http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-2/

КРЕМНИЙ И ЕГО СОЕДИНЕНИЯ

Характеристика кремния как химического элемента

Кремний – второй по распространенности (после кислорода) элемент земной коры. В верхних осадочных слоях он содержится в виде глин, кварца и других соединений и составляет 27,6% состава земной коры.. Под осадочным находится слой базальтов и гранитов, в состав которых также

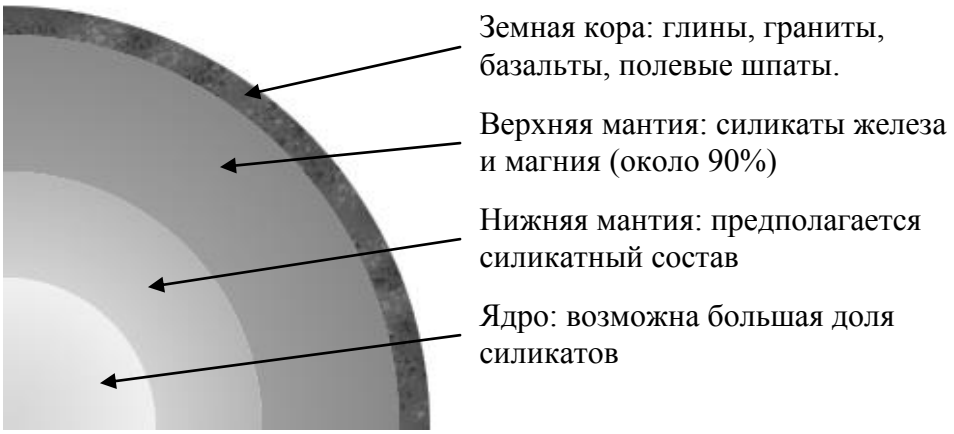


Рис.1 Содержание кремния в различных слоях Земли

входит кремний. Эти слои образуют земную кору. В верхних слоях мантии преобладают силикаты железа и магния. Ядро и нижняя мантия, по предположениям ученых, также состоят в основном из силикатов (рис.1).

В чистом виде кремний в природе не встречается. Наиболее распространен оксид кремния и силикаты. Первый встречается в виде минерала кварца (кремнезем, кремень). В природе из этого соединения сложены целые горы. Попадаются очень крупные, до 40 т кристаллы кварца. Обычный песок состоит из мелкого кварца с различными примесями. Горный хрусталь – совершенно прозрачные кристаллы кварца. В зависимости от примесей он может приобретать различную окраску. Так, оксиды марганца и железа дают фиолетовый оттенок. Это аметист. Желтоватый хрусталь – цитрин, дымчатый – раухтопаз. В нем могут находиться и различные включения. Кошачий глаз включает в себя волокнистые материалы, «стрелы Амура» - включения оксида титана.

Анализ лунного грунта показал присутствие оксида кремния (IV) в количестве более 40%. В составе каменных метеоритов содержание кремния достигает 20%.

Наиболее востребованным для электротехники (в частности, цифровой техники) является чистый кремний, как полупроводник. Так называемые «девять девяток чистоты» - 99,9999999% чистого кремния – первое требование к полупроводнику. Ни один из современных компьютеров не существовал бы без кремния.

Кремний – второй элемент в IV группе Периодической таблицы Д.И. Менделеева. Он находится прямо под углеродом и, следовательно, имеет сходные с ним свойства. На внешнем электронном слое у него четыре электрона, из которых в обычном состоянии два не спаренных (рис. 2, а). У

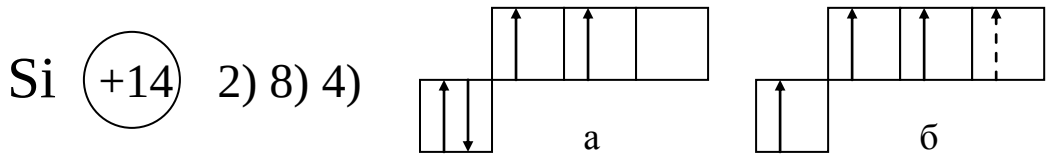


Рис.2 Электронное строение атома углерода и его внешнего электронного слоя с валентностью равной: а) двум; б) четырем

кремния существуют соответствующие этому состоянию двухвалентные соединения, например SiO. Но гораздо более естественным при обычных температурах для кремния является четырехвалентное состояние, при котором один из электронов «перепрыгивает» с s-подуровня на p-подуровень (рис.2).

