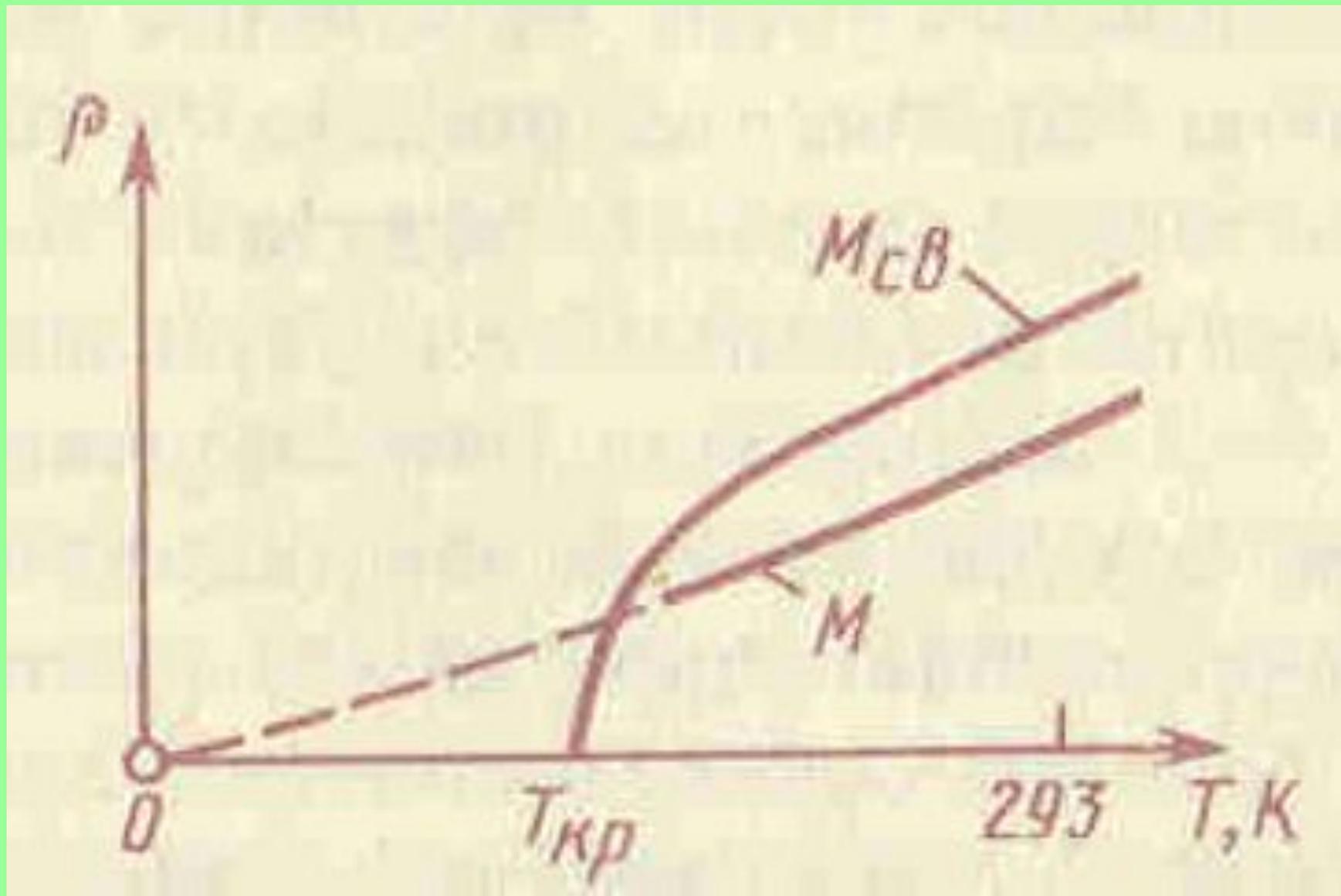
# Pb-Zn

- ПОЦ-90, ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40(Zn) для пайки алюминия и его сплавов.
- До 100 °С используют сплавы Bi-Pb-Sn-Ctd – малопрочные
- Для высокотемпературной пайки Cu-Zn, Cu-P
- ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54(Cu)
- ПСр-72, ПСр-61, ПСр-45, ПСр-10(Ag)

# Сверхпроводники

- Применяют для обмоток мощных генераторов, магнитов, туннельных диодов (для ЭВМ)
- Диамагнетики, способны выталкивать магнитное поле. (Отсутствие опор – уменьшение трения)

# Изменение электрического сопротивления в металлах и сверхпроводниках в области низких температур



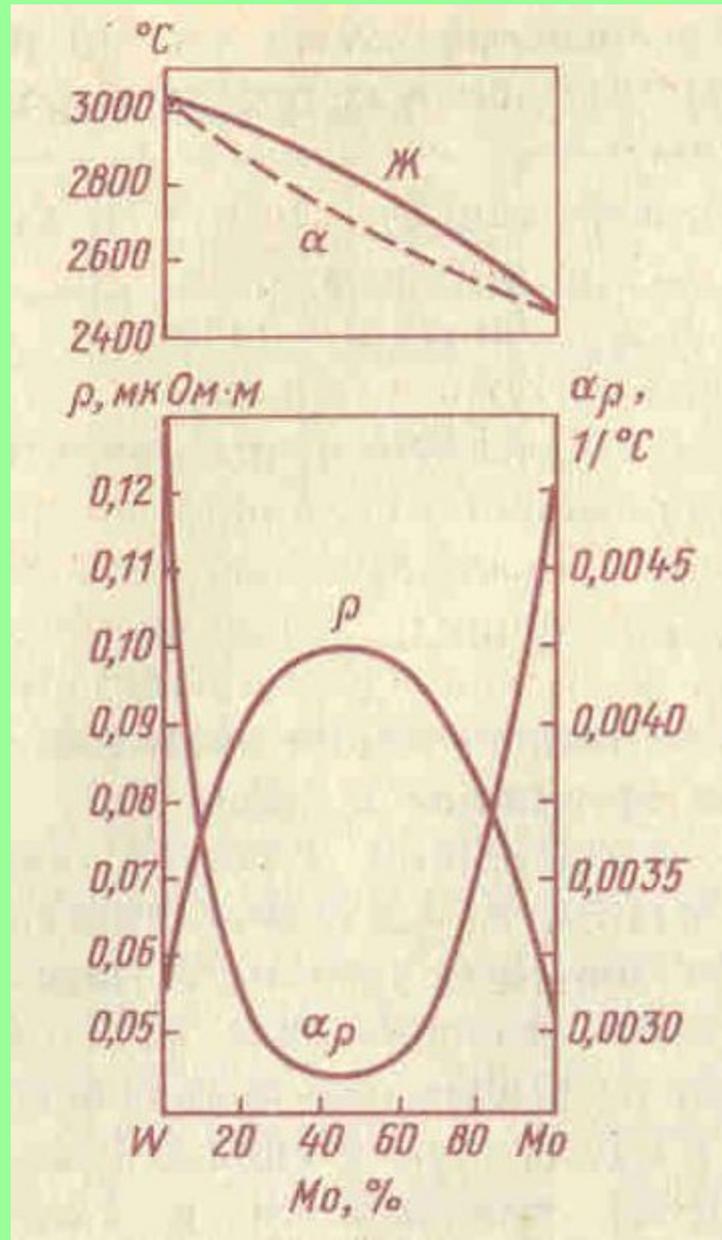
# Контактные материалы

- Разрывные
- Скользящие
- Неподвижные

# Слабонагруженные контакты

- Изготавливают из Au, Ag, Pt, Pd и их сплавов

# Диаграмма состояния и свойства сплавов *W-Mo*



- Метод внутреннего окисления. Сплав СОМ-10(10%Cu). Длительное окисление 50ч при температуре 700 °С на воздухе

# СКОЛЬЗЯЩИЕ КОНТАКТЫ

- Высокое сопротивление свариванию
- МГЗ, МГ5, СГЗ, СГ5(%графита)

# Неподвижные контакты

- Cu, Zn, латунь

# Сплавы с повышенным сопротивлением

## Свойства реостатных сплавов

Сплав	Массовая доля элементов*, %			Электрические свойства		
	Ni	Mn	Cu	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_{\rho} \cdot 10^5$ , 1/°C	$t_{\text{раб}}$ , °C
МНМц 40—1,5 (константан)	39—41	1—2	Остальное	0,48	3	500
МНМц 3—12 (манганин)	2,5—3,5	11,6—13,5	»	0,43	2	200

\* По ГОСТ 492—73.

# Свойства сплавов для нагревательных элементов

Сплав	Массовая доля элементов,* %				Электрические свойства		
	Cr	Al	Fe	Ni	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_{\rho} \cdot 10^3$ , 1/°C	$t_{\text{раб}}$ , °C
X23Ю5 (хромаль)	21,5—24,5	4,6—5,3	Остальное	Не бо- лее 0,6	1,37	1,4	1200
X20Н80 (нихром)	20—23	—	Не более 1,5	Основа	1,11	9,0	1100

\* По ГОСТ 10994—74.

