

Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

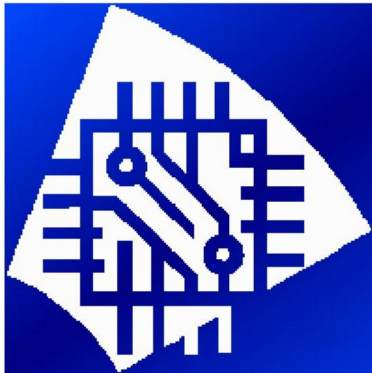
Модуль №4

**ТЕМА 4.1 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ОСНОВНЫЕ
СВОЙСТВА**

4.1.1 Классификация полупроводниковых материалов по составу и свойствам.

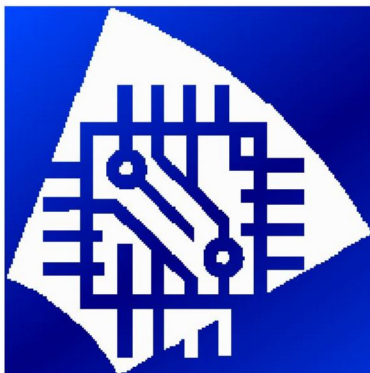
4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов.



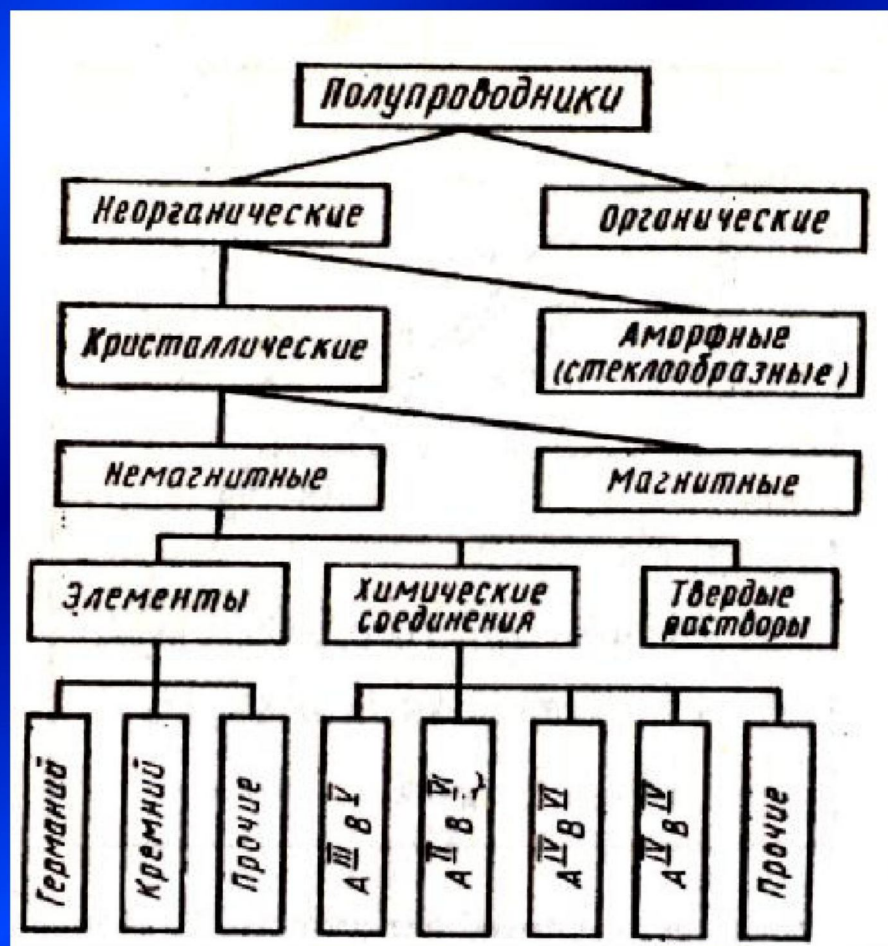
План лекции

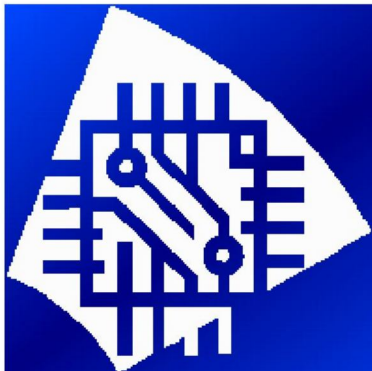
- **4.1.1 Классификация полупроводниковых материалов по составу и свойствам.**
- **4.1.2 Элементарные полупроводники германий и кремний: строение и свойства.**
- **4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов.**



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.1 Классификация полупроводниковых материалов по составу и свойствам.



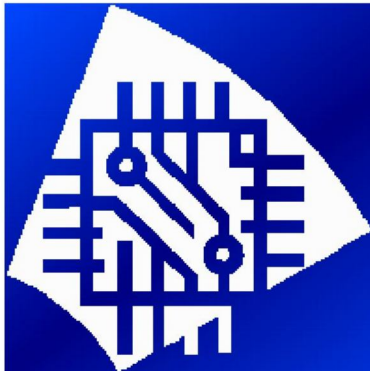


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.1 Классификация полупроводниковых материалов по составу и свойствам.

