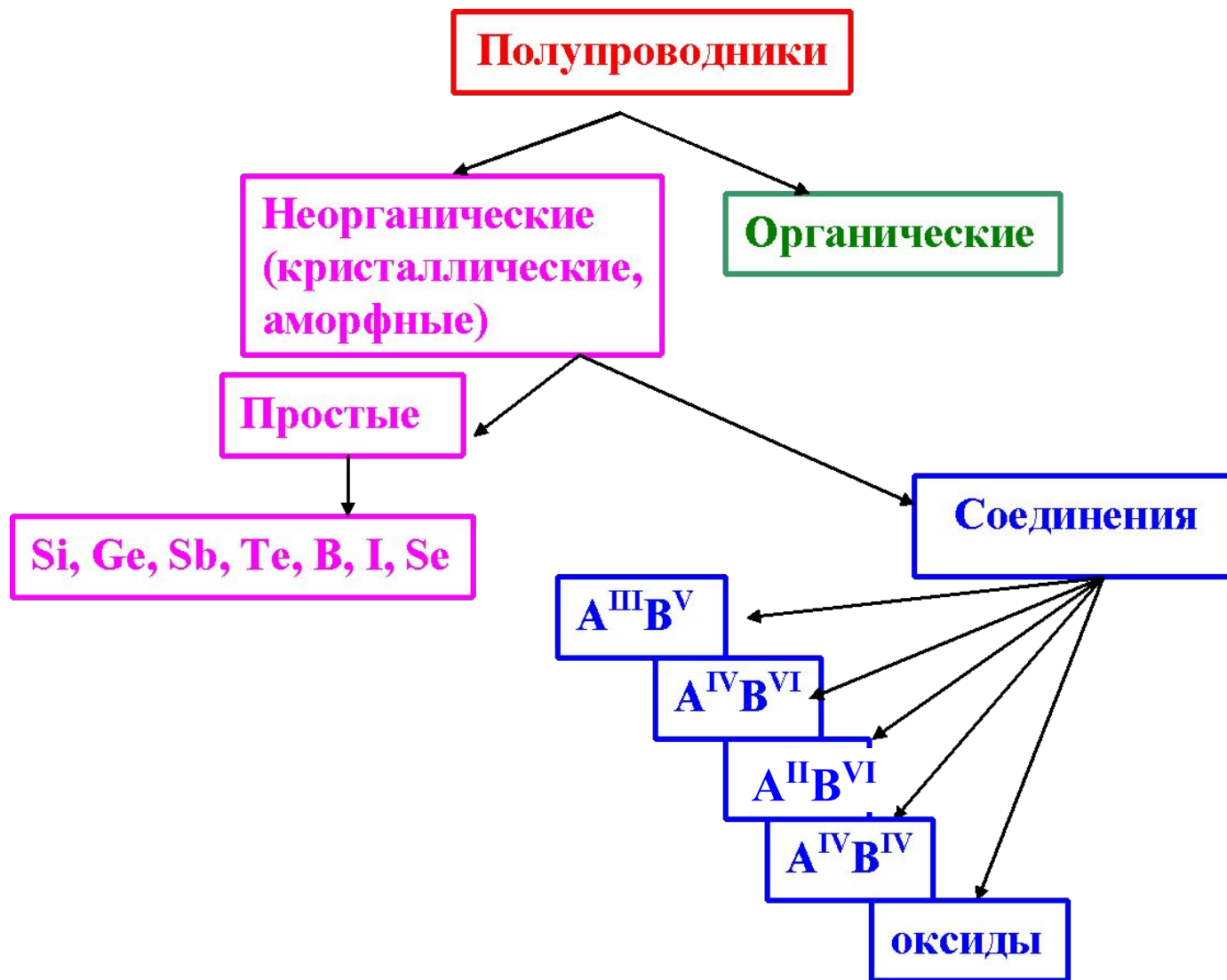


# Лекция №8

## Тема: Основные группы полупроводниковых материалов

- *1. Простые полупроводники*
- *2. Полупроводниковые соединения*

# Классификация полупроводников

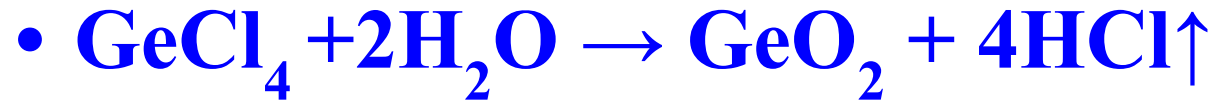


# Способы получения монокристаллов полупроводников

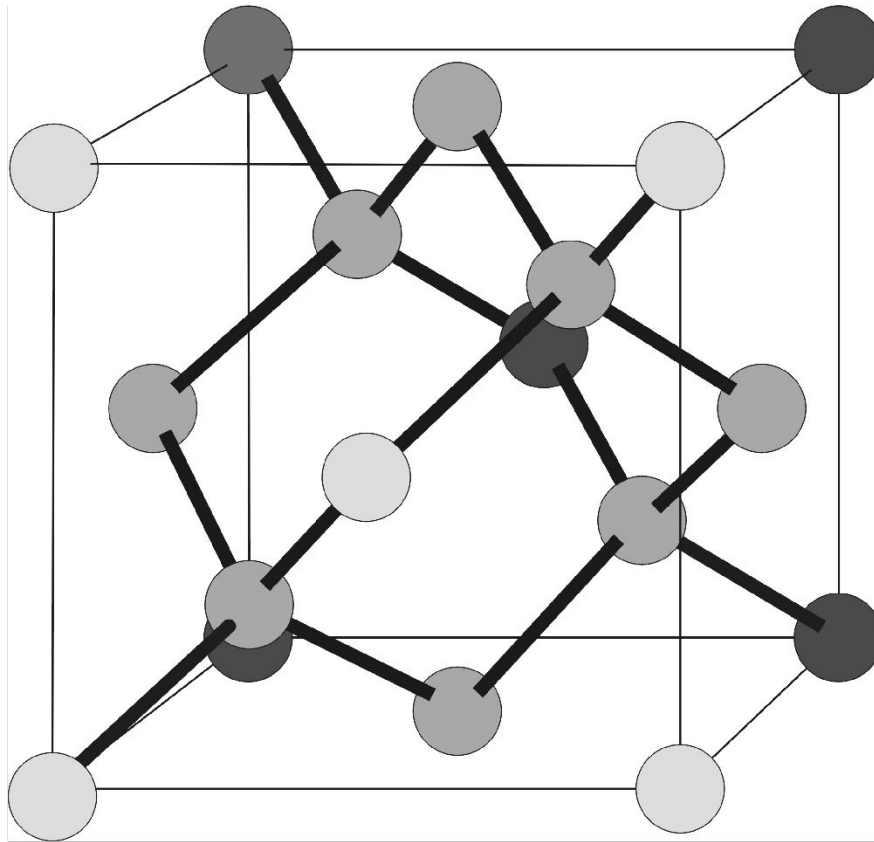
- 1. *Вытягивание из расплава по методу Чохральского.*
- 2. *Метод бестигельной зонной плавки.*
- 3. *Кристаллизация из газовой фазы с использованием методов сублимации из газовой фазы и химических транспортных реакций (CdS, ZnS, SiC).*

# Простые полупроводники

- 1. **Германий**



# Алмазоподобная кубическая гранецентрированная решетка германия и кремния



# Основные свойства германия и кремния

Свойства	Германий	Кремний
Атомная масса	72,64	28,086
Постоянная решетки, Å	3,566	3,542
Плотность при 20 °С, Мг/м <sup>3</sup>	5,3	2,3
Температурный коэффициент линейного расширения (0 – 100 °С), К <sup>-1</sup>	6x10 <sup>-6</sup>	4,2x10 <sup>-6</sup>
Удельная теплопроводность, Вт/(м·К)	55	80
Удельная теплоемкость (0 – 100 °С), Дж/(кг·К)	333	710