# Полупроводниковые материалы

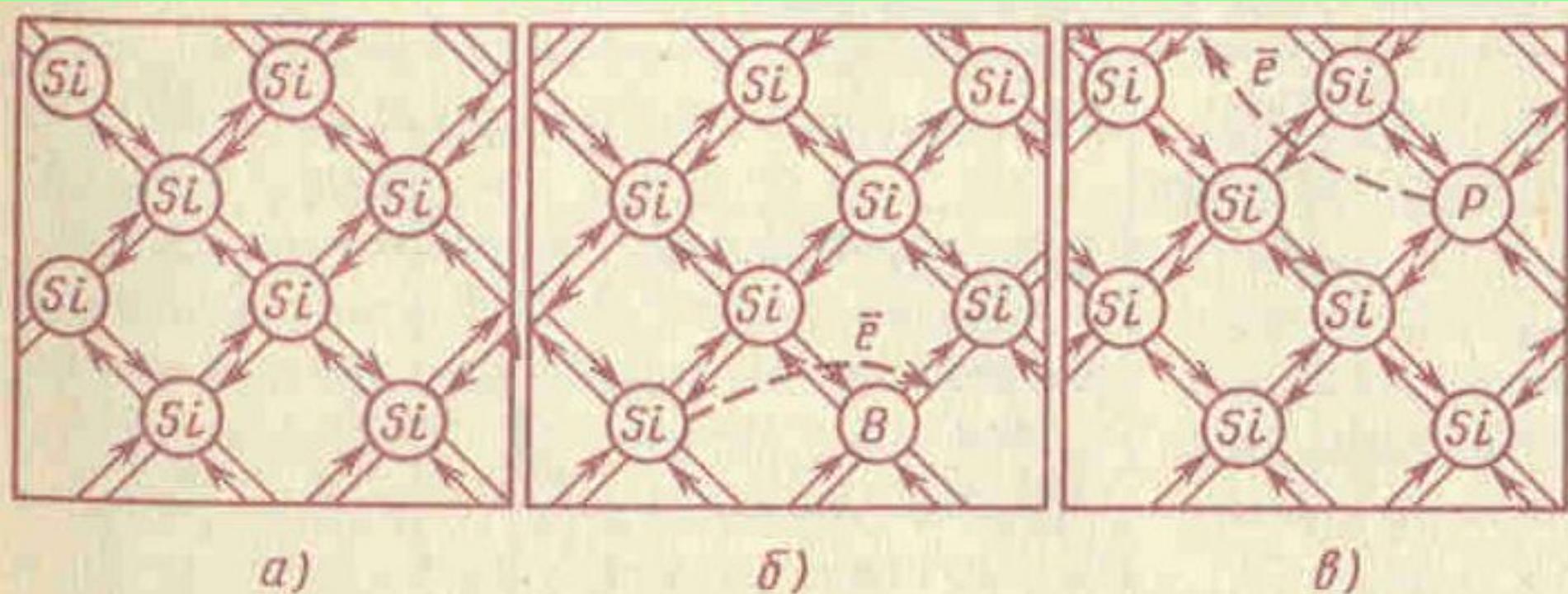
# Ширина запрещенной зоны полупроводниковых элементов

Элемент	Группа	Ширина запрещенной зоны, $10^{-19}$ Дж	Элемент	Группа	Ширина запрещенной зоны, $10^{-19}$ Дж
Бор	III	1,76	Мышьяк	V	1,9
Углерод (алмаз)	IV	8,5	Сурьма	V	0,19
Кремний	IV	1,8	Сера	VI	4
Германий	IV	1,15	Селен	VI	2,7
Олово	IV	0,13	Теллур	VI	0,58
Фосфор	V	2,4	Иод	VI	0,2

# Ширина запрещенной зоны и структура сложных полупроводниковых фаз

Соединение			Кристаллическая решетка	Тип связи	Ширина запрещенной зоны, $10^{-19}$ Дж
Название	Формула	Тип			
Карбид кремния	SiC	A <sup>IV</sup> B <sup>IV</sup>	Гексагональная	Ковалентный	4,5
Антимониды Арсениды	ZnSb GaAs	A <sup>III</sup> B <sup>V</sup>	Кубическая	Ионно-ковалентный	0,43 2,4
Сульфиды	ZnS CdS	A <sup>II</sup> B <sup>VI</sup>	Гексагональная	Ионный	5,9 3,8
Оксиды	ZnO FeO		Кубическая		5,1 2,4

# Схема ковалентной связи в кремнии



а-чистый

б-легированный акцепторной примесью

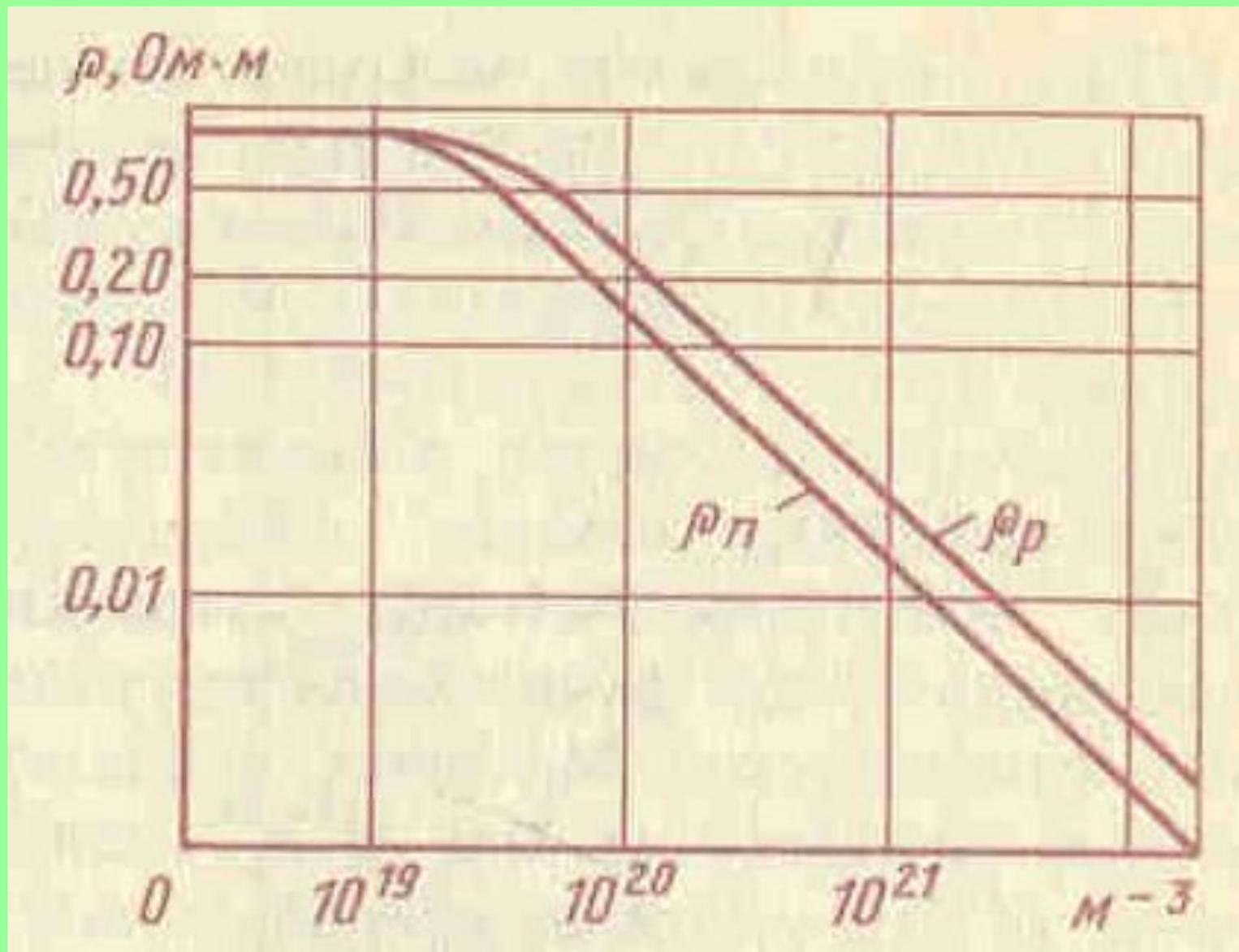
в-легированный донорной примесью

В кристаллах с ковалентной связью проводимость электрического тока может осуществляться как путем перемещения электронов (электронная –n-проводимость), так и путем перемещения «дырок» (дырочная – p-проводимость).

