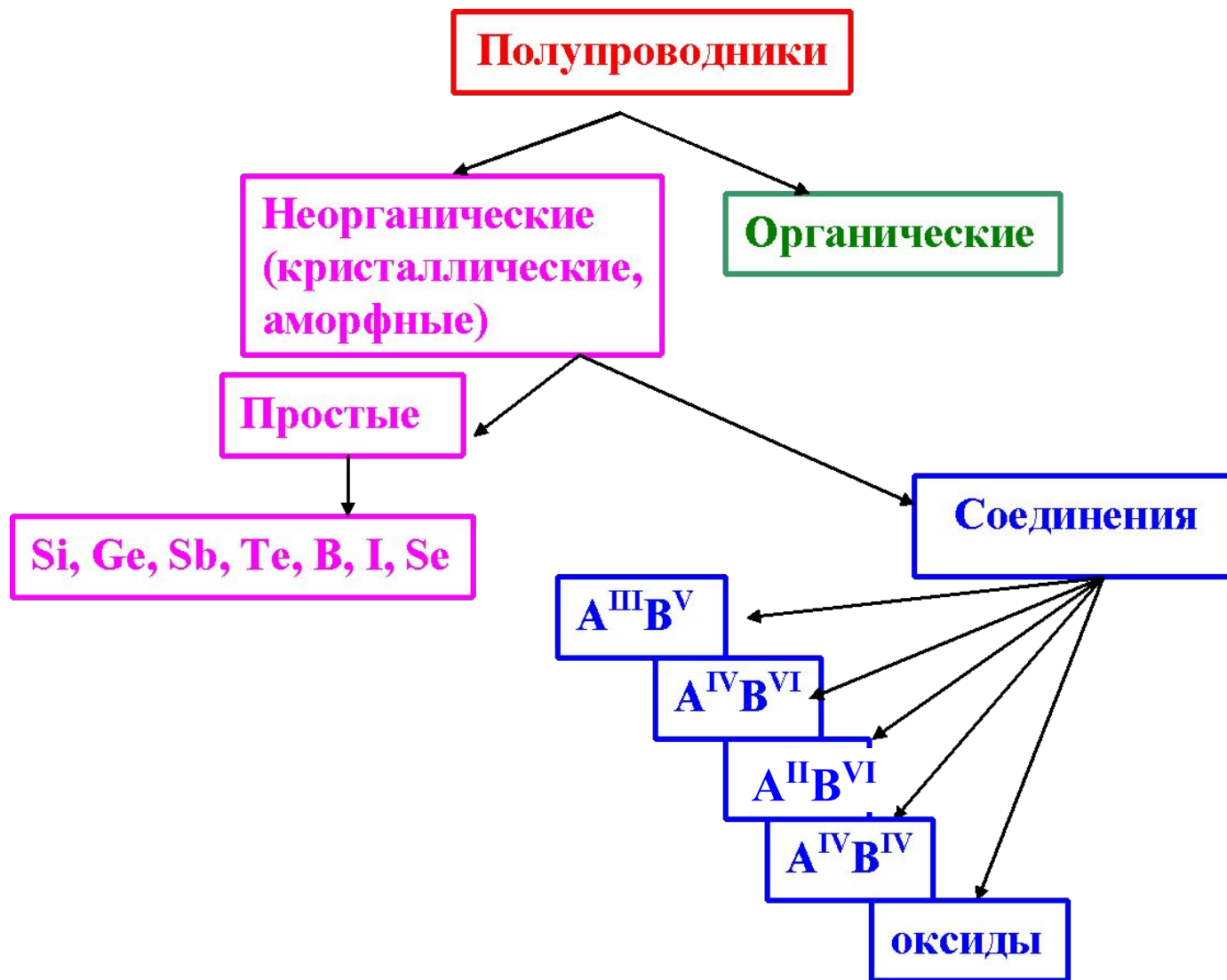


Лекция №8

Тема: Основные группы полупроводниковых материалов

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

Классификация полупроводников

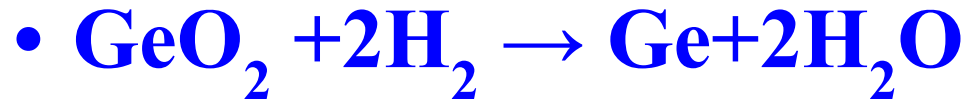
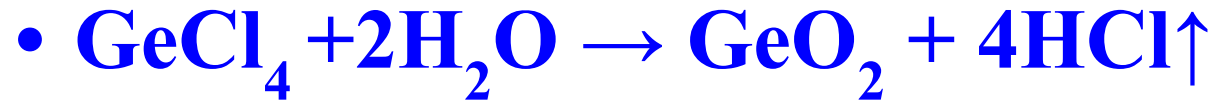


Способы получения монокристаллов полупроводников

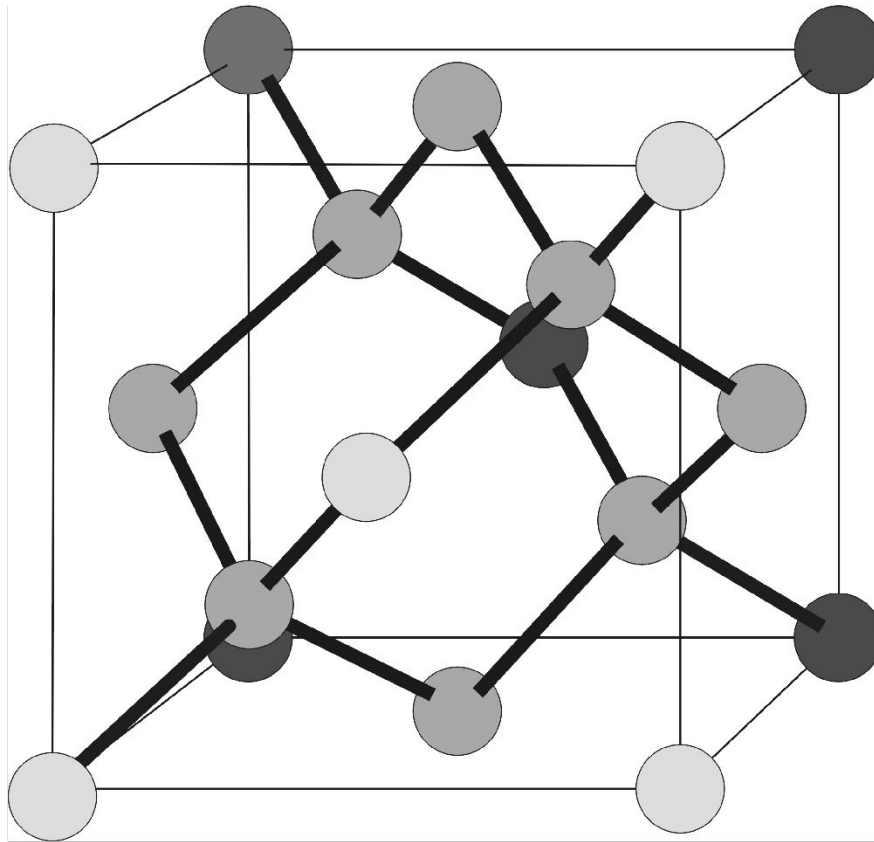
- 1. *Вытягивание из расплава по методу Чохральского.*
- 2. *Метод бестигельной зонной плавки.*
- 3. *Кристаллизация из газовой фазы с использованием методов сублимации из газовой фазы и химических транспортных реакций (CdS, ZnS, SiC).*

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 ³	5,3	2,3
Температурный коэффициент линейного расширения (0 – 100 °С), К ⁻¹	6x10 ⁻⁶	4,2x10 ⁻⁶
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 ³
Собственная концентрация носителей, м⁻³	2,5·10¹⁹	10¹⁶
Ширина запрещенной зоны, эВ при 0 К	0,785	1,21
Ширина запрещенной зоны, эВ при 300 К	0,72	1,12
Подвижность электронов, м²/(В·с)	0,39	0,14
Подвижность дырок, м²/(В·с)	0,19	0,05
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 ⁻²	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