Температура плавления, °С	936	1414
Собственное удельное сопротивление при 20 °С, Ом·м	0,68	2·10 <sup>3</sup>
<b>Собственная концентрация носителей, м<sup>-3</sup></b>	<b>2,5·10<sup>19</sup></b>	<b>10<sup>16</sup></b>
<b>Ширина запрещенной зоны, эВ при 0 К</b>	<b>0,785</b>	<b>1,21</b>
<b>Ширина запрещенной зоны, эВ при 300 К</b>	<b>0,72</b>	<b>1,12</b>
<b>Подвижность электронов, м<sup>2</sup>/(В·с)</b>	<b>0,39</b>	<b>0,14</b>
<b>Подвижность дырок, м<sup>2</sup>/(В·с)</b>	<b>0,19</b>	<b>0,05</b>
Работа выхода электронов, эВ	4,8	4,3
Диэлектрическая проницаемость	16	12,5

# Кремний $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

Марка	Уд.сопротивление, $\rho \cdot 10^2$ , Ом·м	Полтность дислокаций, см <sup>-2</sup>	Диаметр слитка, мм	Длина слитка, мм	Ориентация слитка
КДБ	1-20	10	33,5-72,5	50	(111)
ЭКДБ	0,005-1	$3 \cdot 10^3$	33,5-72,5	40	(111)
ЭКДБ	0,5-20	$10^3$	33,5-62,5	40	(100)
ЭКЭС	0,01-0,1	10	33,5-72,5	30	(111)
ЭКЭФ	0,01-1	$3 \cdot 10^3$	33,5-72,5	30	(111)
ЭКЭФ	1-20	10	33,5-72,5	40	(111)
ЭКЭФ	0,1-10	$2 \cdot 10^3$	33,5-62,5	40	(100)