Ширина запрещенной зоны (в эВ)
элементарных полупроводников (при 300 К)

Элемент	ΔE_g	Элемент	ΔE_g
Бор	1,1	Мышьяк	1,2
Углерод (алмаз) Кремний Германий	5,6 1,12 0,665	Сурьма Сера Селен	0,12 2,5 1,8
Олово (α-Sn) Фосфор	0,08 1,5	Теллур Йод	0,36 1,25



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Структура и физические свойства кремния

Кремний кристаллизуется в решётке типа алмаза (ГЦК)

- Параметр решётки $a = 5,431 \text{ \AA}$

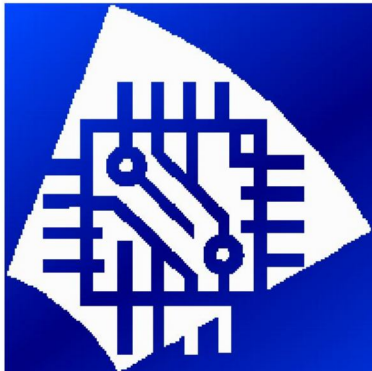
- Плотность $2,33 \text{ г/см}^3$

- Температура плавления $1417 \text{ }^\circ\text{C}$

- Показатель преломления $n=3,42$

- Диэлектрическая проницаемость $\epsilon=11,7$



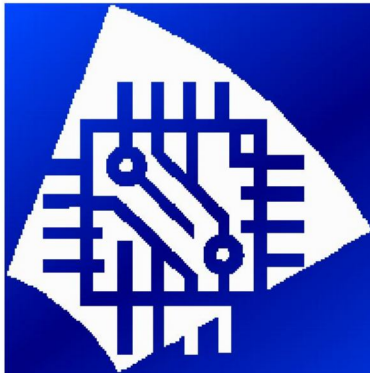


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Химические свойства кремния

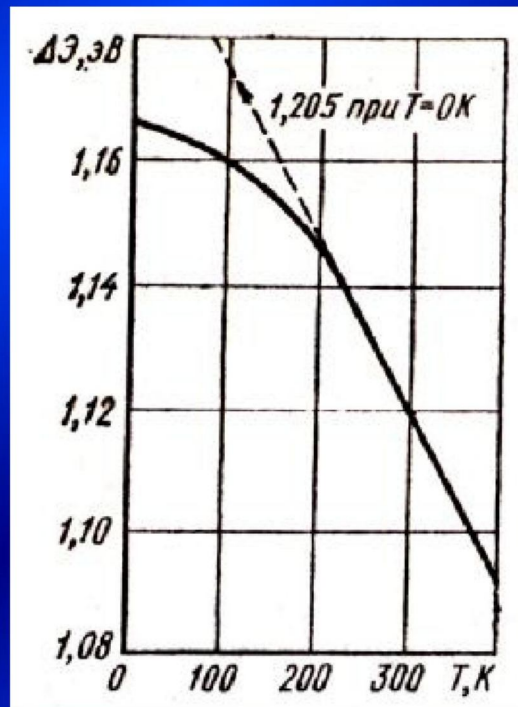
- Кремний - относительно инертное вещество: растворяется лишь в смеси азотной и плавиковой кислот и в кипящих щелочах.
- Устойчив на воздухе при нагревании до 900°C .
- При температурах $1100 - 1300^{\circ}\text{C}$ соединяется с азотом (Si_3N_4).
- Растворяется в расплавленных металлах (Al, Ga, Sn, Au, Ag и др.).
- С углеродом образует полупроводниковое соединение карбид кремния SiC



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

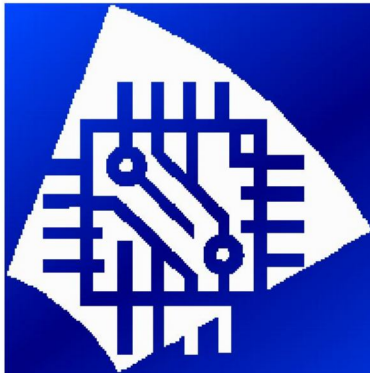
Зависимость ширины запрещенной зоны кремния от температуры



Выше 250 К справедливо линейное приближение:

$$\Delta E_g = 1,205 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot T (\text{эВ})$$

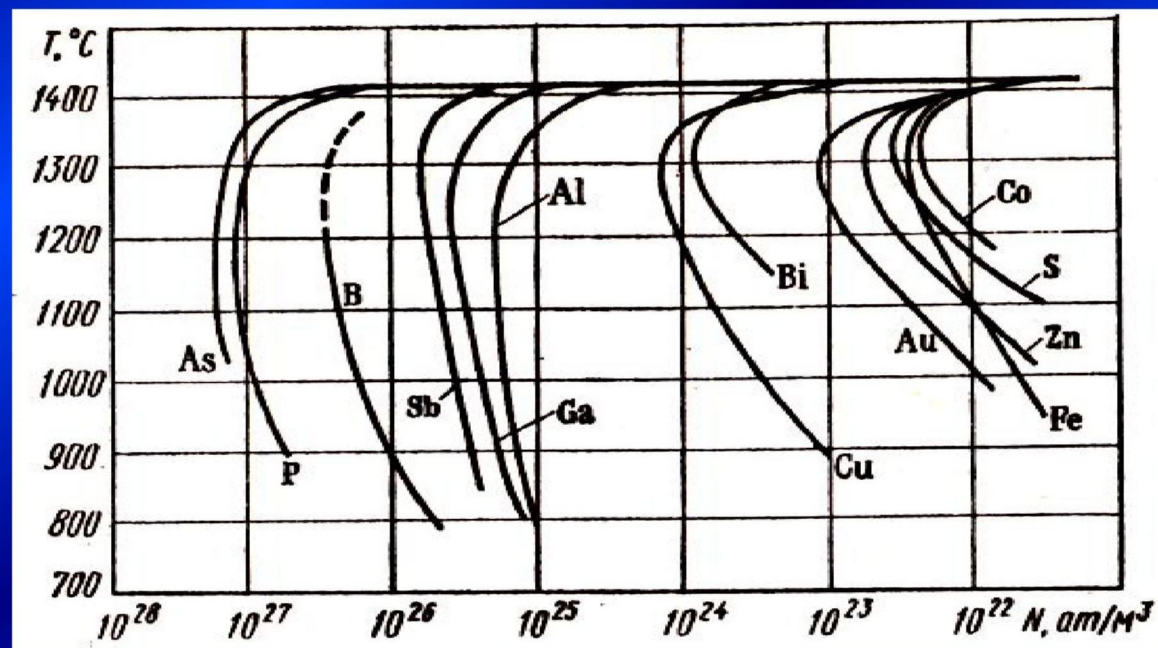
где T – температура в Кельвинах



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

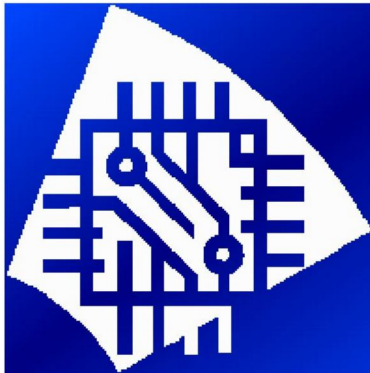
4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Температурные зависимости растворимости примесей в кремнии



«Глубокие» примеси – элементы I, II, VI, VII групп.