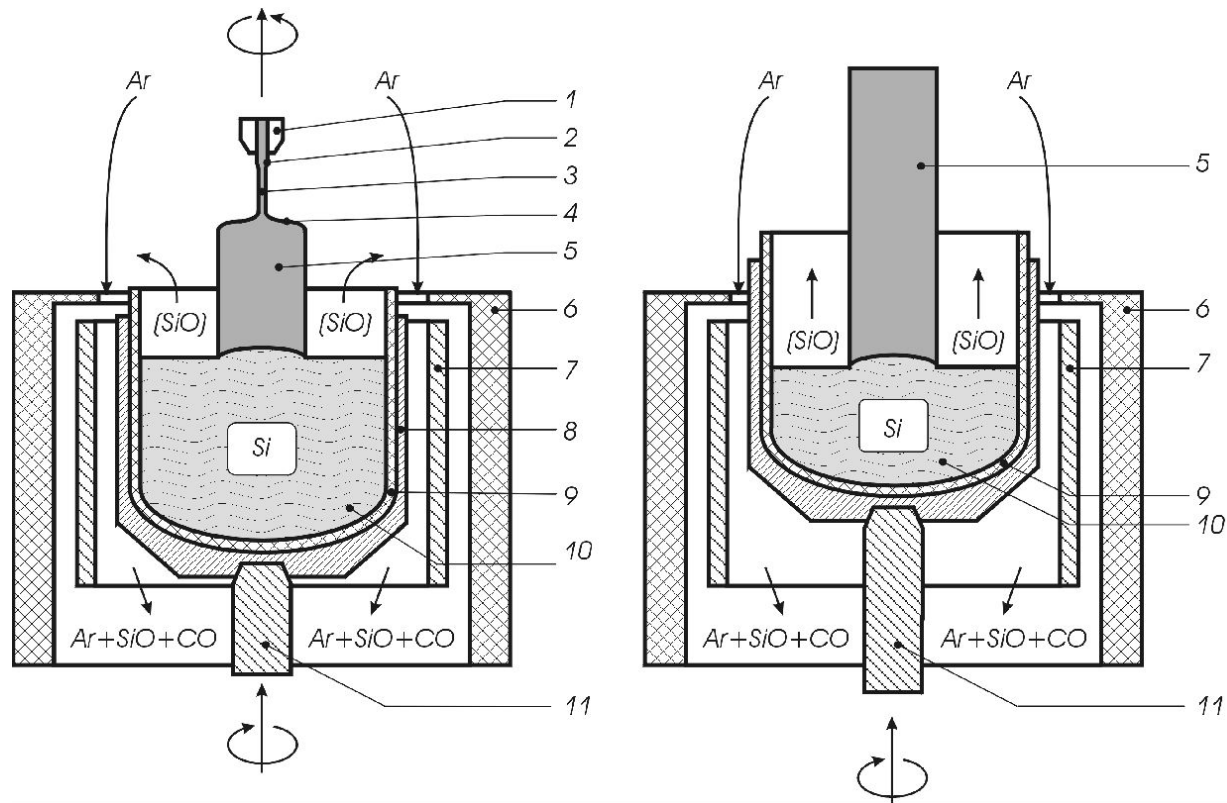
ТКЛР, 10^{-6} K^{-1}	Si	Ge	GaAs	SiO₂	Si₃N₄	Al	Поли- меры
	2,5	5,8	6,86	0,5	3,2	24	50-20 0