# Основные параметры кремния

Ширина запрещенной зоны	$E_g(300\text{K}) = 1,1242 \text{ эВ}$
Эффективная плотность состояний (свободная зона)	$3,22 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
Эффективная плотность состояний (валентная зона)	$1,83 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
Концентрация собственных носителей заряда, $n_i$ (300К)	$1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Подвижность электронов (300К)	$1400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Подвижность дырок (300К)	$500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Время жизни	$1 \text{ мс} (\cong 100 \text{ Ом} \cdot \text{см})$
Плотность	$2,33 \text{ г/см}^3 = 5 \cdot 10^{22} \text{ атома/см}^3$



# Механические свойства кремния

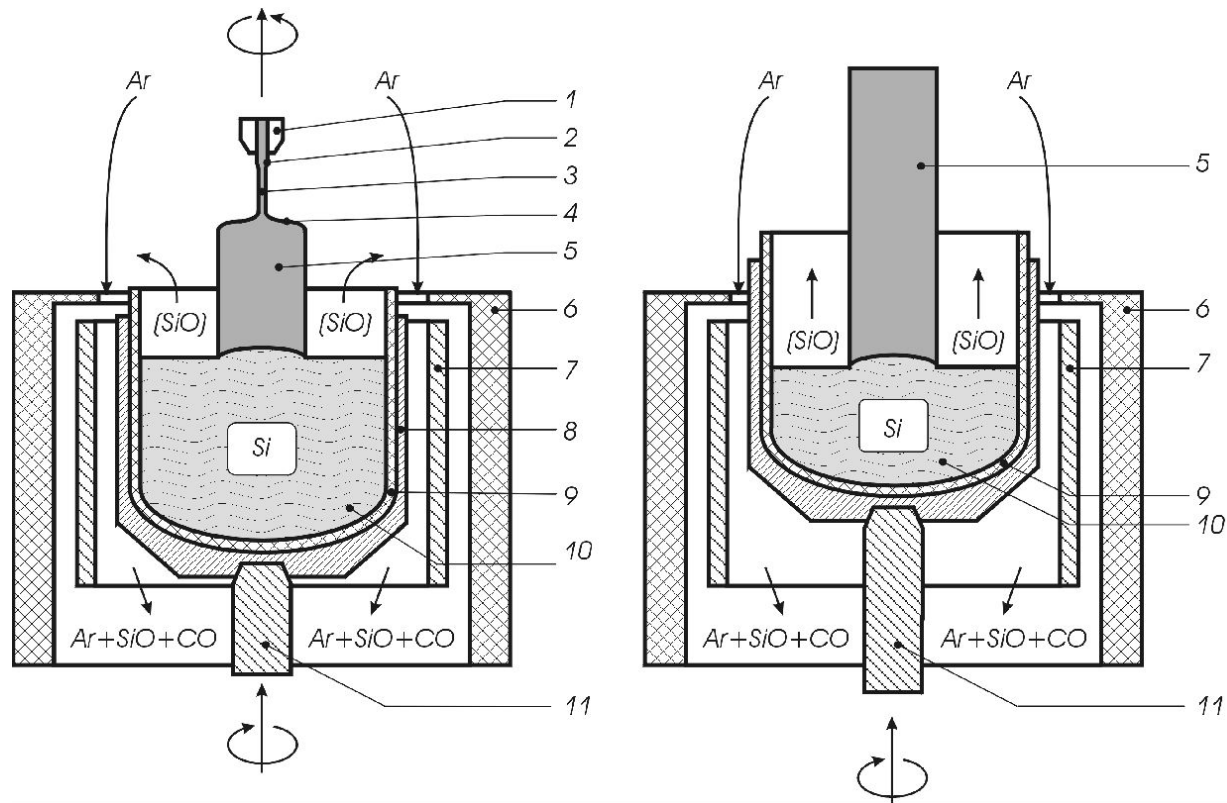
ТКЛР, $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Si	Ge	GaAs	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al	Поли- меры
	2,5	5,8	6,86	0,5	3,2	24	50-20 0