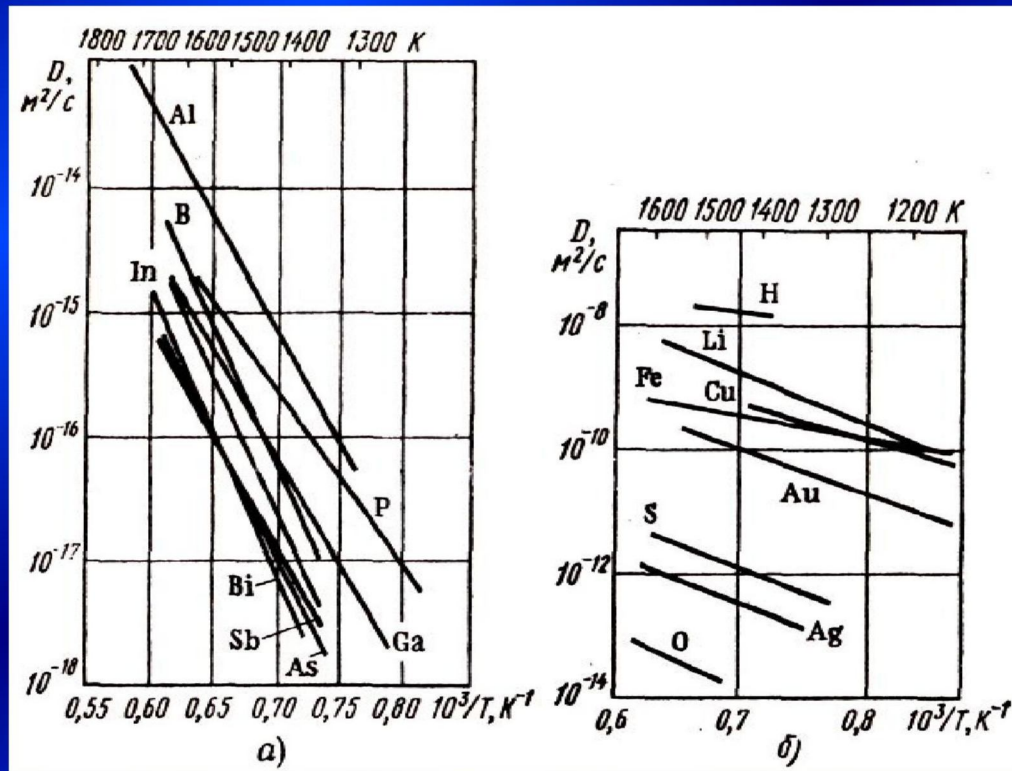
«Мелкие» примеси – элементы III, IV, VI групп.



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

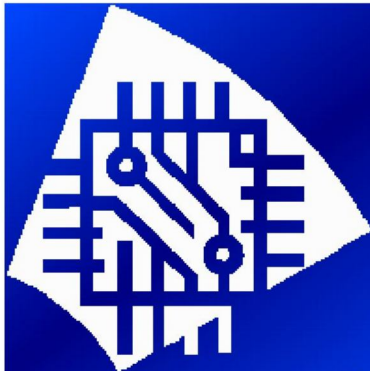
4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Температурные зависимости коэффициентов диффузии различных примесей в кремнии



а — медленно диффундирующие примеси;

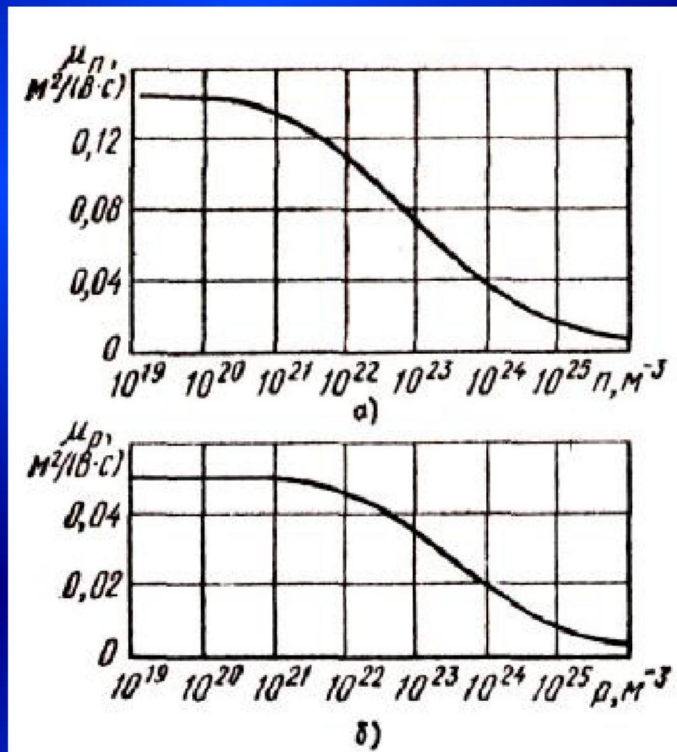
б — быстро диффундирующие примеси



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

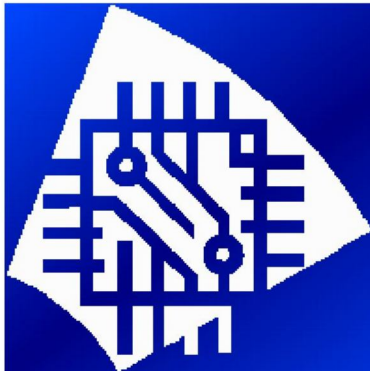
4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Зависимость подвижности основных носителей заряда в кремнии от концентрации электронов и дырок



