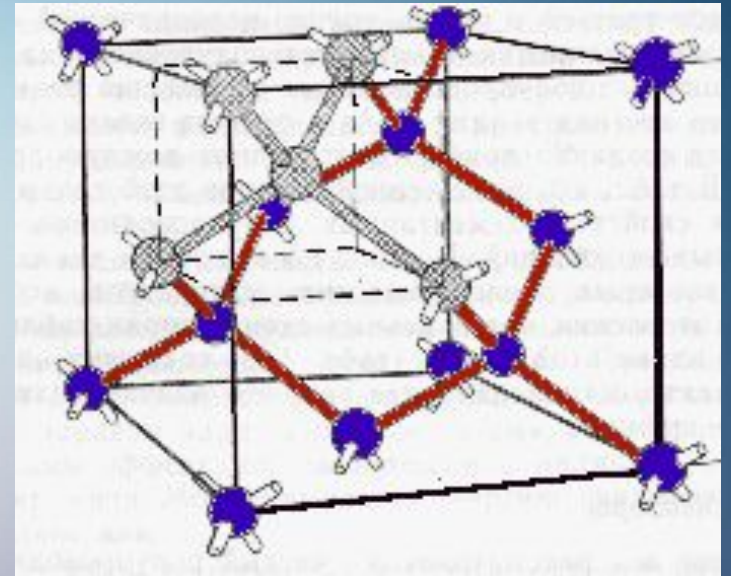


Методы выращивания  
монокристаллов кремния.  
Сравнение. Сферы применения  
монокристаллов, выращенных  
различными методами.

# Общая информация

- Кремний обладает **алмазоподобной кристаллической решеткой**, которая может быть представлена в виде двух взаимопроникающих гранецентрированных решеток. Параметр решетки - 0.54 нм, кратчайшее расстояние между атомами - 0.23 нм. Легирующие атомы замещают атомы кремния, занимая их место в кристаллической решетке. Основными легирующими атомами являются фосфор (5<sup>ти</sup> валентный донор замещения) и бор (3-х валентный акцептор замещения). Их концентрация обычно не превышает  $10^{-8}$  атомных процента.



# Этапы производства кремния

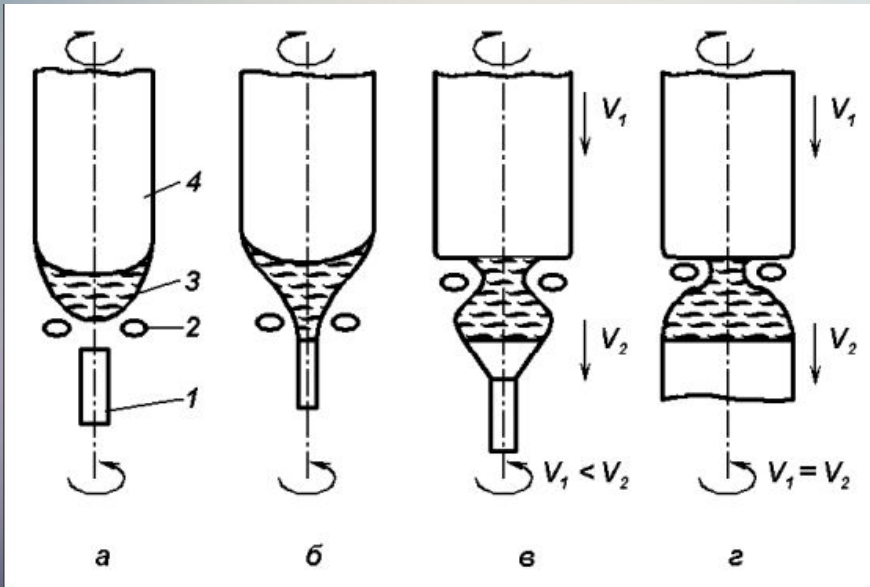
- Технология получения монокристаллов полупроводникового кремния состоит из следующих этапов:
- 1. получение технического кремния;
- 2. превращение кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено;
- 3. очистка и восстановление соединения, получение кремния в виде поликристаллических стержней;
- 4. конечная очистка кремния методом кристаллизации;
- 5. выращивание легированных монокристаллов