# Теплопроводность кремния

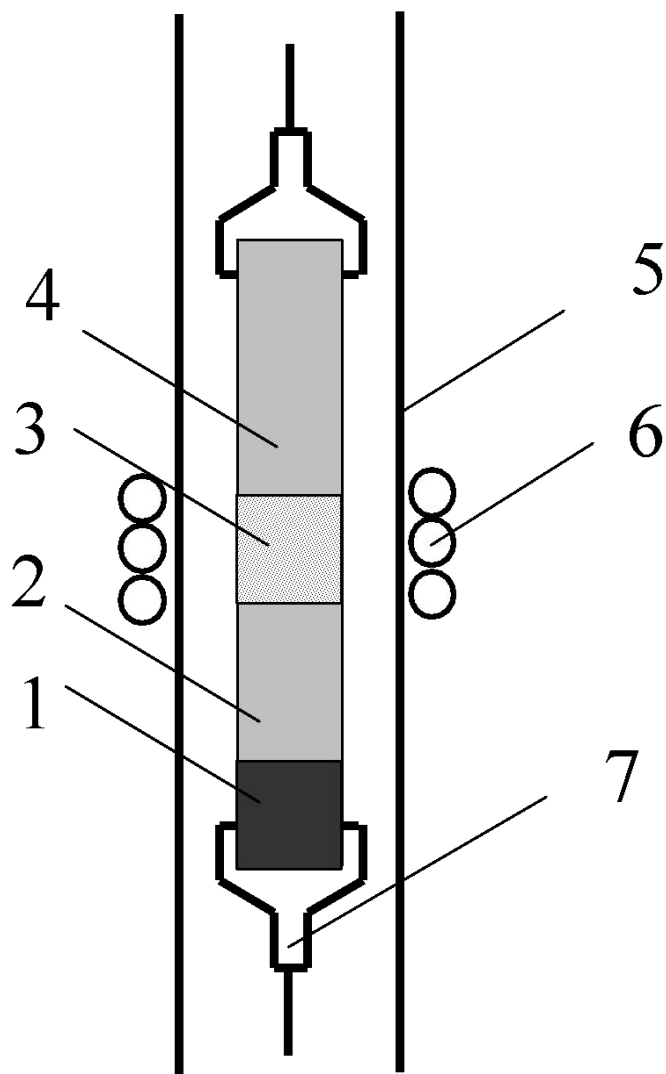
$k,$ $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  (300K)	Si	Ge	GaAs	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al	Ал- маз	Cu, Ag
	1,4 1,5	0,6	0,54 0,46	~0,014	~0,2	~3,5	10- 30	4

# Способы получения

- 1. Метод Чохральского
- $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ ,  $T \sim 2000^\circ\text{C}$



# Метод бестигельной зонной плавки



1-затравка;

2- кристалл;

3- расплавленная зона;

4- исходный материал;

5- стенки герметичной камеры;

6- индуктор;