а) Подвижность электронов в n - Si

в) Подвижность дырок в p - Si



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Структурные свойства германия

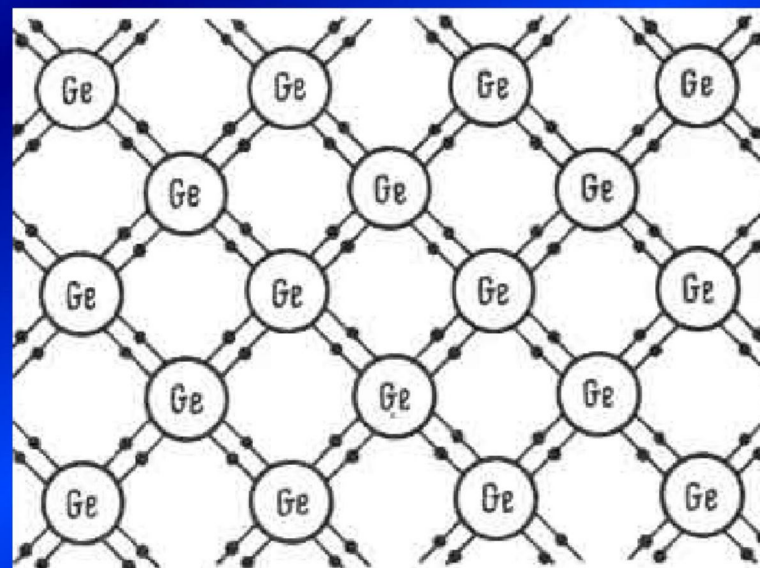
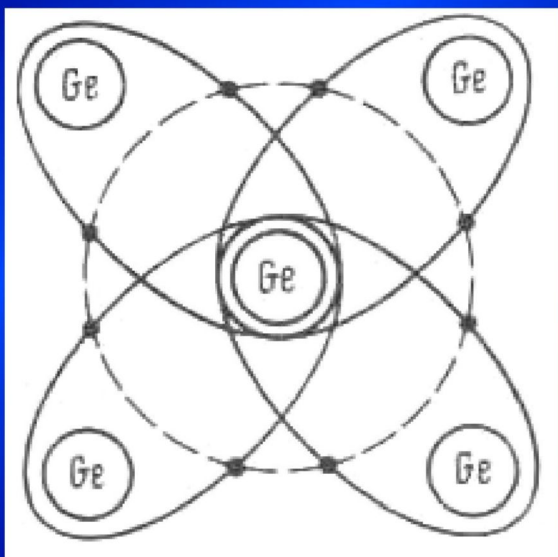
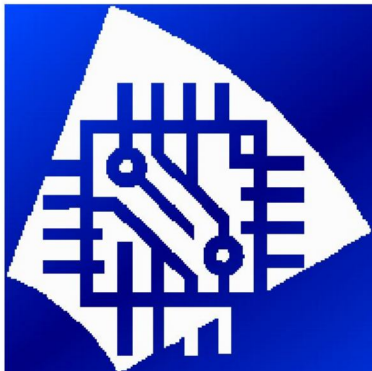


Схема образования ковалентной (парноэлектронной) связи в кристаллической решетке германия



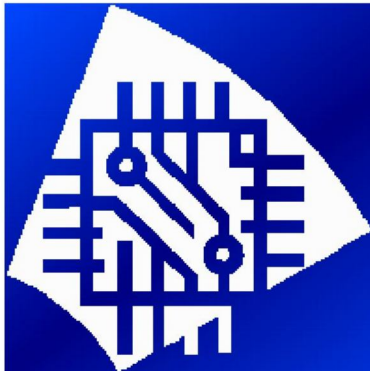
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Химические свойства германия

- При $t=650^{\circ}\text{C}$ окисляется до GeO_2
- Растворяется в «царской» водке и кипящей H_2O_2
- Образует соединения с галогенами и серой (при нагревании).
- Температура плавления 936°C
- В жидком состоянии поглощает водород.





Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

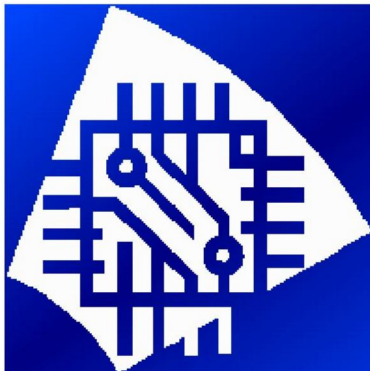
4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Электрофизические свойства германия

- Ширина запрещенной зоны германия при температуре выше 200 К изменяется по линейному закону:

$$\Delta E_g = 0,782 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T (\text{эВ})$$