Внешний электронный слой у кремния находится дальше от ядра, чем у углерода, сила притяжения валентных электронов к нему меньше, поэтому свойства кремния ближе к металлическим. Кристаллический кремний обладает металлическим блеском, является полупроводником. Последнее его свойство объясняется малой прочностью ковалентных связей, существующих между атомами кремния. Они начинают разрушаться уже при комнатной температуре. При дальнейшем ее повышении высвобождается большое количество свободных электронов. Полагают, что при абсолютном нуле

идеально чистый и правильный кремний должен быть идеальным электроизолятором. Но идеальная чистота и абсолютный нуль недостижимы, поэтому мы обладаем хорошим полупроводником.

В природе существует три изотопа кремния с массовыми числами 28, 29 и 30. Преобладает (92,27%) легкий изотоп – кремний-28. Известны также несколько радиоактивных изотопов.

Кремний – активный элемент. В природе он не встречается в свободном виде, и большинство его соединений очень устойчивы. Несмотря на распространенность кремния в природе, открыт он был сравнительно поздно. В 1825г. выдающийся шведский химик и минералог Якоб Берцелиус сумел в двух реакциях выделить не очень чистый кремний. Это был аморфный серый порошок. Для этого он восстановил калием газообразный тетрафторид кремния SiF_4. Новый элемент был назван силицием (от латинского silex – камень). Русское название появилось спустя девять лет и сохранилось до наших дней.

Кремний, как и углерод, образует различные аллотропные модификации. Кристаллический кремний так же мало похож на аморфный, как алмаз на графит. Это твердое вещество серо-стального цвета с металлическим блеском и гранецентрированной кристаллической решеткой того же типа, что и у алмаза.

Технически чистый кремний (95-98%) сейчас получают главным образом восстановлением кремнезема в электрической дуге между графитовыми электродами. Используется также способ восстановления кремнезема коксом в электрических печах. Такой кремний используют в металлургии как раскислитель, связывающий и удаляющий из металла кислород, и как легирующую добавку, повышающую прочность и коррозийную стойкость сталей и многих сплавов на основе цветных металлов. В сплавы его добавляют в небольших количествах: избыток кремния приводит к хрупкости.

Один из способов получения высокочистого полупроводникового кремния был разработан во второй половине XIX века русским химиком Н.Н. Бекетовым и был одним из первых способов получения кремния в промышленности. Он основан на реакции между парами цинка и тетрахлорида кремния. Для реакции берут высокочистые реагенты и проводят ее при 950°С в трубчатом реакторе, изготовленном из плавленого кварца. Элементарный кремний образуется в виде игольчатых кристаллов, которые потом измельчают и промывают соляной кислотой, тоже весьма чистой. Затем следует еще одна ступень очистки – ***зонная плавка***, и лишь после нее поликристаллическую кремниевую массу превращают в монокристаллы.

Есть и другие реакции, в которых получают высокочистый полупроводниковый кремний. Это восстановление водородом трихлорсилана $SiHCl_3$ или четыреххлористого кремния $SiCl_4$ и термическое разложения моносилана, гидрида кремния SiH_4 или тетраиодида SiI_4. В последнем случае разложение соединения происходит на разогретой до 1000°С танталовой ленте. Дополнительная очистка зонной плавкой следует после каждой из этих реакций.

Области применения соединений кремния

Соли кремниевых кислот чрезвычайно распространены в природе в виде руд и минералов. Важнейшими силикатами являются ***алюмосиликаты***, на долю которых приходится более половины массы земной коры. Природные силикаты исчисляются многими сотнями представителей. К ним относят кварц, граниты, полевые шпаты, кристаллические сланцы (слюды), асбест.

Кварц – пьезоэлектрик. Где только не находит техническое применение кристалл кварца в виде пластинки! Например, кварцевые часы высокой точности служат для «хранения» точного времени, определяемого астрономическими методами. Точность суточного хода кварцевых часов

±0,001 с. Основной деталью пьезо-кварцевых стабилизаторов длины радиоволн (частоты), преобразователей давления в электрическую величину с точностью ±1,5%, преобразователей электрической энергии в звуковую (громкоговорители и др.) и механическую (микрофоны, шумопеленгаторы, ультразвуковая механика) является пластинка из кварца.