7- кристаллодержатель



- *Вид  
монокристалла  
Si диаметром  
200 мм после  
извлечения из  
расплава*



**200mm**

**450mm**

# Вид слитка после процесса выращивания



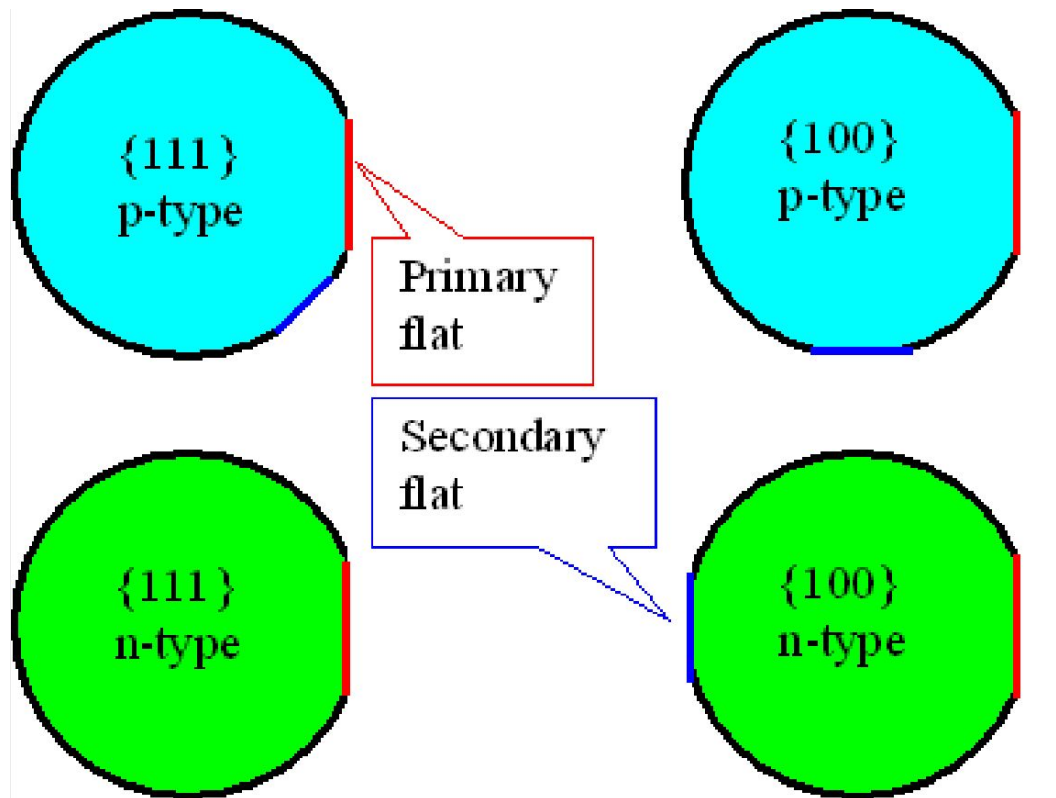


# Промышленная установка для полировки кремниевых подложек диаметром 300 мм

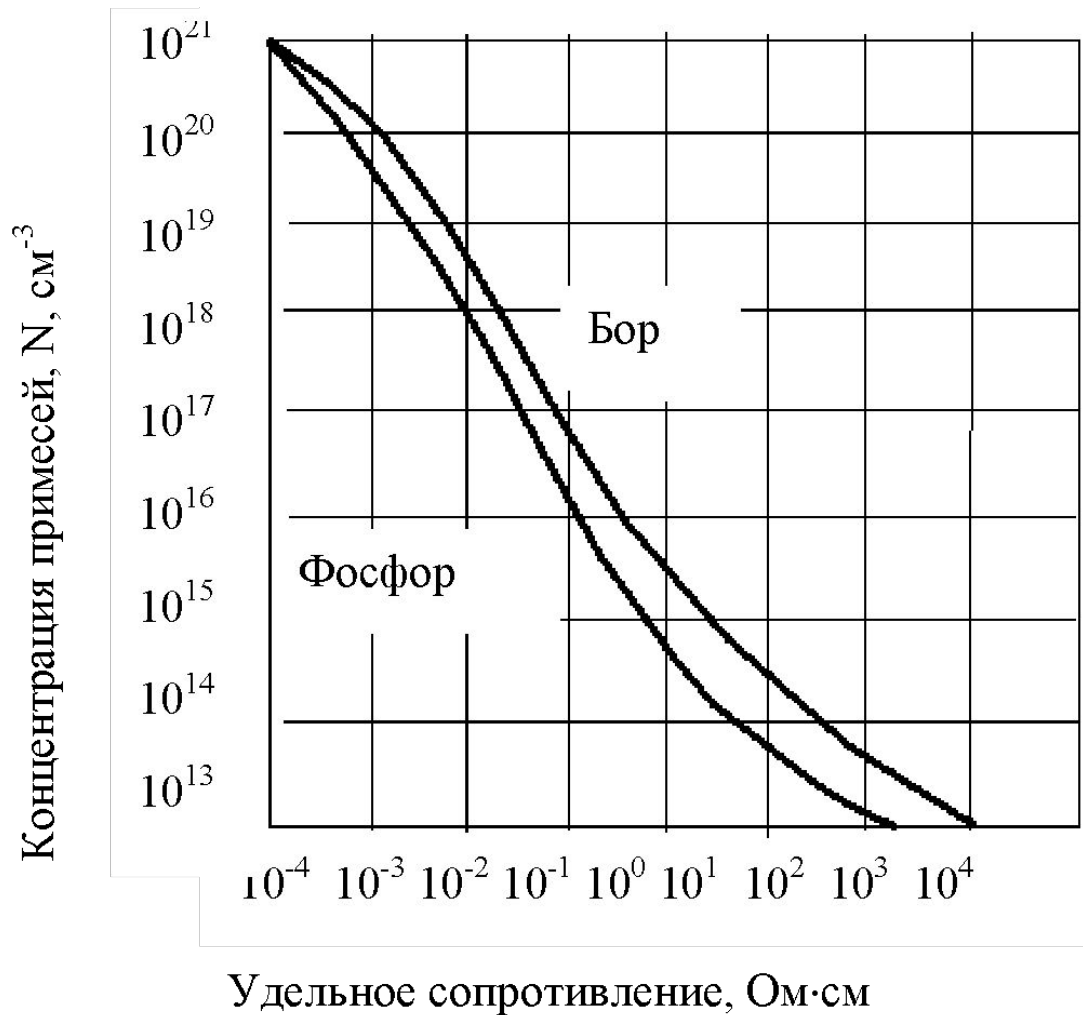


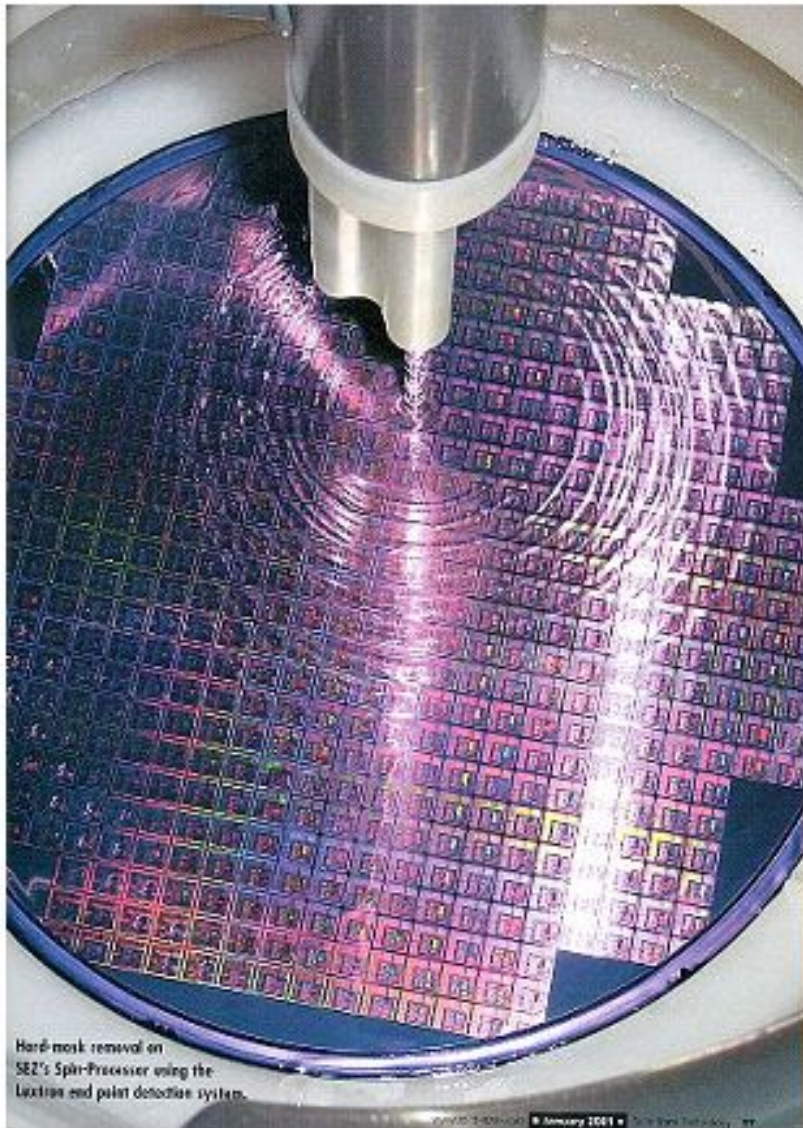


# Маркировка кремниевых подложек в зависимости от кристаллографической ориентации и типа легирования



# Удельное сопротивление кремния в зависимости от концентрации легирующей примеси





- Нанесение покрытий  
методом  
центрифугирования
- (spin-on)

# Полупроводниковые соединения группы A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>

Соединение	$T_{пл.}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_g,$ эВ	$\mu_n,$ $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\mu_p,$ $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\varepsilon$
BN	3000	6,0			7,1
AlN	2400	5,88			9,1
GaN	1700	3,40	0,03		12,2
InN	1100	1,95			
AlP	2000	2,45	0,008	0,003	9,8
GaP	1467	2,26	0,019	0,012	11,1
<b>InP</b>	<b>1070</b>	<b>4,6</b>	<b>0,46</b>	<b>0,015</b>	<b>12,4</b>
AlAs	1770	2,16	0,028		10,1
<b>GaAs</b>	<b>1238</b>	<b>1,43</b>	<b>0,95</b>	<b>0,045</b>	<b>13,1</b>
InAs	942	0,36	3,3	0,046	14,6
AlSb	1060	1,58	0,02	0,055	14,4
GaSb	710	0,72	0,4	0,14	15,7
<b>InSb</b>	<b>525</b>	<b>0,18</b>	<b>7,8</b>	<b>0,075</b>	<b>17,7</b>

## Примеси в соединениях $A^{III}B^V$

Элементы II – Be, Mg, Zn, Cd – акцепторы

Замещают узлы металлического компонента

Элементы VI – S, Se, Te – доноры

Замещают узлы элемента  $B^V$

Элементы IV