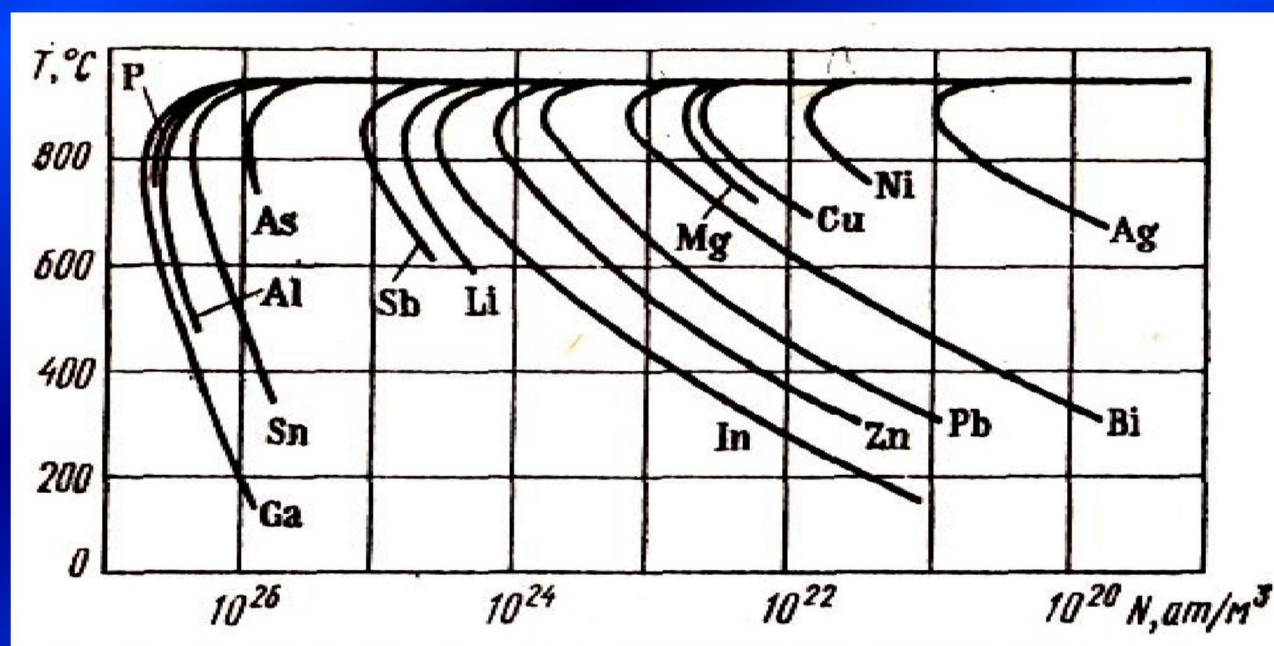
- Собственное удельное сопротивление
 $\rho_i = 0,47 \text{ Ом} \cdot \text{м} (T=293\text{K})$
- Собственная концентрация носителей заряда
 $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
- Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 16$
- Подвижность $\mu_n = 2\mu_p (T=293\text{K})$

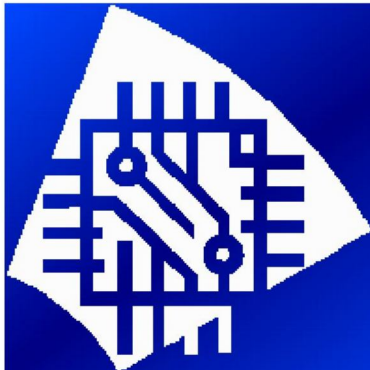


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Температурные зависимости растворимости примесей в германии

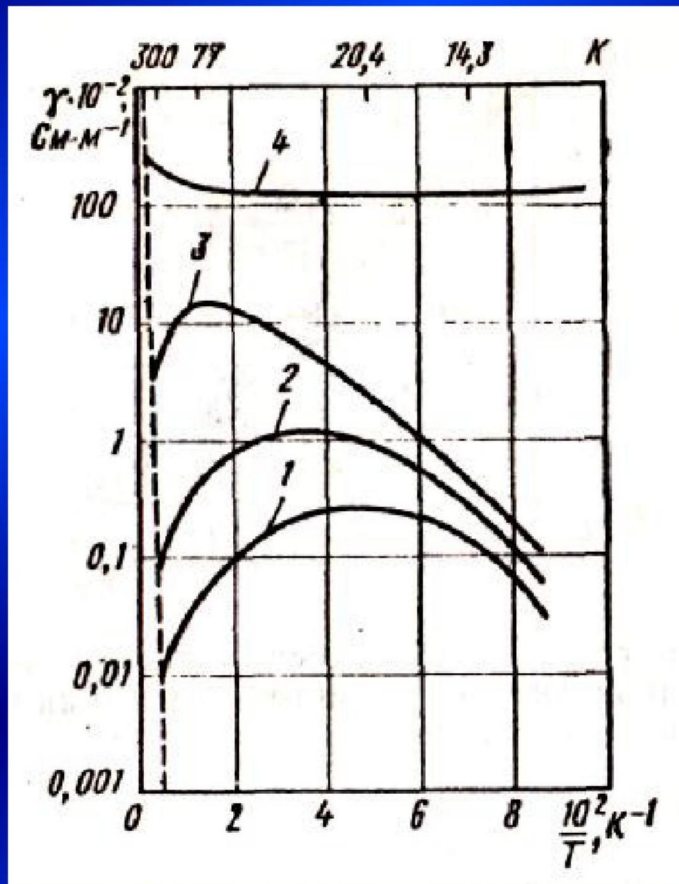




Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

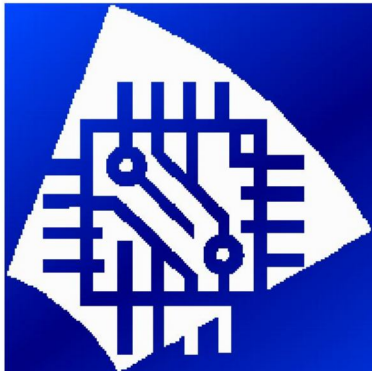
Зависимости удельной проводимости германия *n*-типа от температуры



Концентрация примеси мышьяка:

- 1 - $8 \cdot 10^{18} \text{M}^{-3}$
- 2 - $8 \cdot 10^{19} \text{M}^{-3}$
- 3 - $7 \cdot 10^{21} \text{M}^{-3}$
- 4 - $8 \cdot 10^{23} \text{M}^{-3}$