Теплопроводность кремния

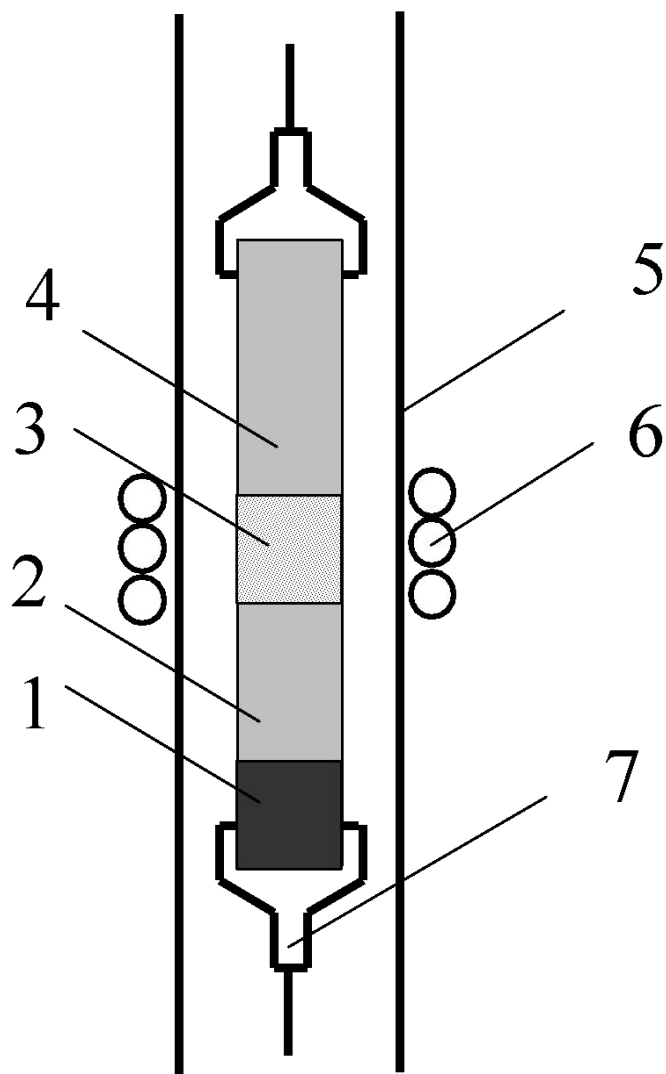
$k,$ $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (300K)	Si	Ge	GaAs	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al	Ал- маз	Cu, Ag
	1,4 1,5	0,6	0,54 0,46	~0,014	~0,2	~3,5	10- 30	4