Замещают узлы как  $A^{III}$ , так и  $B^V$

# Арсенид галлия GaAs

- Ширина запрещенной зоны -  $1,43$  эВ
- Подвижность электронов -  $0,85$  м<sup>2</sup>/В·с
- Концентрация электронов -  $10^{22}$  м<sup>-3</sup>
- Предельная рабочая температура -  $450^{\circ}\text{C}$
- Акцепторы – Zn, Cd, Cu
- Доноры – S, Se, элементы IV

## Антимонид индия InSb

- Ширина запрещенной зоны - **0,17 эВ**
- Подвижность электронов - **7,7 м<sup>2</sup>/В·с**
- Собственная проводимость при комнатной температуре
- В области примесной проводимости материал близок к вырождению

# Фосфид галлия GaP

- Ширина запрещенной зоны - 2,25 эВ
- Подвижность электронов - 0,46 м<sup>2</sup>/В·с
- Концентрация электронов – 10<sup>17</sup>-10<sup>20</sup>м<sup>-3</sup>
- Акцепторы – Mg, Zn, Cd, C, Be
- Доноры – O, S, Se, Te, Si, Sn



# Полупроводниковые соединения группы A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>

Соединение	$T_{пл.}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_g,$ эВ	$\mu_n,$ $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\mu_p,$ $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
<b>ZnS</b>	<b>1020</b>	<b>3,74</b>	<b>0,014</b>	<b>0,0005</b>
<b>CdS</b>	<b>1750</b>	<b>2,53</b>	<b>0,034</b>	<b>0,011</b>
<b>HgS</b>	<b>1480</b>	<b>1,78</b>	<b>0,07</b>	
<b>ZnSe</b>	<b>1520</b>	<b>2,73</b>	<b>0,026</b>	<b>0,0015</b>
<b>CdSe</b>	<b>1264</b>	<b>1,85</b>	<b>0,072</b>	<b>0,0075</b>
<b>HgSe</b>	<b>790</b>	<b>0,12</b>	<b>2,0</b>	
<b>ZnTe</b>	<b>1239</b>	<b>2,23</b>	<b>0,053</b>	<b>0,003</b>
<b>CdTe</b>	<b>1041</b>	<b>1,51</b>	<b>0,12</b>	<b>0,006</b>
<b>HgTe</b>	<b>670</b>	<b>0,08</b>	<b>2,5</b>	<b>0,02</b>