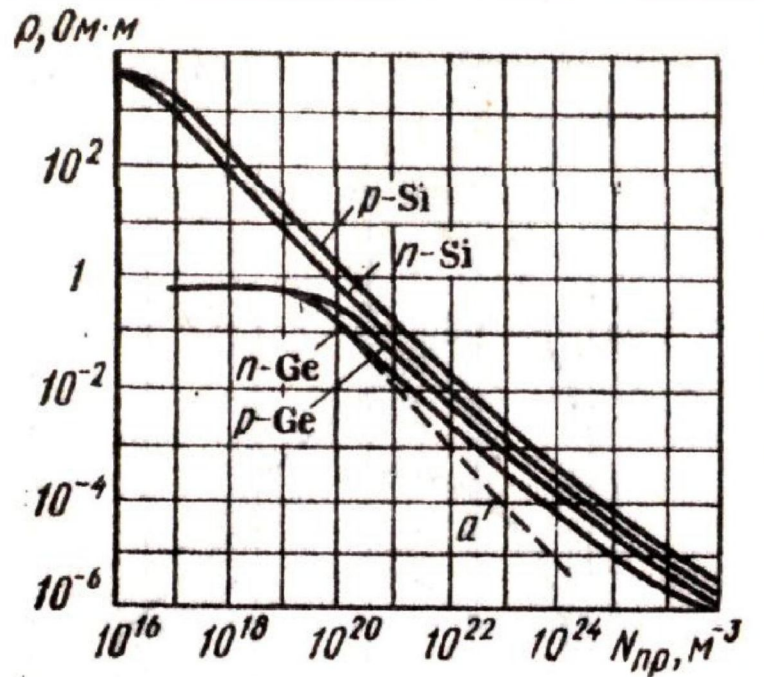
Штриховая линия - собственная проводимость.



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.2 Классификация полупроводниковых материалов по составу и свойствам.

Расчет количества легирующей примеси

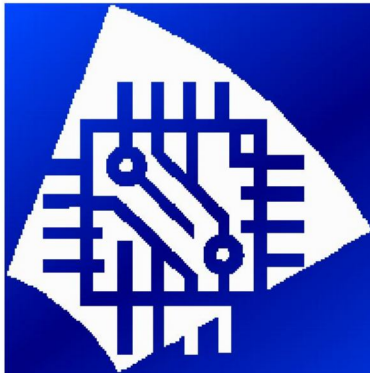


Зависимость удельного сопротивления кремния и германия от концентрации примеси (T=293K)

Удельное сопротивление

$$\rho = 1/(eN_{n,p}\mu)$$

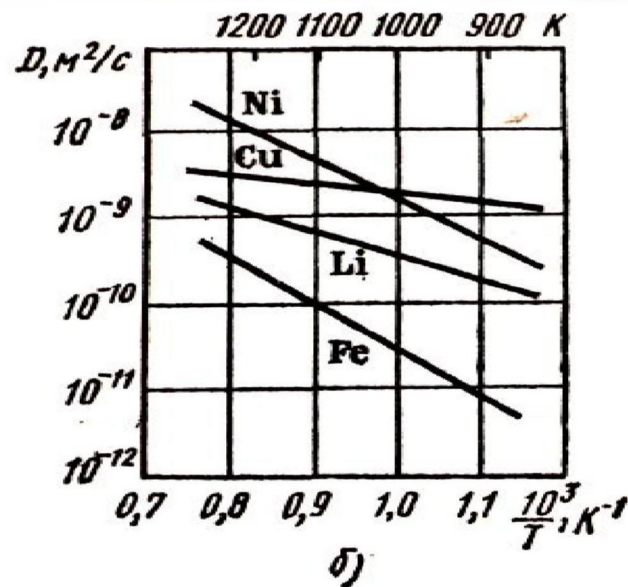
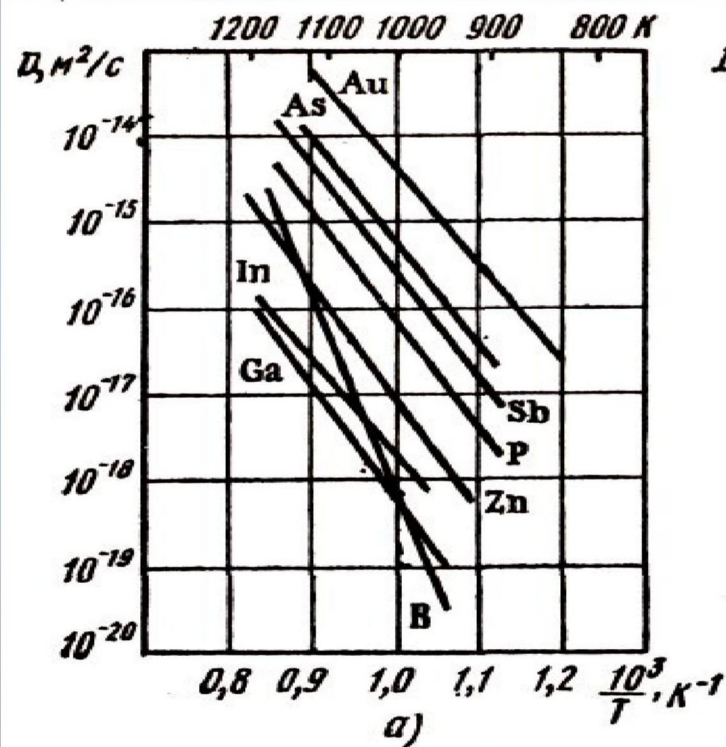
где $N_{n,p}$ — концентрация примесных атомов (доноров или акцепторов)
 μ — Подвижность основных носителей



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

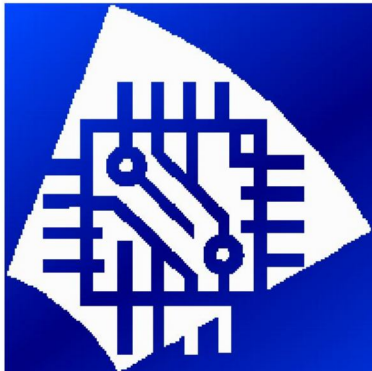
4.1.2 Элементарные полупроводники. Германий и кремний: строение и свойства.