Характерная особенность ***кварцевого стекла*** – высокая термическая устойчивость. Такое стекло можно сильно нагреть и сейчас же охладить в холодной воде. Это объясняется тем, что у кварцевого стекла коэффициент объемного расширения в 25 раз меньше, чем у обычного стекла. Кварцевое стекло прозрачно как для видимого света, так и для ультрафиолетового. Поэтому из кварцевого стекла изготавливают баллоны кварцевых ламп – источника ультрафиолетовых лучей.

Граниты – одна из самых распространенных пород в земной коре – прекрасный строительный и облицовочный материал.

Полевые шпаты – сырье для керамической, фарфоровой, стекольной, цементной и других отраслей промышленности. В строительстве их применяют в качестве поделочных материалов. Кристаллические сланцы (слюды) обладают высокой термостойкостью и высокими электроизоляционными свойствами и находят применение в электротехнике, радиотехнике. Они также используются как звуко- и теплоизоляционные материалы. ***Асбест*** – минерал с волокнистой структурой – теплоизоляционный и огнеупорный материал. Широкое применение находят слоистые минералы – слюды, тальк, каолинит. Драгоценные и полудрагоценные камни – изумруд, топаз, аквамарин – хорошо обработанные кристаллы природных силикатов, окрашенные различными оксидами.

Искусственные силикаты также играют важную роль в жизни человека. Знакомство человека со ***стеклом*** – первым искусственным силикатом – произошло за 3500 лет до н. э.

Основной состав оконного стекла $Na_2 \cdot CaO \cdot 6SiO_2$. Однако частичная замена натрия, кальция или кремния на другие элементы позволяет получать разнообразные сорта стекла. Кварцевое, хрустальное, бутылочное, посудное, электроламповое, зеркальное, пористое (пеностекло), защитное, архитектурно-строительное, светотехническое, стекло для световодов и стеклосфер, оптическое, лабораторное – вот далеко не полный их перечень. Вводя внутрь стеклянного листа металлическую сетку, получают армированное стекло. Трехслойное стекло (триплекс) изготавливают склейкой листа пленки с двумя листами стекла.

Световоды – стеклянные волокна высокой прозрачности, отражающего лучи света от внутренней поверхности. Луч света, проходя по такому волокну, не выходит за его пределы и может быть использован для передачи информации. На основе оптического волокна выпускаются детали приборов для радиоэлектронной, приборостроительной и других отраслей промышленности. Трудно оценить перспективу использования световодов. Световой жгут для телефонной связи обеспечит 2000 телефонных переговоров одновременно. Можно транслировать одновременно две цветные телепередачи. С помощью световодов стало возможным проводить ранее недоступные медицинские исследования внутренних поверхностей органов, моделировать нервную систему высших животных и человека. Из стекловодов делают «иглы», используемые для световых микроуколов ядра живой клетки.

Весьма перспективны работы по применению волоконной оптики в электронно-вычислительных устройствах. Их назвали ОВМ (оптические вычислительные машины) в отличие от обычных ЭВМ. Благодаря им появилась возможность введения в ОВМ прямой информации – речи, изображения, текста и пр.

Кремнийорганические соединения

Химия кремнийорганических соединений представляет собой большой раздел современной науки. К числу важнейших химических продуктов, необходимых для народного хозяйства (смазки, смолы, лаки, каучуки и т. д.), относятся мономерные и полимерные кремнийорганические соединения. Первое кремнийорганическое соединение было получено в 1845 г. французским химиком Ж. Эбельменом. Взаимодействием тетрахлорида кремния $SiCl_4$ и этилового спирта он получил этиловый эфир ортокремниевой кислоты (тетраэтоксисилан, этилсиликат $Si(OC_2H_5)_4$). Далее были получены четырех-замещенные органические соединения кремния с общей формулой SiR_4 и другие соединения.