## Особенности соединений $A^{II}B^{VI}$

- *Изменение удельного сопротивления в широких пределах термообработкой в парах одного из собственных компонентов.*
- *Монокристаллы соединений выпускаются в ограниченных объемах.*
- *Области применения – люминесцентные покрытия и экраны, фоторезисторы, солнечные элементы, тонкопленочные транзисторы*

# Халькогениды кадмия – CdS, CdSe, CdTe

- **Электронный тип проводимости** – обусловлен отклонением стехиометрического состава (недостаток S, Se, Te)
- CdTe
- *n*-CdTe-(избыток Cd)
- *p*-CdTe-(вакансии Cd)
- **Концентрация свободных**
- **носителей заряда** –  $10^{20}$ - $10^{25}$  м<sup>-3</sup>
- **Подвижность электронов** – 5,7 м<sup>2</sup>/В·с

## Халькогениды цинка – $ZdS$ , $ZnSe$ , $ZnTe$

- - Широкая запрещенная зона – 3,6; 2,7; 2,2 эВ

# Полупроводниковые соединения группы $A^{IV}B^{VI}$

- **Халькогениды свинца – PbS, PbSe, PbTe, SnTe**
- Добавление олова (Sn) к теллуриду свинца (PbTe) приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны до нуля.

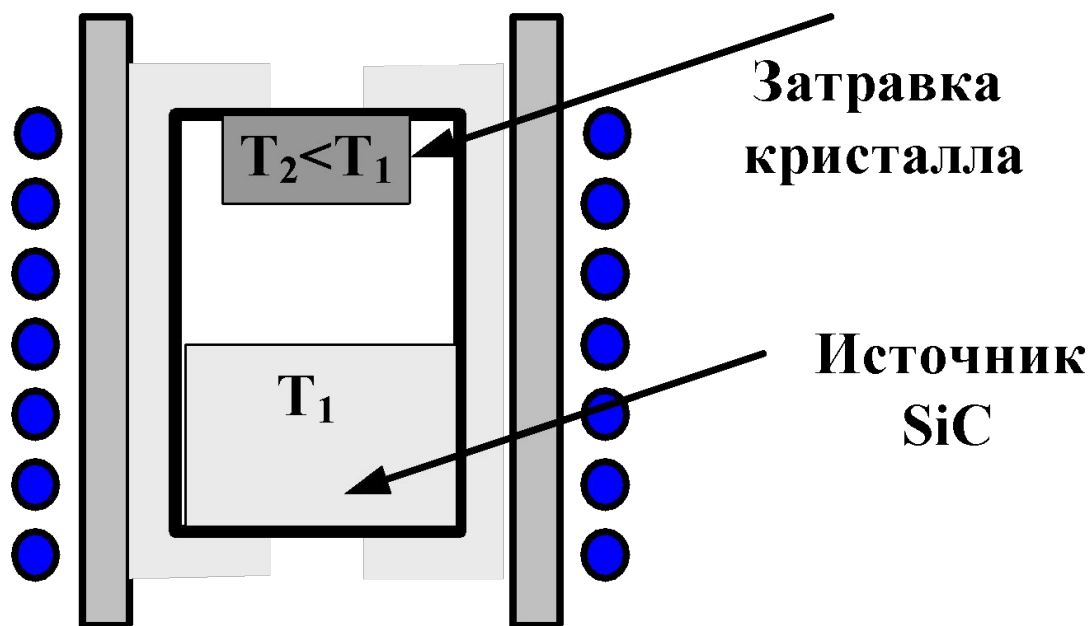
## Халькогениды свинца – PbS, PbSe, PbTe

- *При отклонении от стехиометрического состава обладают электронной проводимостью при избытке Pb, дырочной проводимостью – при избытке элемента VI группы.*
- *Узкозонные материалы.*

# Полупроводниковые соединения группы $A^{IV}B^{IV}$

- Карбид кремния
- $SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO, T=2400-2600^\circ C$
- ширина запрещенной зоны – 2,39 эВ
- подвижность электронов – 0,1 м<sup>2</sup>/В·с
- подвижность дырок – 0,006 м<sup>2</sup>/В·с
- избыток Si – *n*-тип проводимости
- избыток C – *p*-тип проводимости
- Собственная проводимость начиная с 1400°C