Зависимости коэффициентов диффузии различных примесей в германии от температуры



а — медленно диффундирующие примеси;

б — быстро диффундирующие примеси



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕХНИКИ"

4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов.

Технология получения кремния полупроводниковой чистоты

1. Получение технического кремния



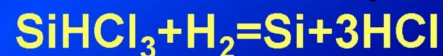
Кремнезем Кокс Спек

2. Превращение технического кремния в легколетучее соединение



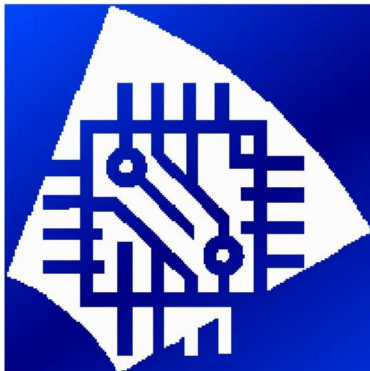
3. Очистка соединения физическими и химическими методами

4. Водородное восстановление кремния



5. Зонная очистка поликристаллического кремния

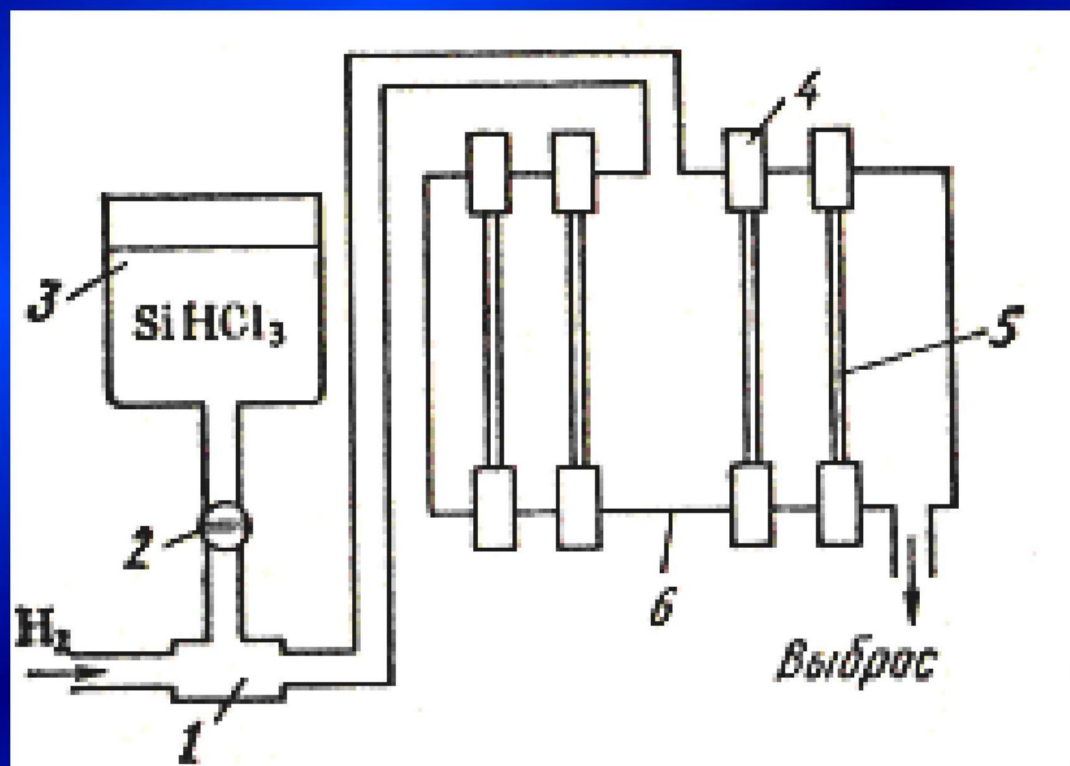
6. Выращивание монокристаллов



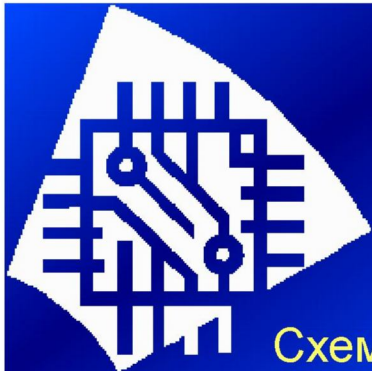
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕХНИКИ"

4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов.

Процесс получения поликристаллического кремния
водородным восстановлением трихлорсилана



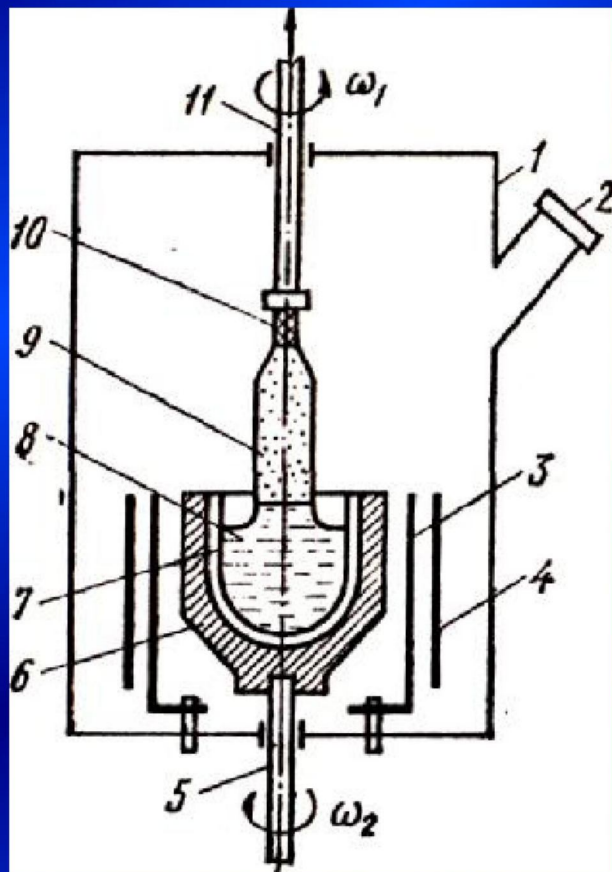
- 1 — испаритель-смеситель;
- 2 — дозатор;
- 3 — емкость с чистым хлорсиланом;
- 4 — водоохлаждаемые токопроводы;
- 5 — кремниевые стержни-затравки;
- 6 — камера восстановления