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

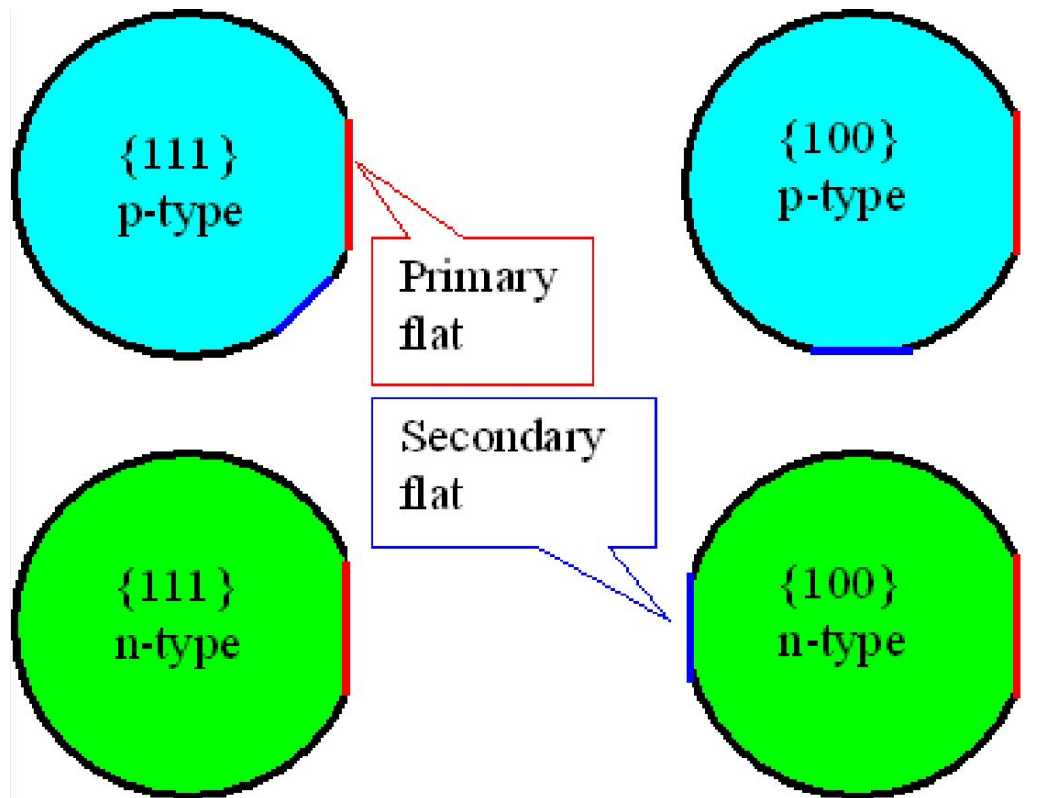
Вид слитка после процесса выращивания



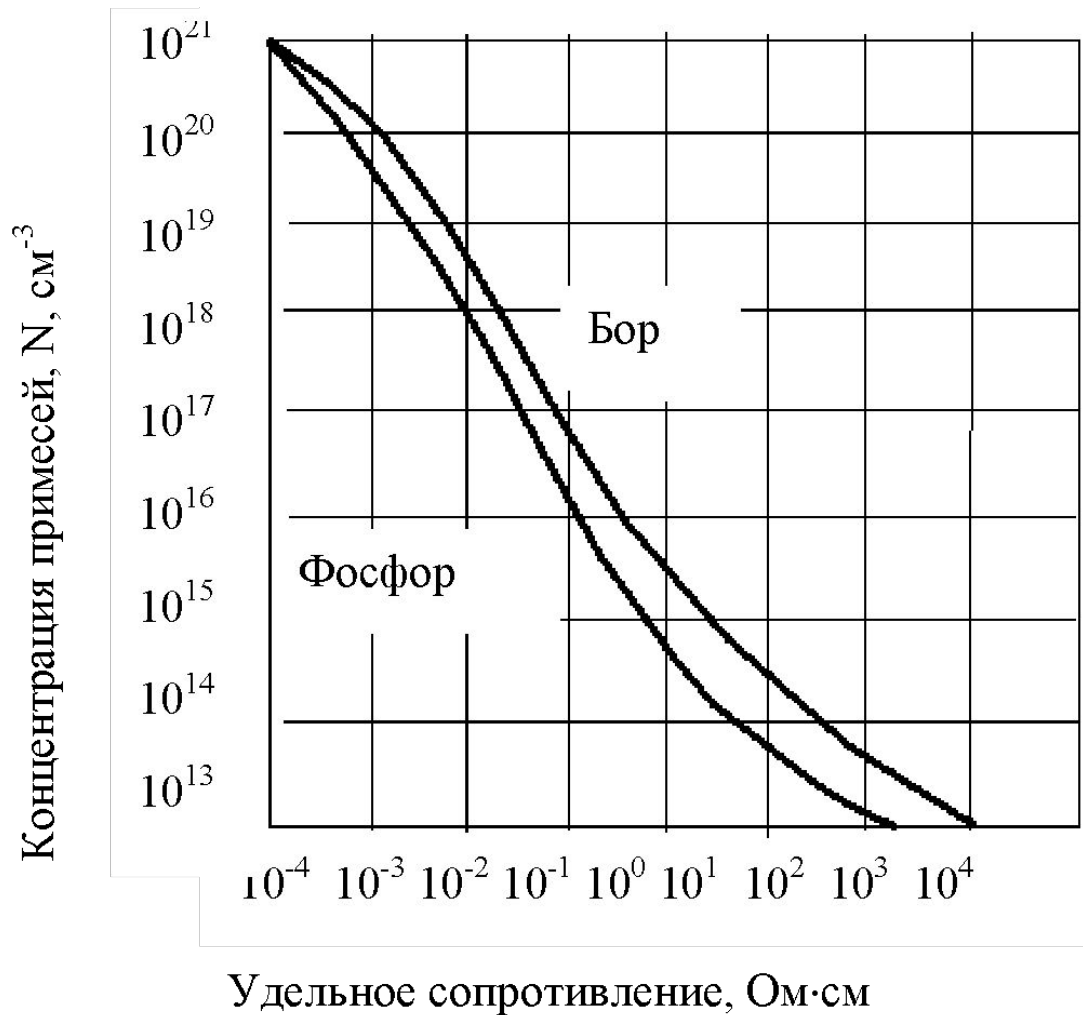
Промышленная установка для полировки кремниевых подложек диаметром 300 мм