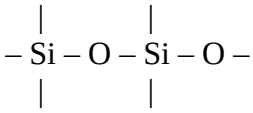


Рис.4 Силоксановые связи

Среди ученых господствовало представление о полном сходстве соединений кремния и углерода. Считалось, что замена атомов углерода в органических соединениях атомами кремния не приводит к существенному изменению свойств органических соединений кремния. В этот период Д.И. Менделеев опубликовал несколько работ по химии кремния и кремнийорганических соединений. Его диссертация на звание приват-доцента, не утратившая своей ценности до настоящего времени, называлась «О строении кремнеземистых соединений» (1856 г.). Д.И. Менделеев первым из химиков показал, что кремний в отличие от углерода способен образовывать с кислородом продукты полимерной структуры (рис.4). Такие полимеры содержат в своем составе чередующиеся связи кремний — кислород (силоксановые связи).

Д.И. Менделеев заложил основы химии кремнийорганических соединений. Он детально изучил открытую ранее Ж. Эбельменом реакцию образования тетраэтоксисилана, установил правильное строение этого

соединения и четырехвалентность кремния, а также определил ряд физических констант. Уделяя большое внимание химии кремнийорганических соединений. Взглядов Д.И. Менделеева на строение кислородных соединений кремния придерживались А.М. Бутлеров, Н.А. Меншуткин и другие русские химики. За рубежом работы Д.И. Менделеева этого периода были или неизвестны, или не поняты.

В истории развития химии кремнийорганических соединений ведущая роль принадлежит нашей отечественной науке. Началом современного развития химии высокомолекулярных кремнийорганических соединений является разработка академиком К.А. Андрияновым с сотрудниками способа синтеза кремнийорганических смол (1937 г.) и освоение промышленного производства кремнийорганических полимеров. Сразу резко возрос интерес к элементоорганическим соединениям этого класса. В настоящее время синтезировано несколько тысяч кремнийорганических соединений, изучены их физико-химические свойства, методы синтеза и области их практического применения.

Все кремнийорганические соединения условно разделены на две большие группы - низкомолекулярные и высокомолекулярные соединения. Из них практическое значение получили не кремнийорганические соединения с цепями кремний – кремний (силаны), а соединения, содержащие цепи кремний — кислород (силоксаны). Чем объяснить преимущества кремнийорганических соединений, содержащих силоксановые цепи?

Связь кремния с кремнием в кремнийорганических соединениях термически неустойчива. Нагревание соединений, содержащих эту связь, до 200-250 °С приводит к их полному разложению. Силоксановая связь отличается высокой термической стойкостью. В зависимости от состава и строения кремнийорганических соединений их термическая стабильность находится в пределах 300-500 °С. В химическом отношении связь кремний

— кислород значительно устойчивее связи кремний — кремний. Она разрушается только при взаимодействии с фтором, серной кислотой и крепкими щелочами при нагревании.

Кремнийорганические мономерные соединения являются важнейшими промежуточными продуктами для синтеза кремнийорганических полимеров. Исходным доступным сырьем для получения кремнийорганических мономерных соединений являются кремний, кремнезем, кокс, хлор, хлороводород и т. д. Наибольшее распространение получили методы получения кремнийорганических мономеров из кремнезема через тетрахлорид кремния и из кремнезема через элементарный кремний. Структура кремнийорганических полимеров аналогична структуре кварца и силикатов, они также обладают большой термической стойкостью. Разница в структурах – наличие органических радикалов у кремний-органических полимеров, которые придают высокую эластичность молекуле полимера. Оксид кремния (IV) и силикаты также имеют полимерное строение.

Кремнийорганические мономеры в основном используют для получения полимеров, но они находят также и самостоятельное применение. Из них основное промышленное значение имеет этиловый эфир ортокремниевой кислоты $Si(OC_2H_5)_4$ (этил-силикат) – связующее вещество при получении цементов, керамики, красящих веществ. После пропитки этилсиликатом тканей, кож, ваты, бумаги, дерева, асбеста, гипса, бетона и т. д. эти материалы становятся водонепроницаемыми и менее горючими. Этилсиликат применяют также для приготовления специальных клеев. Этиловый эфир ортокремниевой кислоты используют для получения жаростойких литейных форм в производстве точного литья.

Кремнийорганические жидкости могут быть получены с широким диапазоном температур кипения и вязкости. Их вязкость очень мало изменяется в интервале температур от –70 до +250 °С.