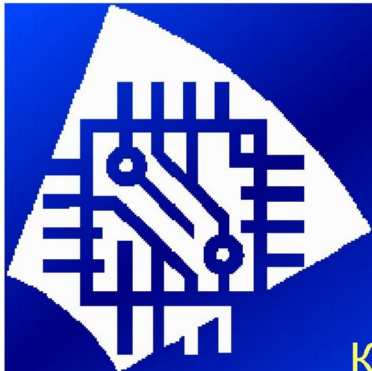
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов.

Схема установки для вытягивания монокристаллов из расплава



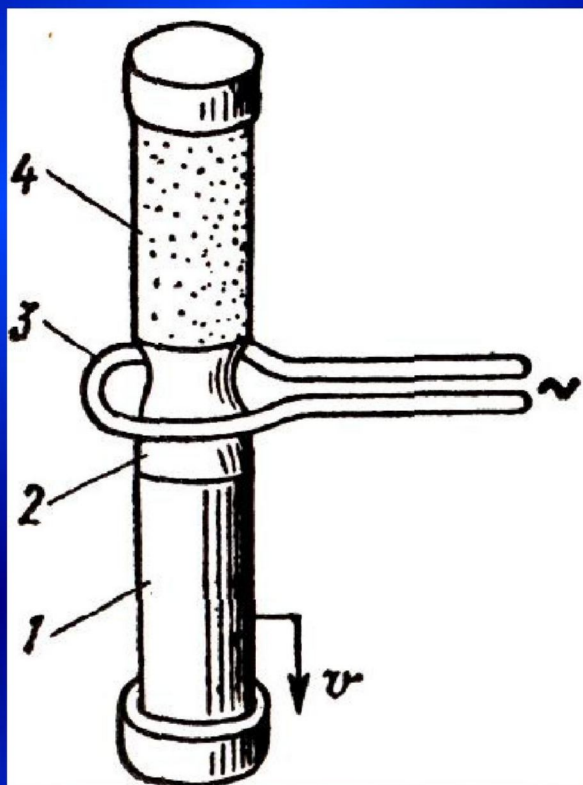
- 1 — рабочая камера;
- 2 — смотровое окно;
- 3 — нагреватель электросопротивления или высокочастотный индуктор;
- 4 — тепловые экраны;
- 5 — шток для вращения тигля;
- 6 — графитовый тигель;
- 7 — кварцевый вкладыш;
- 8 — расплав;
- 9 — растущий монокристалл;
- 10 — затравка;
- 11 — шток для крепления затравки



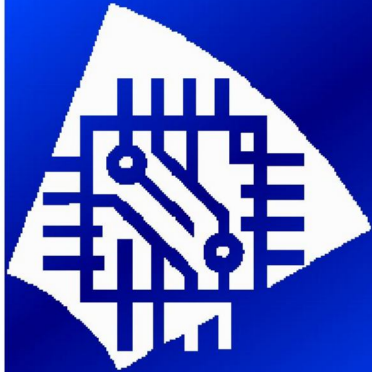
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕХНИКИ"

4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов.

Кристаллизационная очистка кремния методом бестигельной
зонной плавки



- 1 — монокристалл;
- 2 — расплавленная зона;
- 3 — индуктор;
- 4 — поликристаллический стержень

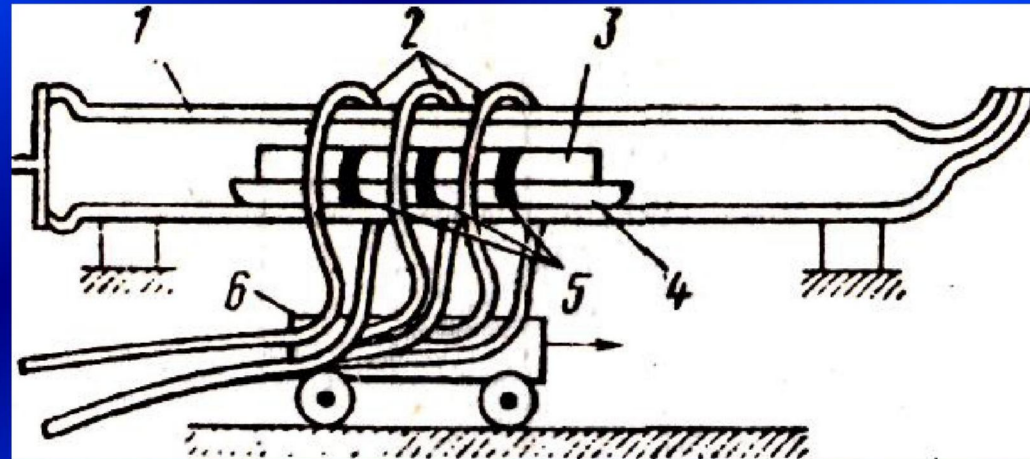


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

4.1.3 Создание полупроводниковых монокристаллов

Кристаллизационная очистка

Метод зонной плавки



1 — кварцевая труба; 2 — витки контура высокочастотного генератора; 3 — слиток очищаемого германия; 4 — графитовая лодочка; 5 — зоны плавления (зачернены) в плоскости витков; 6 — перемещающаяся каретка, на которой укреплены витки