# Способ формирования монокристаллов SiC

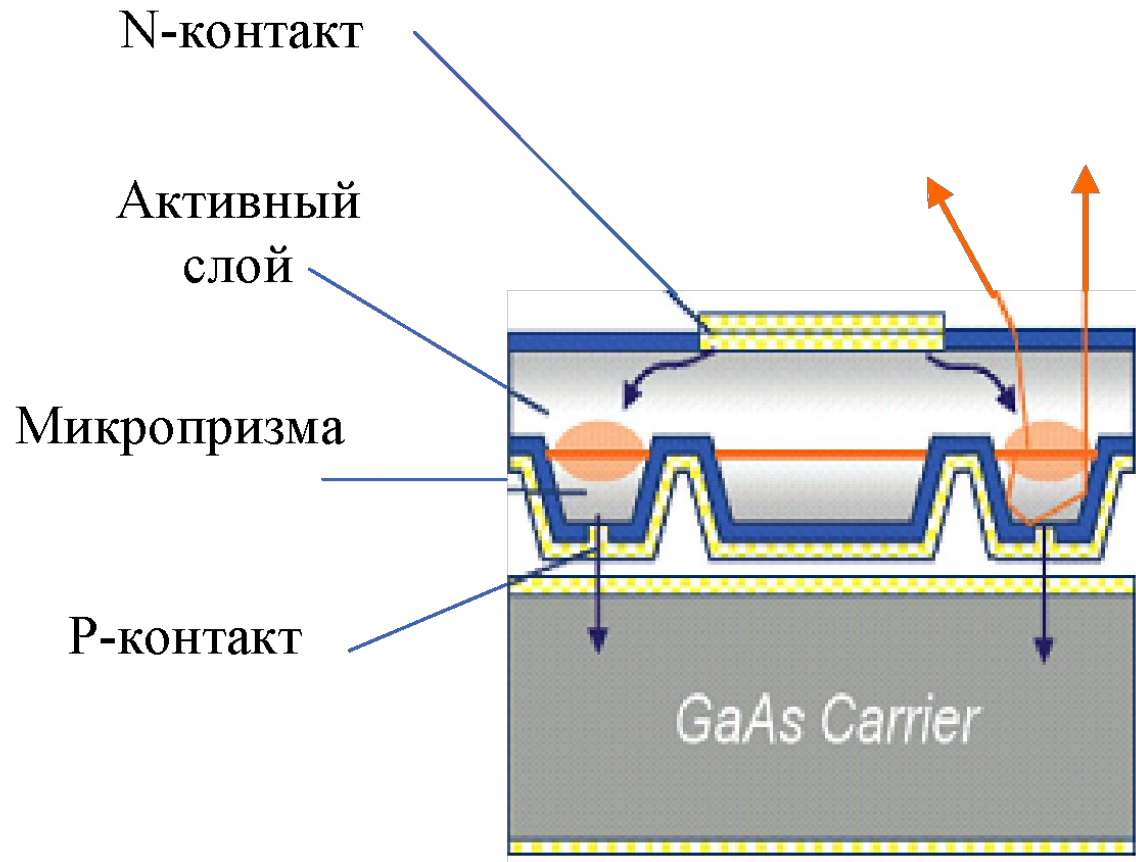




# Области применения SiC

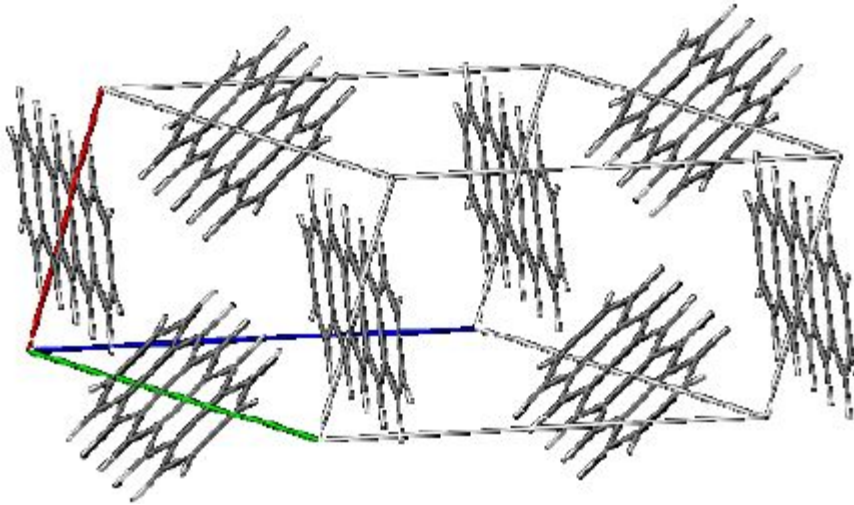
- *Светодиоды, мощные выпрямительные диоды, высокотемпературные тензорезисторы.*
- *Штампы при формировании низкоразмерных структур*

# Тонкопленочный светоизлучательный диод (LED)



# Органические полупроводники

- Органический материал на основе полимера
- Силы Ван-дер-Ваальса



- *Линейные* – пентацен
- *Двумерные соединения со сшитыми кольцами* – производные нафталина и фталоцианинов
- *Гетероциклические олигомеры* – производные тиофена с *p*-типом проводимости
- **Применение**
- Светодиоды, органические фотовольтаические элементы, прозрачные тонкопленочные транзисторы, дисплеи с использованием гибких материалов.