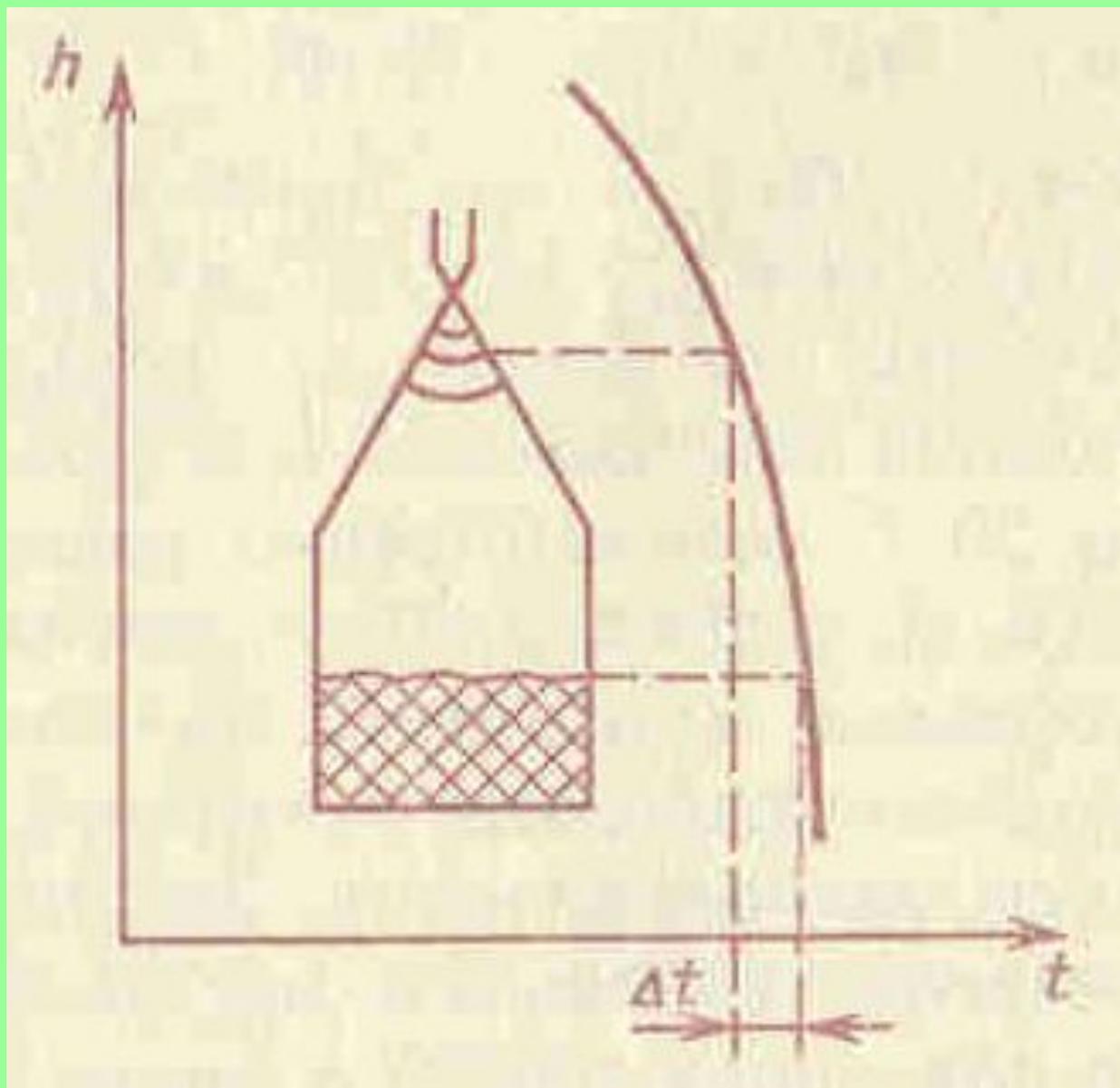
В «идеальных» кристаллах превалирует электронная проводимость.

В реальных кристаллах может превалировать дырочная проводимость

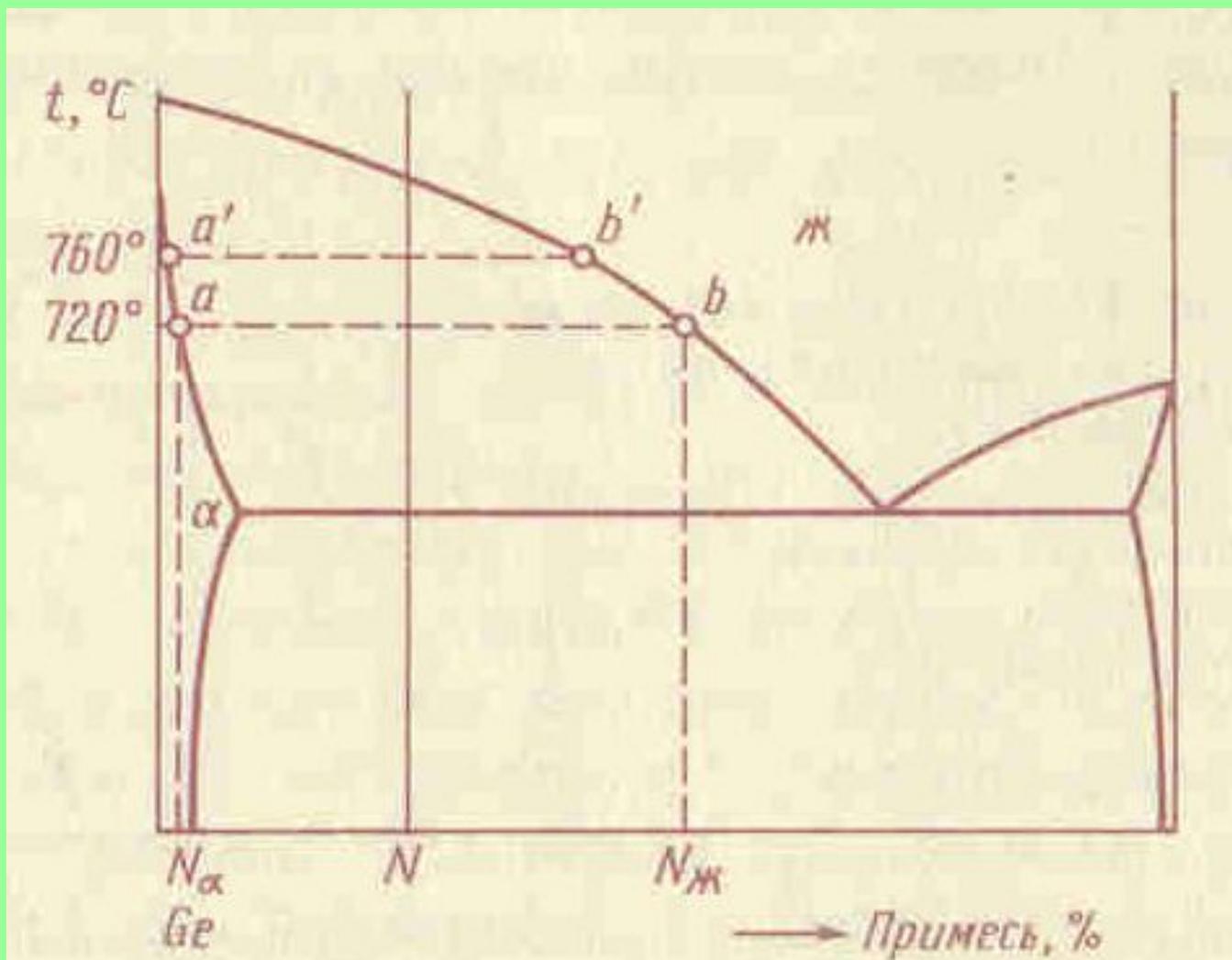
# Зависимость электрического сопротивления германия от содержания примесей при 20 °С