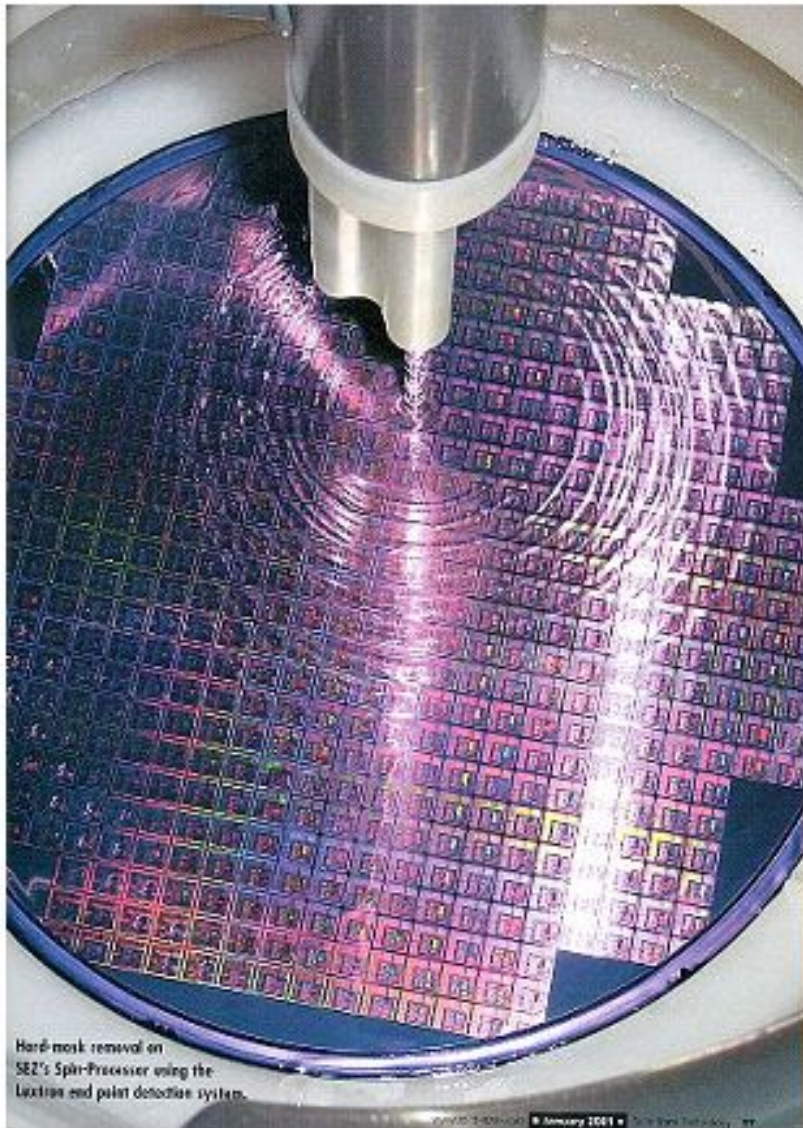


Маркировка кремниевых подложек в зависимости от кристаллографической ориентации и типа легирования



Удельное сопротивление кремния в зависимости от концентрации легирующей примеси





- Нанесение покрытий
методом
центрифугирования
- (spin-on)

Полупроводниковые соединения группы A^{III}B^V

Соединение	$T_{пл.}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_g,$ эВ	$\mu_n,$ м ² /В·с	$\mu_p,$ м ² /В·с	ϵ
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
InP	1070	4,6	0,46	0,015	12,4
AlAs	1770	2,16	0,028		10,1
GaAs	1238	1,43	0,95	0,045	13,1
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
InSb	525	0,18	7,8	0,075	17,7