# Методы выращивания

- 1. Метод Чохральского

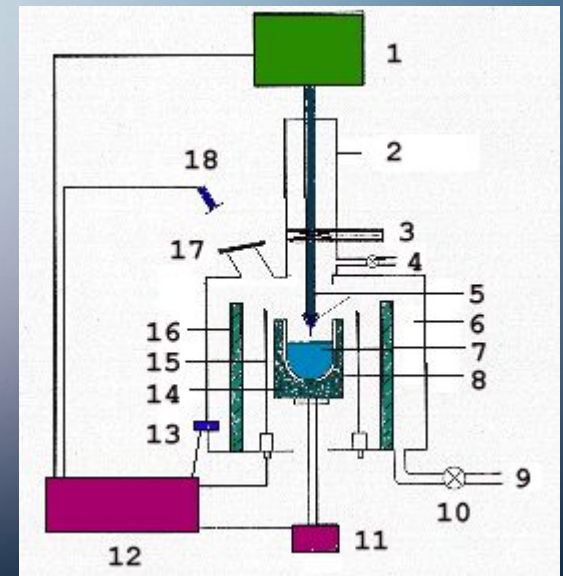
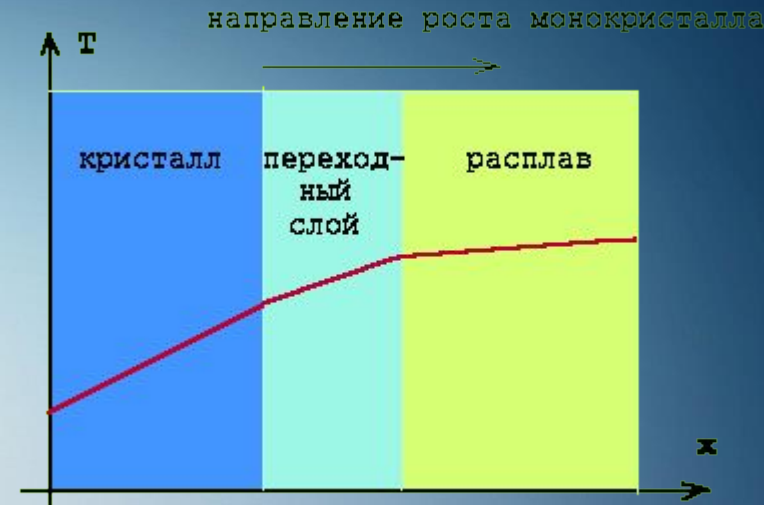


- 2. Зонная плавка



# Метод Чохральского

- Идея метода получения кристаллов по Чохральскому заключается в росте монокристалла за счет перехода атомов из жидкой или газообразной фазы вещества в твердую фазу на их границе раздела.
- Скорость роста  $V$  определяется числом мест на поверхности растущего кристалла для присоединения атомов, поступающих из жидкой фазы, и особенностями переноса на границе раздела.
- Тигель - кварцевый
- Атмосфера роста – инертная (аргона при разрежении  $\sim 10^4$  Па.)
- Направление вращения тигля – противоположное вращению монокристалла





# Метод Чохральского

- В начале процесса роста монокристалла часть затравочного монокристалла расплавляется для устранения в нем участков с повышенной плотностью механических напряжений и дефектами. Затем происходит постепенное вытягивание монокристалла из расплава.

Для получения монокристаллов кремния методом Чохральского разработано и широко используется высокопроизводительное автоматизированное оборудование, обеспечивающее воспроизводимое получение бездислокационных монокристаллов диаметром до 200—300 мм. С увеличением загрузки и диаметра кристаллов стоимость их получения уменьшается.



*Круглый затравочный кристалл кремния с фрагментом начала оттяжки*

# Метод Чохральского

- При больших массах расплава снижение стоимости становится незначительным за счет высокой стоимости кварцевого тигля и уменьшения скорости выращивания кристаллов из-за трудностей отвода скрытой теплоты кристаллизации
- С целью дальнейшего повышения производительности процесса и для уменьшения объема расплава, из которого производится выращивание кристаллов, интенсивное развитие получили установки полунепрерывного выращивания.
- Производится дополнительная или периодическая загрузка кремния

# Легирование

- Для получения монокристаллов п- или р-типа с требуемым удельным сопротивлением проводят соответствующее легирование исходного поликристаллического кремния или расплава. В загружаемый поликремний вводят соответствующие элементы (P, B, As, Sb и др.) или их сплавы с кремнием, что повышает точность легирования.



# Метод зонной плавки

- Метод используется при выращивании монокристаллов полупроводников и диэлектриков.
- Выращивание кристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки (БЗП) осуществляют на основе одновиткового индуктора (типа «игольного ушка»), внутренний диаметр которого меньше диаметра исходного поликристаллического стержня и кристалла.

# Метод зонной плавки

- Скорость выращивания кристаллов методом БЗП вдвое больше, чем по методу Чохральского, благодаря более высоким градиентам температуры.
- А диаметр кристаллов кремния доведен до 150 мм (что уступает кристаллам, выращенным методом Чохральского)
- Легирование проводят из газовой фазы путем введения в газ-носитель (аргон) газообразных соединений легирующих примесей.