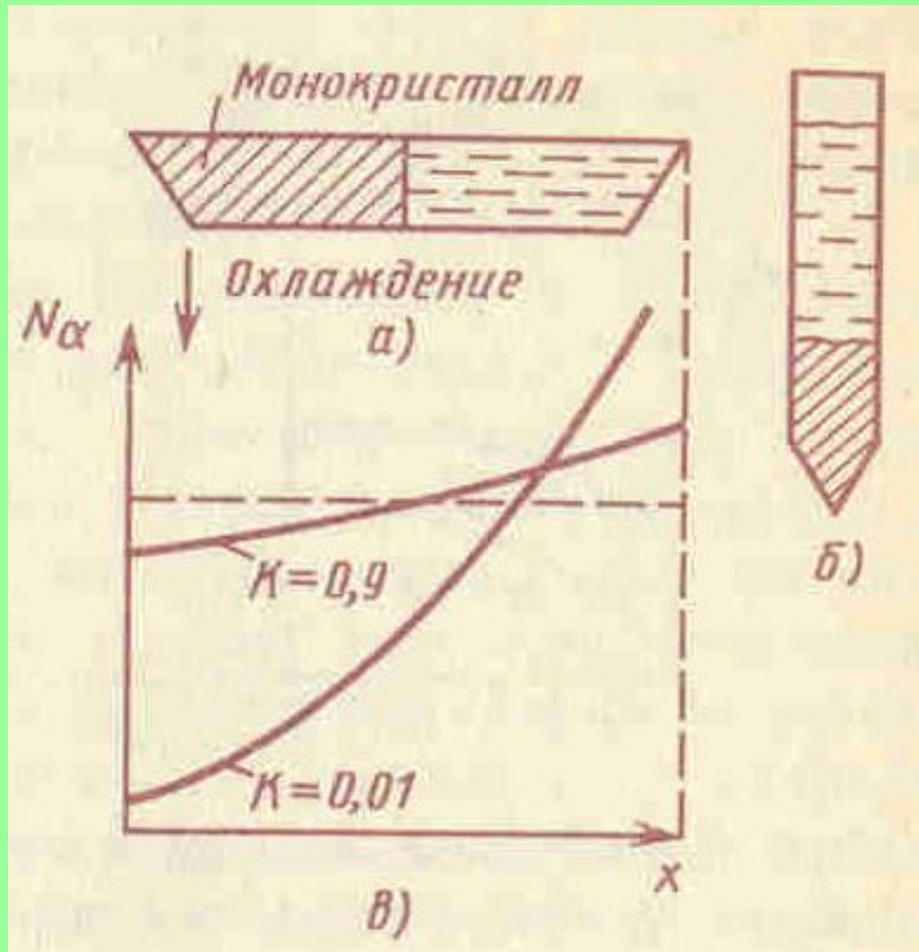
# Схема процесса получения монокристалла методом сублимации