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 - $0,85$ м²/В·с
- Концентрация электронов - 10^{22} м⁻³
- Предельная рабочая температура - 450°C
- Акцепторы – Zn, Cd, Cu
- Доноры – S, Se, элементы IV

Антимонид индия InSb

- Ширина запрещенной зоны - **0,17 эВ**
- Подвижность электронов - **7,7 м²/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 м²/В·с
- Концентрация электронов – 10¹⁷-10²⁰м⁻³
- Акцепторы – Mg, Zn, Cd, C, Be
- Доноры – O, S, Se, Te, Si, Sn

Полупроводниковые соединения группы A^{II}B^{VI}

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

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⁻³
- **Подвижность электронов** – 5,7 м²/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.

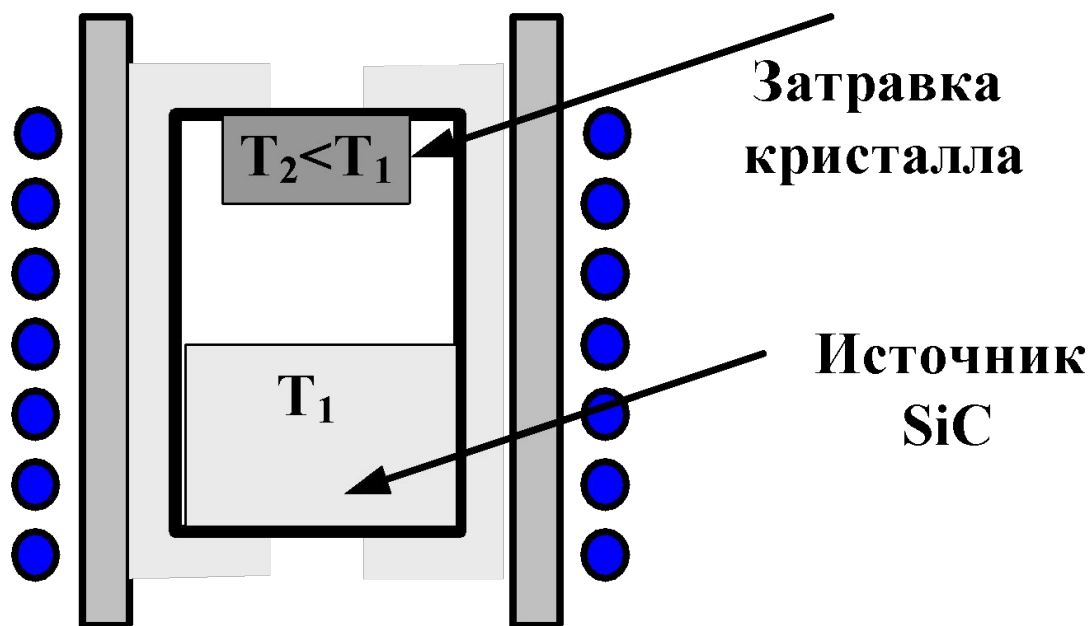
Халькогениды свинца – PbS, PbSe, PbTe

- *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 м²/В·с
- подвижность дырок – 0,006 м²/В·с
- избыток Si – *n*-тип проводимости
- избыток C – *p*-тип проводимости
- Собственная проводимость начиная с 1400°C

