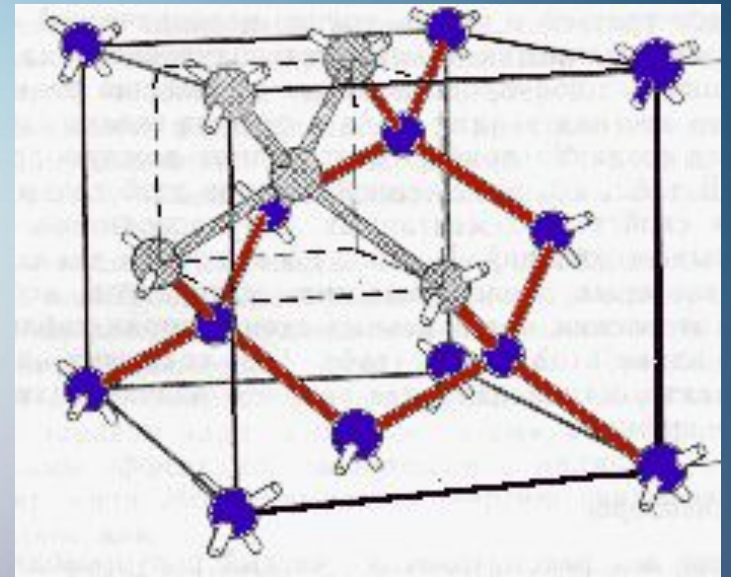


Методы выращивания
монокристаллов кремния.
Сравнение. Сферы применения
монокристаллов, выращенных
различными методами.

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^{ти} валентный донор замещения) и бор (3-х валентный акцептор замещения). Их концентрация обычно не превышает 10^{-8} атомных процента.



Этапы производства кремния

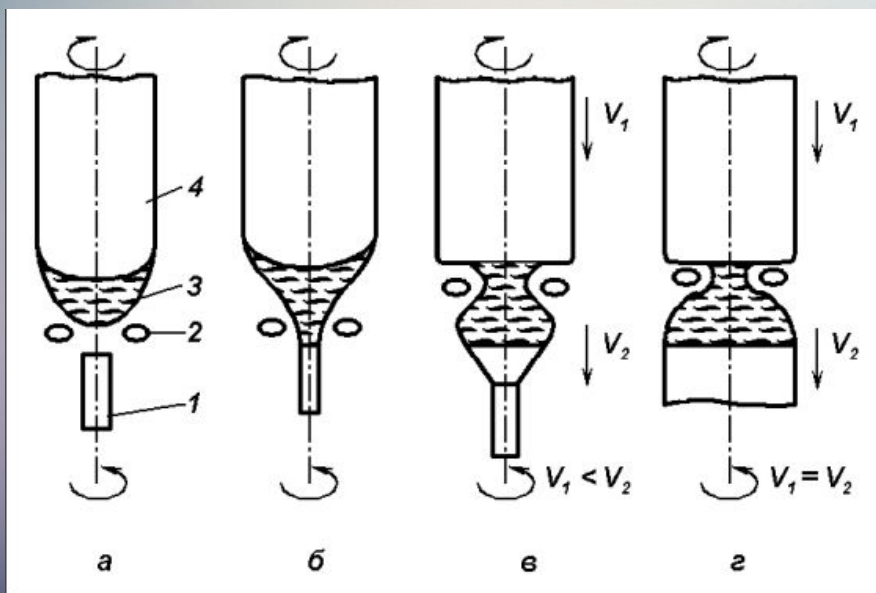
- Технология получения монокристаллов полупроводникового кремния состоит из следующих этапов:
- 1. получение технического кремния;
- 2. превращение кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено;
- 3. очистка и восстановление соединения, получение кремния в виде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

Методы выращивания

- 1. Метод Чохральского

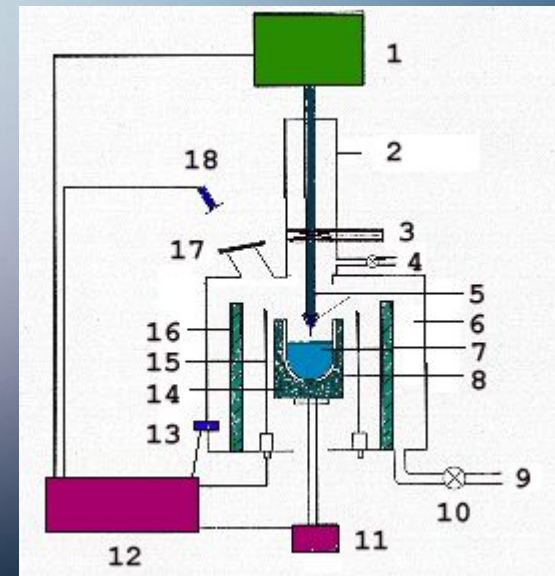


- 2. Зонная плавка



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

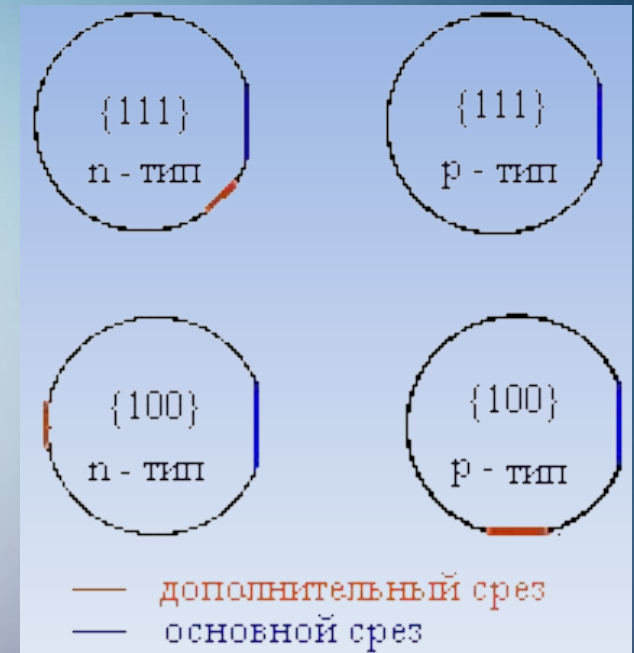
- Основными фоновыми примесями в монокристаллах кремния являются кислород, углерод, азот, быстродиффундирующие примеси тяжелых металлов.
- Концентрация кислорода в кристаллах, получаемых методом БЗП, обычно составляет $2 \cdot 10^{15}$ — $2 \cdot 10^{16}$ см⁻³.
- Углерод в кремнии является одной из наиболее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

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 Al₂O₃ 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 SiO₂ 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, <u>атом/см²</u> | 10-100 | <10 |
| Содержание углерода, <u>атом/см²</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.