# Схема диаграммы состояния системы германий-примесь



# Схема получения монокристалла методом нормальной направленной кристаллизации

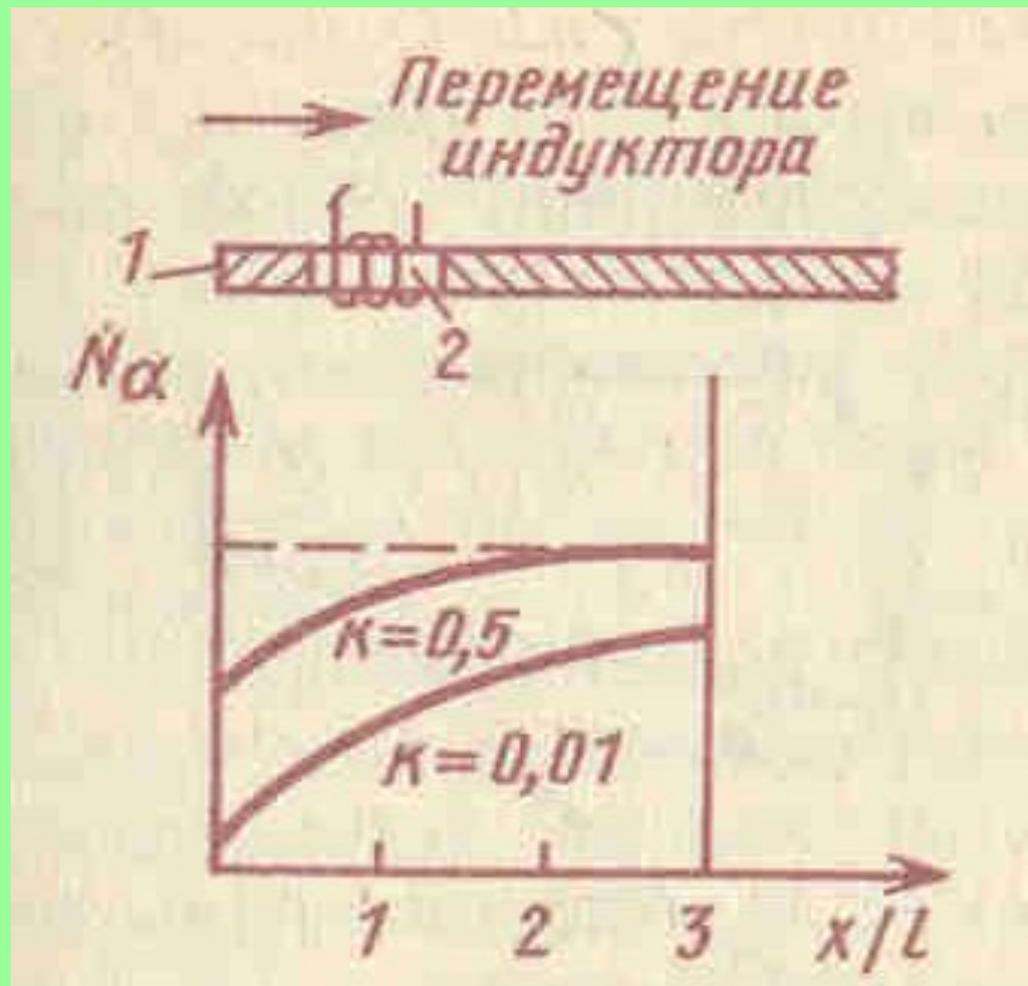


а-горизонтальный

б-вертикальный

в-распределение примесей по длине при различном  $K$

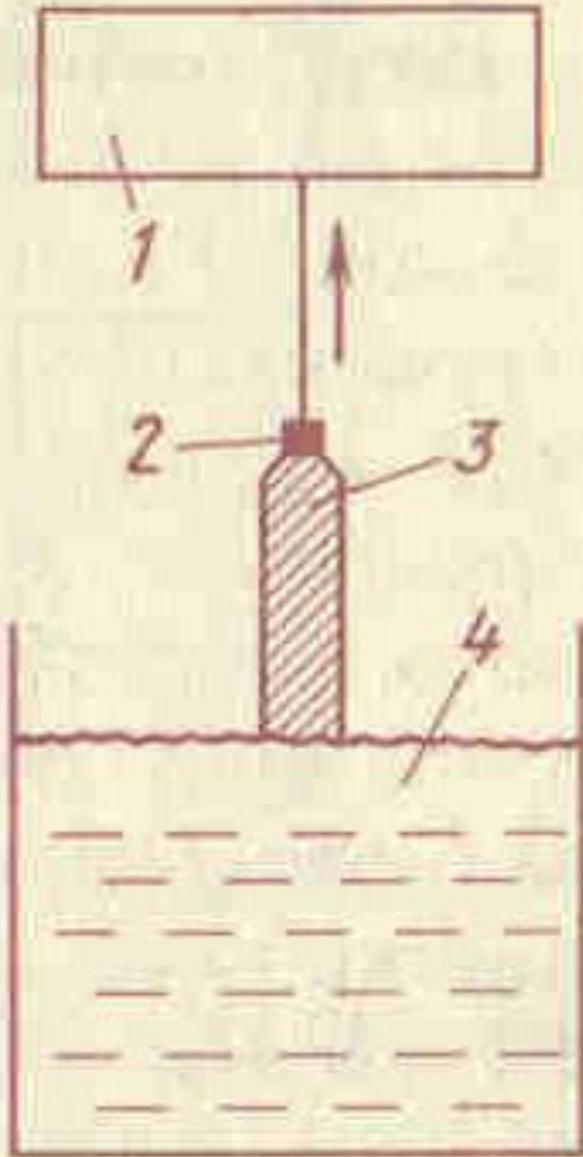
# Схема установки зонной очистки



1-затравка

2-расплавленная зона шириной  $l$

# Схема установки для выращивания монокристалла



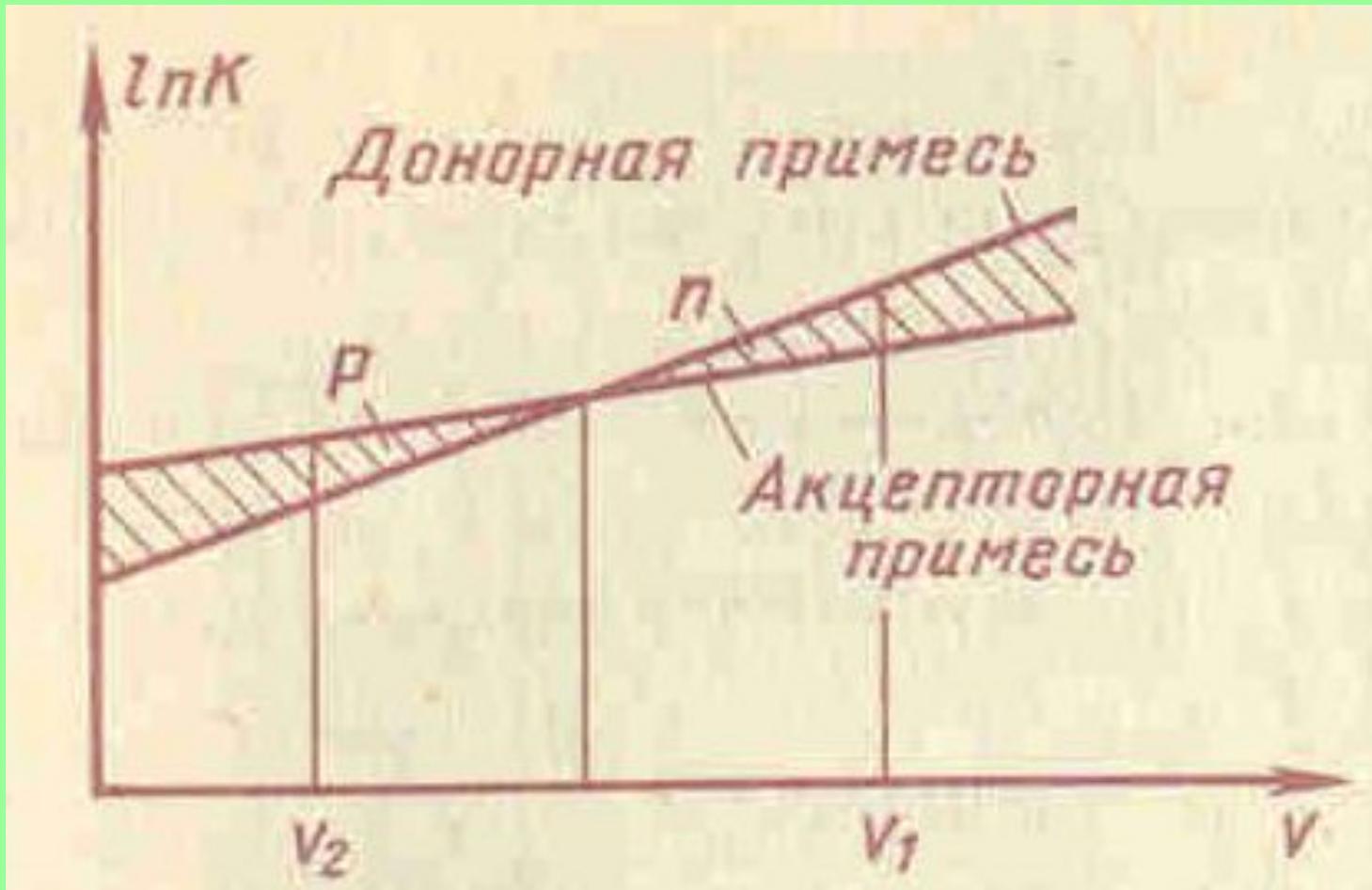
*1*-вытягивающее устройство

*2*-затравка

*3*-монокристалл

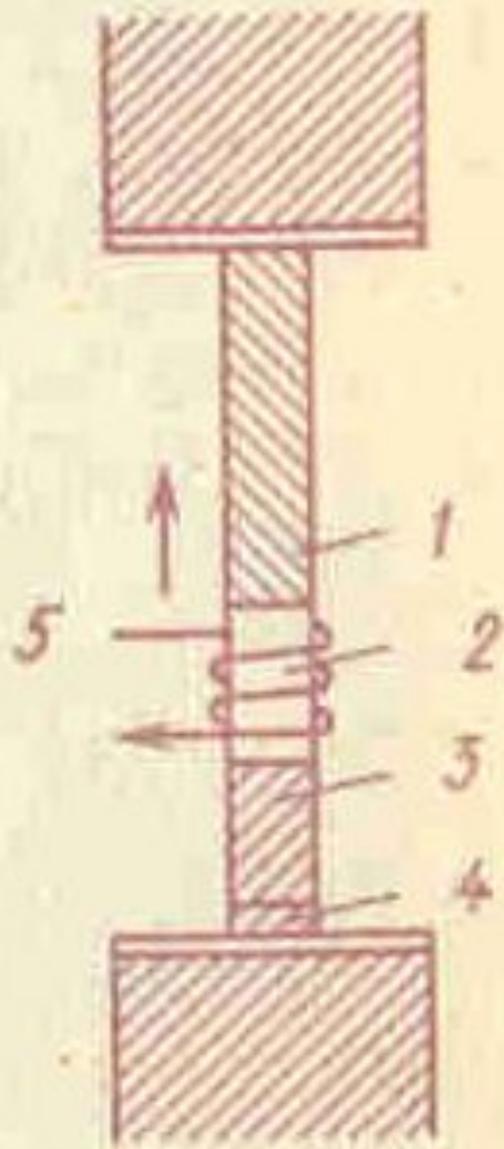
*4*-расплав полупроводника

# Зависимость коэффициента распределения $K$ донорной и акцепторной примесей от скорости вытягивания



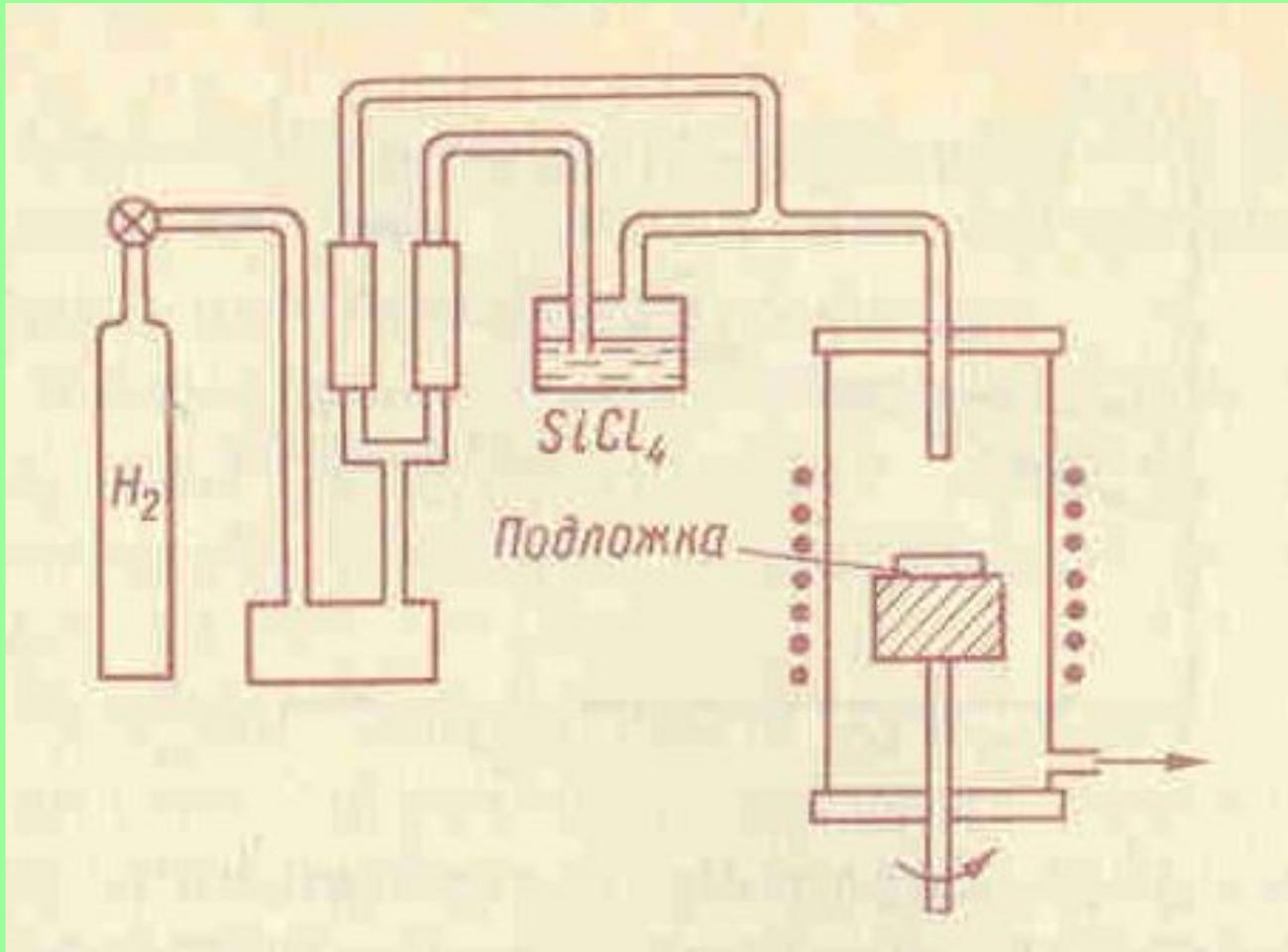
Постоянство концентрации примеси можно достичь уменьшением  $K$  в результате снижения скорости вытягивания