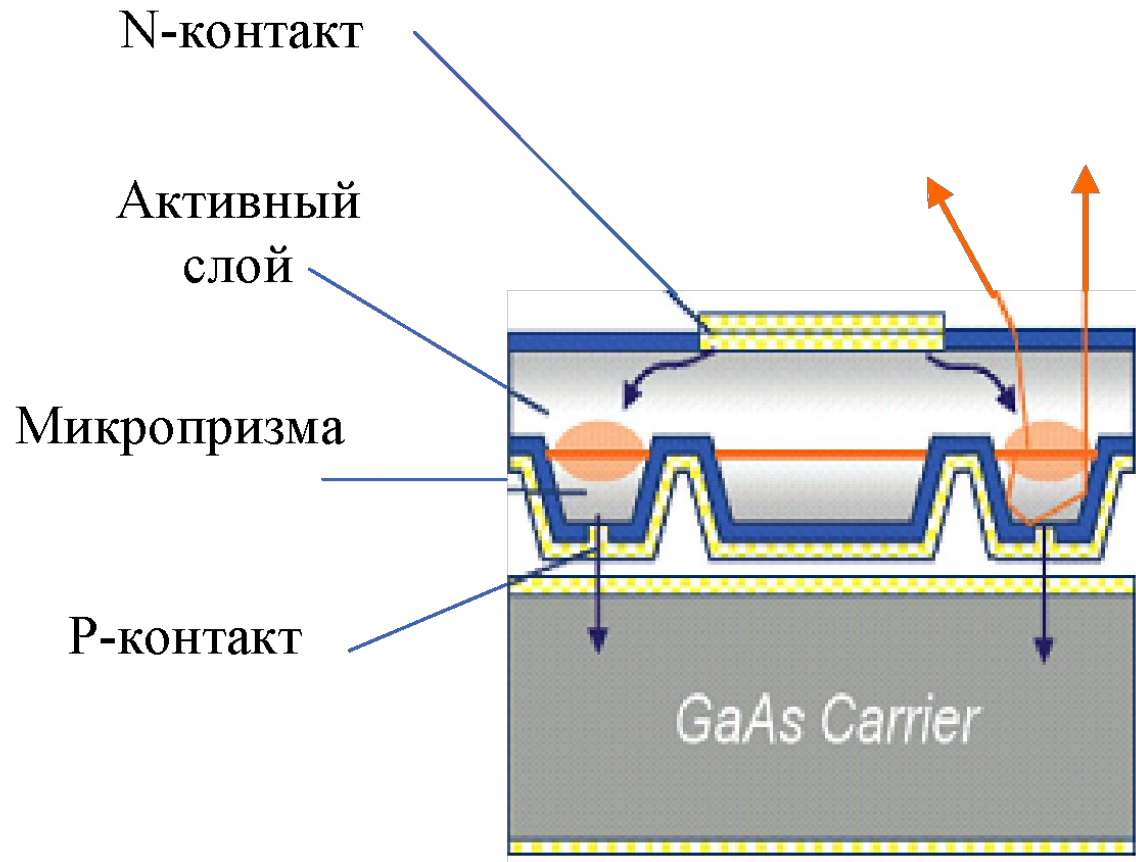
Способ формирования монокристаллов SiC



Области применения SiC

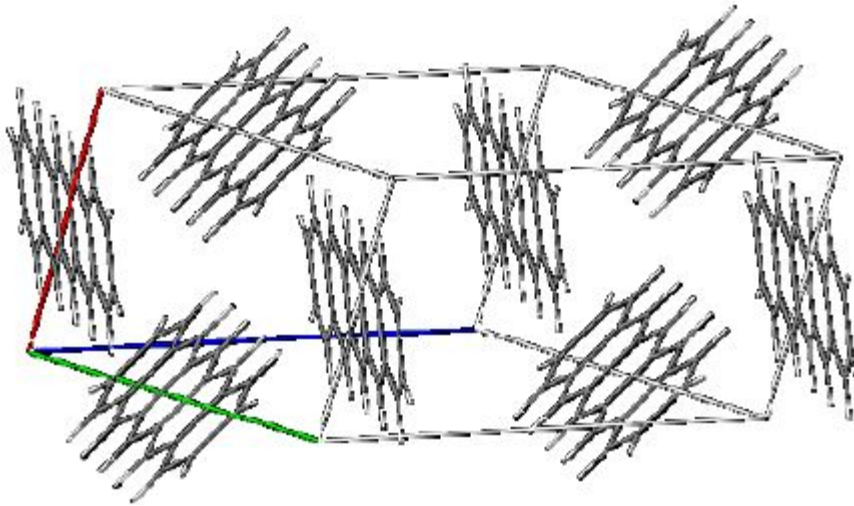
- *Светодиоды, мощные выпрямительные диоды, высокотемпературные тензорезисторы.*
- *Штампы при формировании низкоразмерных структур*

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.