# Примеси в БЗП

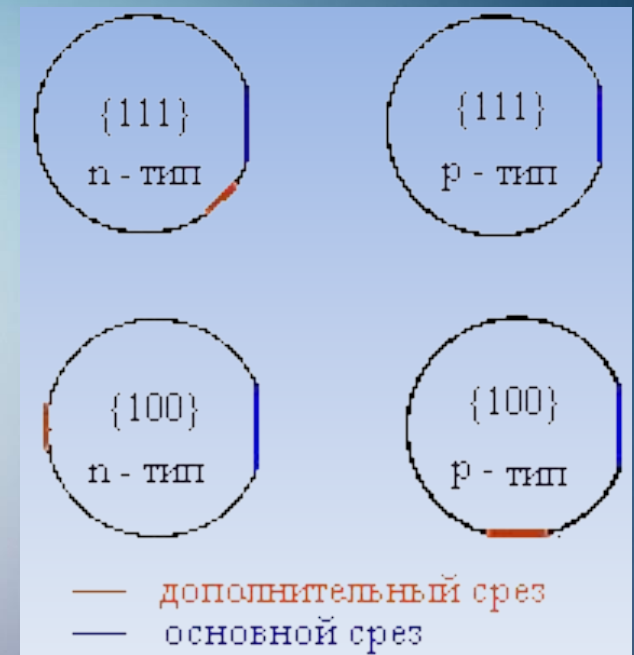
- Основными фоновыми примесями в монокристаллах кремния являются кислород, углерод, азот, быстродиффундирующие примеси тяжелых металлов.
- Концентрация кислорода в кристаллах, получаемых методом БЗП, обычно составляет  $2 \cdot 10^{15}$  —  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.
- Углерод в кремнии является одной из наиболее вредных фоновых примесей
- Содержание углерода в кристаллах, получаемых по методу Чохральского и БЗП, составляет  $5 \cdot 10^{16}$  —  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>

# Дальнейшая обработка

- Из установки извлекают кремниевый слиток диаметром 20 - 50 см и длиной до 3 метров. Для получения из него кремниевых пластин заданной ориентации и толщиной в несколько десятых миллиметра производят следующие технологические операции.
- 1. Механическая обработка слитка:
  - отделение затравочной и хвостовой части слитка;
  - обдирка боковой поверхности до нужной толщины;
  - шлифовка одного или нескольких базовых срезов (для облегчения дальнейшей ориентации в технологических установках и для определения кристаллографической ориентации);
  - резка алмазными пилами слитка на пластины: (100) - точно по плоскости (111)
  - с разориентацией на несколько градусов.
- 2. Травление. На абразивном материале SiC или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> удаляются повреждения высотой более 10 мкм. Затем в смеси плавиковой, азотной и уксусной кислот, приготовленной в пропорции 1:4:3, или раствора щелочей натрия производится травление поверхности Si.
- 3. Полирование - получение зеркально гладкой поверхности. Используют смесь полирующей суспензии (коллоидный раствор частиц SiO<sub>2</sub> размером 10 нм) с водой.

# Дальнейшая обработка

- В окончательном виде кремний представляет из себя пластину диаметром 15 - 40 см, толщиной 0.5 - 0.65 мм с одной зеркальной поверхностью. Вид пластин с различной ориентацией поверхности и типом





# Сравнение

Параметр	Метод <u>Чохральского</u>	Метод зонной плавки
Максимальный диаметр пластины, <u>мм</u>	150 - 400	200
Удельное сопротивление p- тип, <u>Ом·см</u>	0.005-50	0.1-3000
Удельное сопротивление n- тип, <u>Ом ·см</u>	0.005-50	0.1-800
Ориентация	[111], [110], [100]	[111], [100]
Время жизни неосновных носителей, <u>мкс</u>	10-50	100-3000
Содержание кислорода, атом/ <u>см<sup>2</sup></u>	10-100	<10
Содержание углерода, атом/ <u>см<sup>2</sup></u>	10	<10

# Дефекты

- Точечные дефекты (по Френкелю, по Шоттки, атомы примеси в положении замещения, атомы примеси в междоузльи)
- Линейные дефекты (краевая дислокация, винтовая дислокация)
- Поверхностные дефекты (границы зерен монокристаллов, двойниковые границы, объемные дефекты в кремнии)
- При росте кристаллов кремния с очень низкой плотностью дислокаций возникают микродефекты.
- Дефекты кристаллов кремния, выращенными вышепредставленными методами, в большинстве своем являются бездислокационными

# Применение

- 1. Для производства интегральных схем (Чохральский)
- 2. для изготовления приборов, не требующих высоких значений удельного сопротивления (до 25 Ом·см) из-за загрязнения кислородом и другими примесями из материала тигля (Чохральский)
- 3. Монокристаллы кремния, получаемые методом БЗП, составляют около 10 % общего объема производимого монокристаллического кремния и идут в основном на изготовление дискретных приборов, особенно тиристоров большой мощности.