# Схема установки для бестигельной зонной очистки кремния



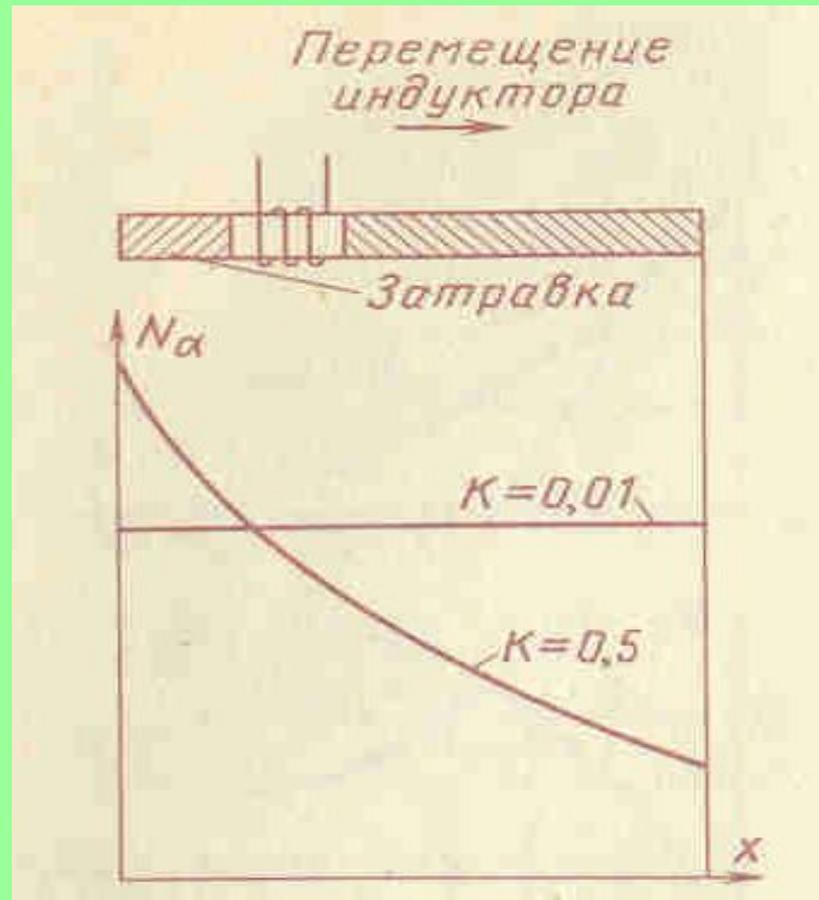
- 1-поликристалл
- 2-расплавленная зона
- 3-монокристалл
- 4-затравка
- 5-индуктор

# Схема установки для выращивания эпитаксиальных пленок кремния



Хлориды кремния испаряются, транспортируются потоком водорода к подложке и восстанавливаются по формуле:

# Зонное выравнивание монокристалла



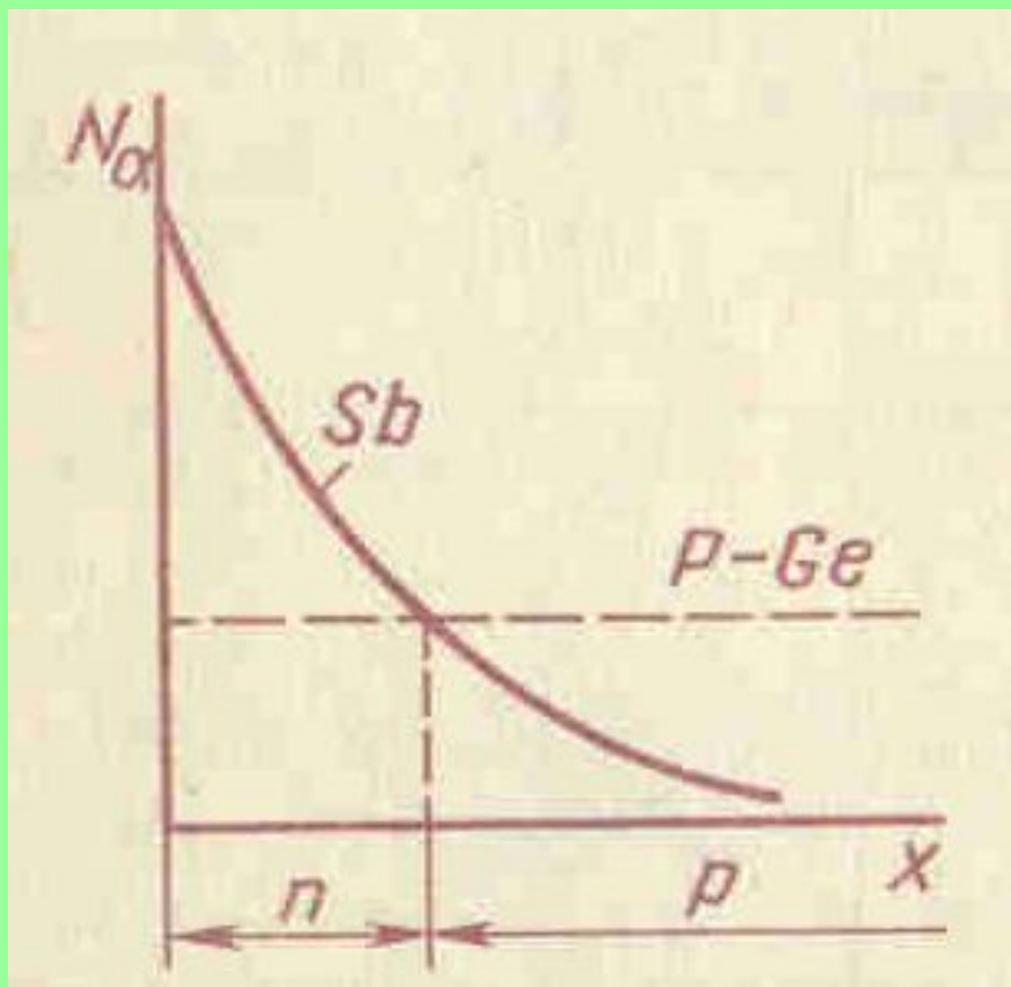
Постоянство примеси в прутке достигается при малом  $K$ .

При большом значении расплав быстро обедняется, что вызывает уменьшение примеси в монокристалле

# Свойства чистого и легированного кремния и германия

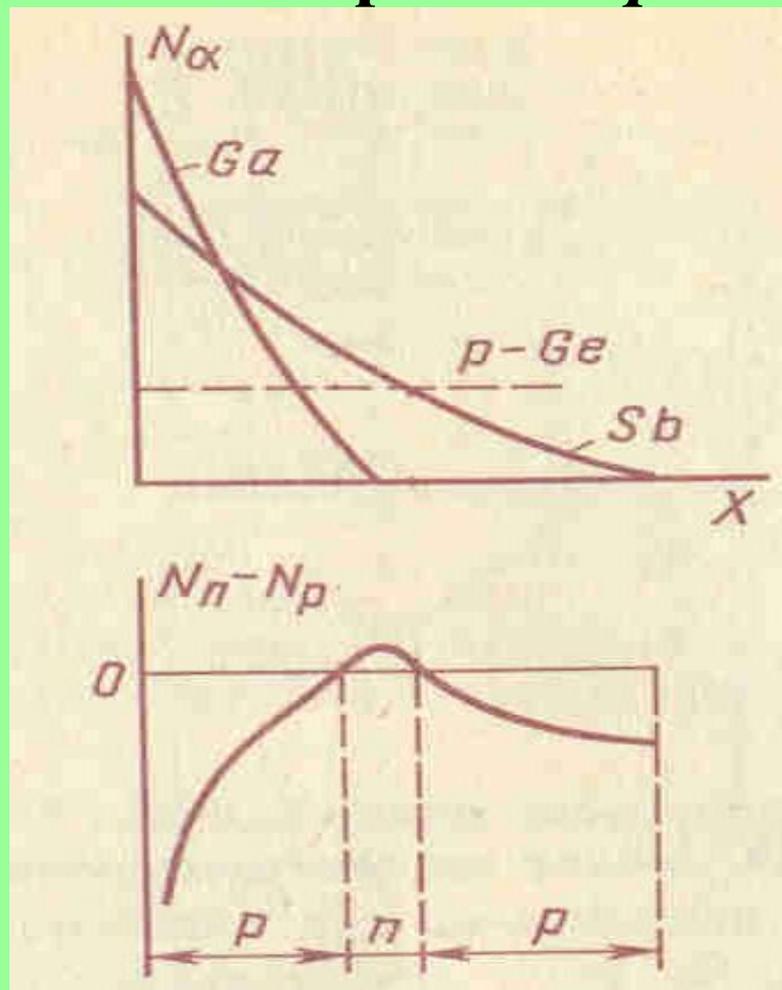
Элемент	Тип проводимости	Легировующий элемент	Марка	$\rho \cdot 10^2$ , Ом·м	$L$ , мм
Ge	<i>n</i>	—	ГЭ40/3,0	36	3,0
	<i>p</i>	Ga	ГДГ5/1,0	4,2—5,7	1,0
	<i>n</i>	Sb	ГЭС 10/1,0	8—12	1,0
Si	<i>n</i>	—	КЭ150/0,3	100—200	0,2
	<i>p</i>	—	КД40/0,2	30—50	0,2
	<i>n</i>	P	КЭФ7,5/0,5	6—9	0,5
	<i>p</i>	B	КДБ7,5/0,5	6—9	0,5

# Образование $p$ - $n$ -перехода путем диффузии сурьмы в германий $p$ -типа

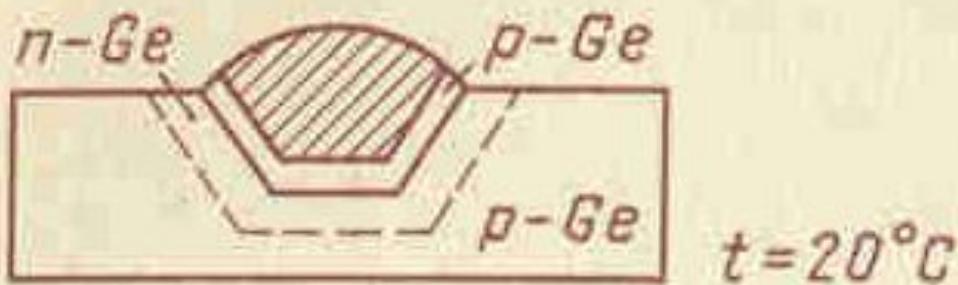
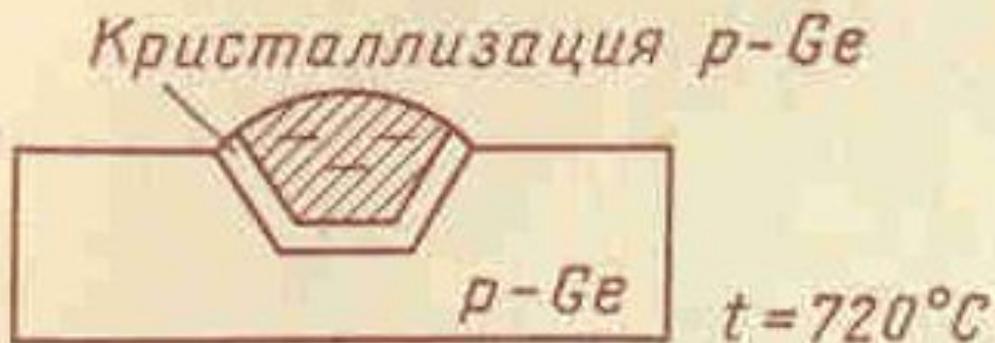


Диффузионный метод. Легирующая примесь попадает в пластинку полупроводника в результате диффузии из газовой фазы.

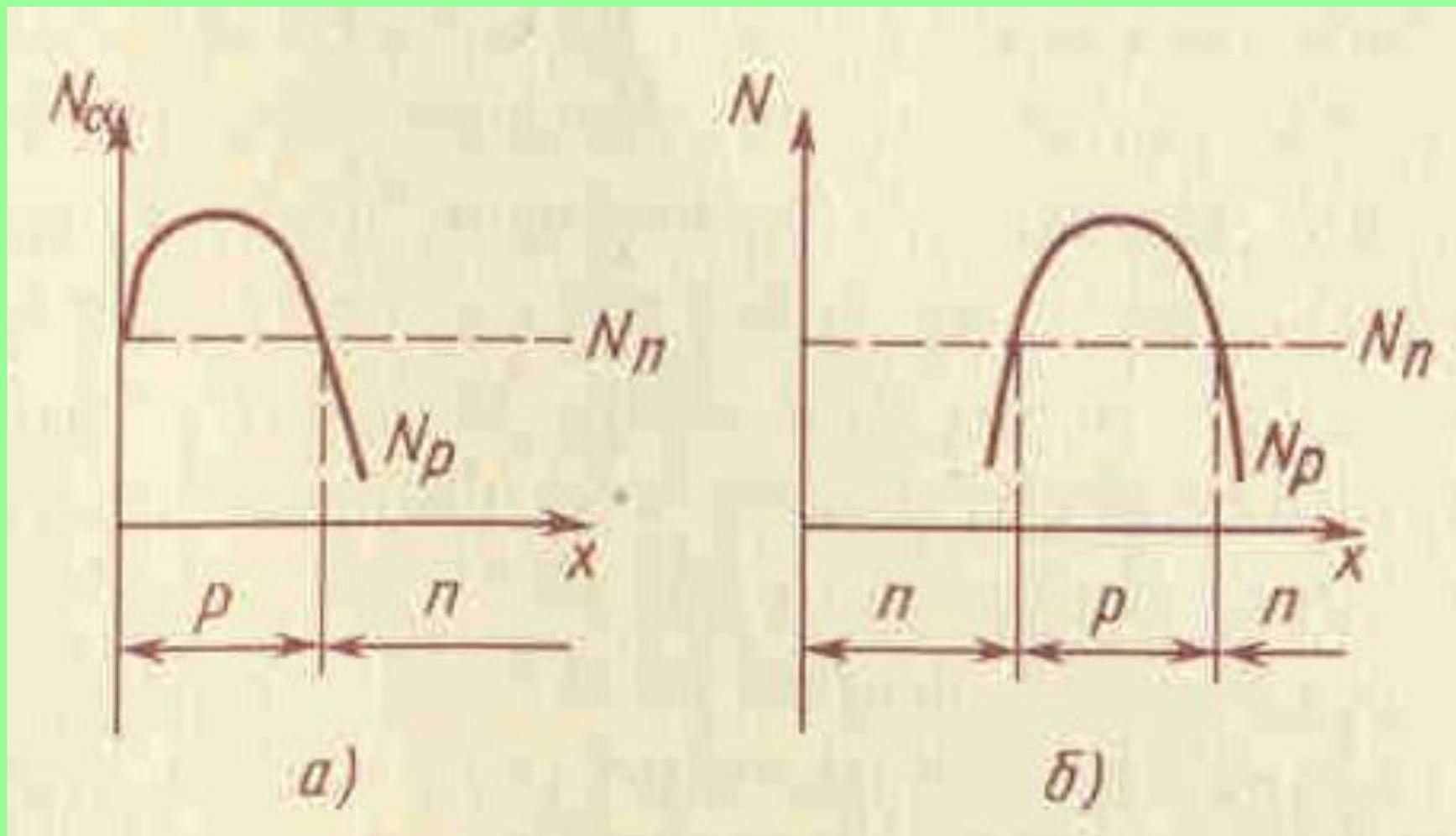
# Образование $p$ - $n$ - $p$ -перехода путем диффузии сурьмы и галлия в германий $p$ -типа



# Схема образования *p-n-p*-перехода в германии при сплавно-диффузионном методе



# Образование $p$ - $n$ -переходов при ионном легировании



а-для низких энергий

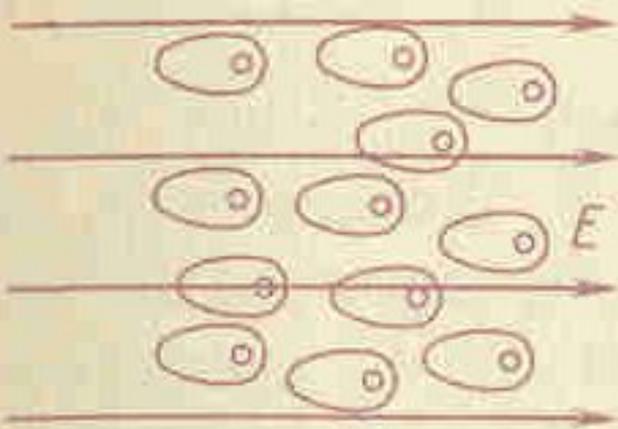
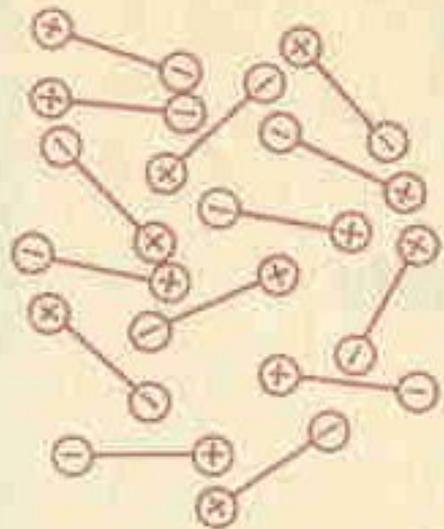
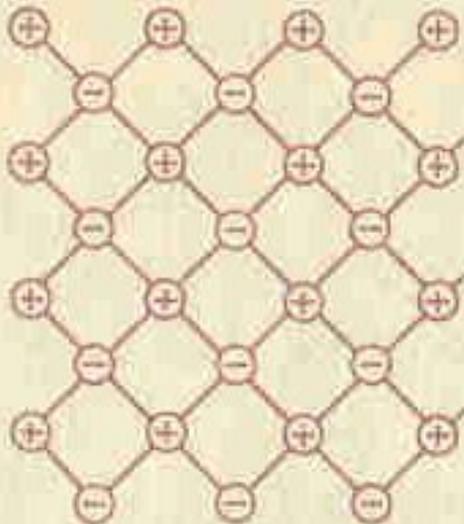
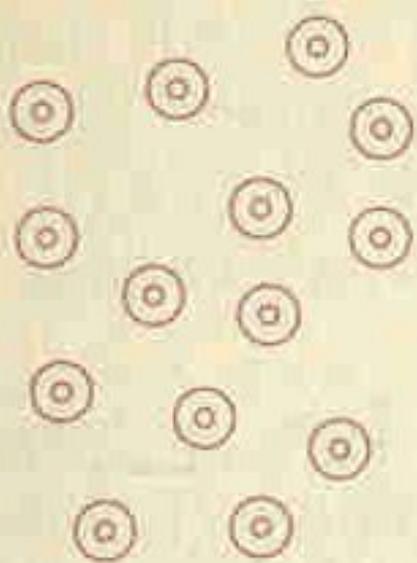
б-для высоких энергий

# Диэлектрики

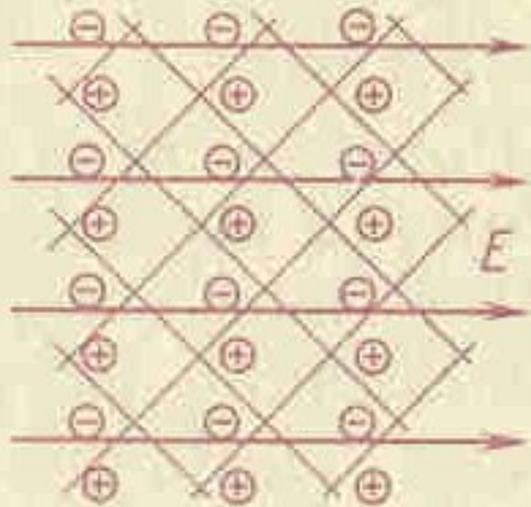
- Керамика, полимеры, стекло
- Характерная особенность – способность поляризоваться в электрическом поле
- Сущность поляризации – смещение связанных электрических зарядов под действием поля и создание внутреннего электрического поля.
- Мерой поляризации является диэлектрическая проницаемость

- Электронная
- Ионная
- Дипольно-релаксационная
- Самопроизвольная (спонтанная)

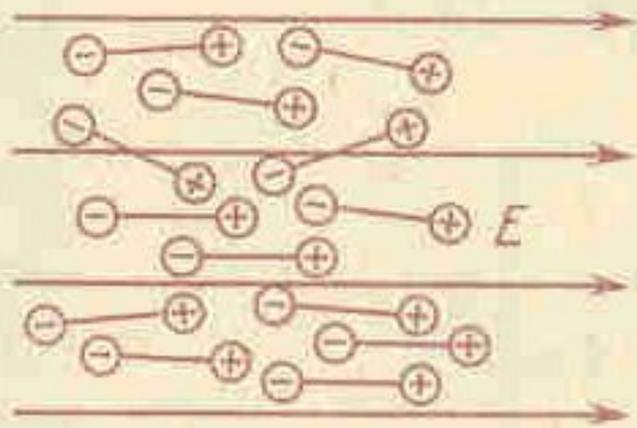
# Схемы поляризации диэлектрика



а)

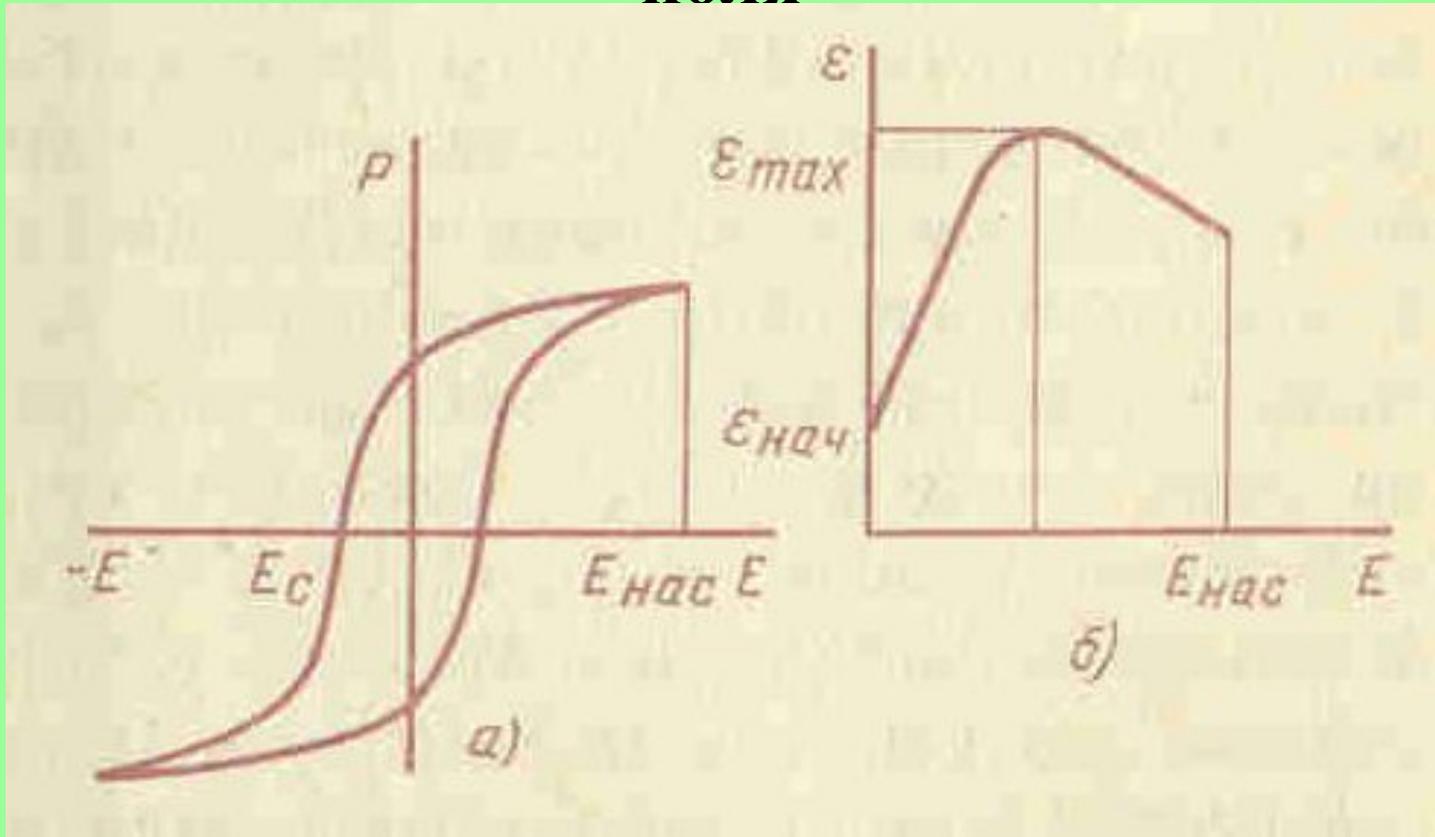


б)



в)

# Зависимость поляризации и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности поля



Самопроизвольная поляризация наблюдается только у сегнетоэлектриков. При охлаждении сегнетоэлектрика ниже точки Кюри возникает поляризация. Домены расположены беспорядочно. При наложении поля поляризация увеличивается нелинейно.

# Свойства диэлектриков

Материал	$\epsilon$	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	$\rho$ , Ом·м	$E_{\text{проб}}$ , МВ/м
Низкочастотные диэлектрики				
Керамика:				
электрофарфор	6,5	200	$10^{15}$	25
сегнетокерамика Т-7500	7500	300	$10^{11}$	2,5
сегнетокерамика ВК-1 для варикондов	$(20-100)10^3$	1800	$10^{10}$	2,5
пьезокерамика Т-1700	1700	300	$10^{10}$	2,5
Пластмассы:				
поливинилхлорид	4-3	200	$10^{16}$	16-30
порошковый фенопласт с древесной мукой	11-5	1100-2700	$10^9-10^{13}$	10-11
то же, с минеральным наполнителем	10-6	500-1000	$10^{14}-10^{15}$	18
эпоксидные	4-2,6	400-500	$10^{13}-10^{16}$	16-20
Высокочастотные диэлектрики				
Керамика:				
ультрафарфор	8,5	2-10	$10^{14}$	20
оксид алюминия	9,5	2	$10^{17}$	15
стеатит	6,5	3-9	$10^{13}$	20
цельзиановая	7,5	3	$10^{14}$	35
тиконд Т-150	150	3	$10^{12}$	10
термоконд Т-20	20	3	$10^{12}$	10
Пластмассы:				
полиэтилен	2,4	2-5	$10^{17}$	20
полистирол	2,5	3-5	$10^{17}$	30
фторопласт-4	2	2	$10^{19}$	20
Стекло	3,5-16	18-175	$10^{15}-10^{20}$	30-100
Ситаллы	5-7	3-20	$10^{16}-10^{20}$	28-48