Температура замерзания большинства кремнийорганических жидкостей около –70 °С (иногда –130 °С и ниже), в то время как у нефтяных масел с той же температурой кипения она составляет от –20 до –40 °С.

Полиорганосилоксановые жидкости термически стабильны. Они не изменяют цвета и практически не окисляются кислородом воздуха при длительном нагревании до 200 °С. В атмосфере инертных газов, а также на воздухе в присутствии ингибиторов они устойчивы и при более высоких температурах.

Кремнийорганические смолы – бесцветные или от желтого до коричневого цвета продукты. Они хорошо растворимы во многих органических растворителях, и их растворы используются как лаки. Кремнийорганические смолы обладают исключительно высокой термической устойчивостью и стойкостью к окислению.

Ранее использовали различные способы повышения водостойкости материалов путем нанесения на их поверхность защитных покрытий или пропиток. Однако подавляющее большинство предложенных составов имели существенные недостатки: одни изменяли внешний вид обрабатываемой поверхности, другие ухудшали физико-химические и механические свойства обрабатываемого материала или значительно увеличивали его массу; пористые материалы становились воздухонепроницаемыми и т. д.

В настоящее время найдена лишенная этих недостатков возможность повышения водостойкости материалов, заключающаяся в обработке последних различными кремнийорганическими соединениями. Обработанные кремнийорганическими соединениями материалы не смачиваются ни водой, ни водными растворами. Пористые материалы после обработки кремнийорганическнми соединениями перестают впитывать в себя воду, а их воздухопроницаемость при этом практически не изменяется. Такое действие кремнийорганических соединений обусловлено появлением на

поверхности обработанного материала тончайшей полимерной пленки толщиной $3 \cdot 10^{-6}$ см.

Водоотталкивающие свойства можно придать бумаге введением кремннйорганической жидкости непосредственно в бумажную массу перед изготовлением из нее бумаги (проклейка бумаги). Такая бумага удерживает на поверхности чернильные штрихи без пропускания чернил на оборотную сторону и без растекания их по ее поверхности. Текстильные ткани, пропитанные кремнийорганическими жидкостями, становятся непромокаемыми, к ним не пристают чернила и другие жидкости. Вода на поверхности такой ткани собирается в виде шариков и стекает с нее. Даже струя воды не смачивает обработанную кремнийорганикой ткань.

Широко применяют кремнийорганические жидкости в качестве смазок самого различного назначения. Они обеспечивают длительную работу машин и механизмов как при низкой (до –70°С), так и при высокой (до +260 °С) температуре. Замечательной особенностью кремнийорганических соединений – масел – является постоянство вязкости в широком интервале температур. Испытания кремнийорганических жидкостей на подопытных животных, а затем и на людях показали, что они безвредны. Поэтому кремнийорганические жидкости стали использовать для приготовления кремов, мазей и других косметических препаратов. В литературе имеются указания на возможность использования кремнийорганических жидкостей в качестве растворителей, лекарств, применяемых для внутримышечного вливания, и в качестве среды для стерилизации хирургических инструментов. В последнем случае инструмент во время стерилизации одновременно и смазывается.

Интенсивно расширяется сфера применения кремнийорганических смол, лаков и каучуков. Высокая теплостойкость кремнийорганических смол, устойчивость к действию влаги, кислорода, озона, солнечного света, а также высокие защитные свойства и диэлектрические характеристики

кремнийорганических лаковых пленок обеспечили их широкое применение в хозяйстве. Из каучуков специального назначения большой интерес представляют кремнийорганические каучуки, ставшие незаменимыми во многих областях современной техники. Характерными свойствами, выгодно отличающими полиоргано-силоксановые каучуки от углеводородных, являются термо- и морозостойкость, высокие изоляционные и диэлектрические свойства, химическая стойкость и многие другие.

Кремнийорганические каучуки нашли также применение в качестве термостойких клеев для склеивания стекла, стали, алюминия, латуни и т. п., а также для склеивания каучуков и резин друг с другом. Синтетический кремнийорганический клей при сборке крупных металлических сооружений заменяет заклепки, позволяет обходиться без сварки деталей. В городе Брно (Чехословакия) построен мост, детали которого скреплены с помощью этого клея. В настоящее время разработаны новые виды кремнийорганических каучуков с бензомаслостойкостью, сохраняющие эти свойства как при низких, так и при высоких температурах.

ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ

Этапы промышленного получения монокристаллического кремния

Микроэлектроника использует сегодня десятки полупроводниковых материалов, самым распространенным из которых является кремний.

Si – второй по распространенности элемент после кислорода, и его можно считать одним из основных на земле. В земной коре кремний встречается только в соединениях, важнейшим из которых является оксид кремния (SiO_2). Часто ему сопутствуют кислородные соединения других элементов. Чистота природного SiO_2 составляет 99,8…99,9%. Элементарный Si из SiO_2 (кремнезема) может быть получен в электрической печи с помощью дугового разряда (температура порядка нескольких тысяч градусов) в результате реакции:

$$SiO_2 = Si + O_2$$

Получаемый при этом технический Si содержит 1…2% примесей и используется лишь как исходный материал для получения кремния высокой чистоты (10^{-6} % примеси). Этот процесс получения Si высокой чистоты производится в несколько этапов:

1. Тех. кремний хлорируют при 300-400ºС и превращают его в легколетучие соединения:

$$Si + 3HCl = SiHCl_3 + H_2$$

$$Si + 4HCl = SiCl_4 + 2H_2$$

$SiHCl_3$ – трихлорсилан кремния;

$SiCl_4$ – тетрахлорид кремния.

2. Полученные хлориды очищают.

3. Очищенные хлориды обрабатывают водородом при tºС > 1000ºС (реакции идут в обратную сторону:

$$SiHCl_3 + H_2 = Si + 3HCl$$

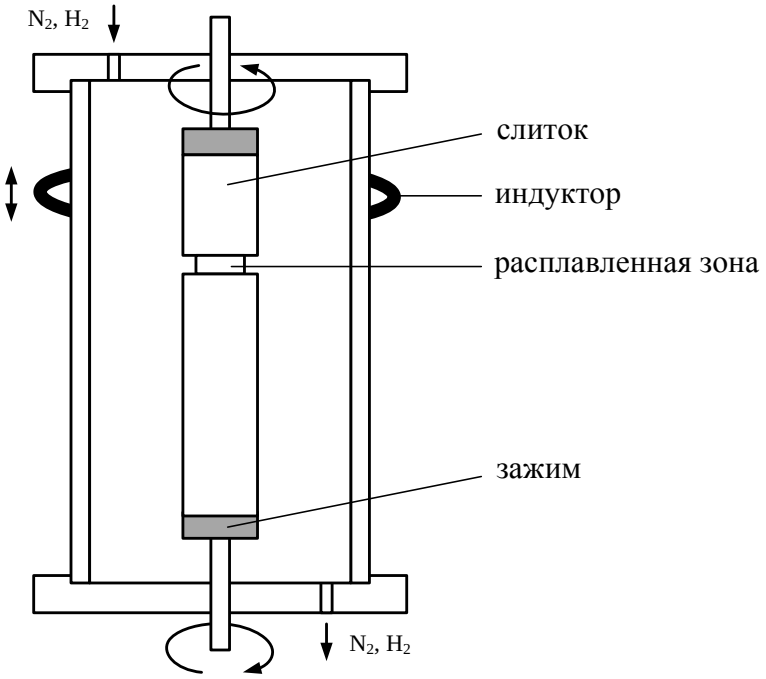
$$SiCl_4 + 2H_2 = Si + 4HCl \ )$$

В результате получается кремний-сырец. На этом химическая очистка кремния заканчивается.

4. Зонная плавка Si-сырца.

Зóнная плáвка (зóнная перекристаллизáция) — метод очистки твёрдых веществ, основанный на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах. Метод является разновидностью направленной кристаллизации, от которой отличается тем, что в каждый момент времени расплавленной является некоторая небольшая часть образца. Такая расплавленная зона передвигается по образцу, что приводит к перераспределению примесей. Если примесь лучше растворяется в жидкой фазе, то она постепенно накапливается в расплавленной зоне, двигаясь вместе с ней. В результате примесь скапливается в одной части исходного образца. По сравнению с направленной кристаллизацией этот метод обладает большей эффективностью. Метод был предложен В. Дж. Пфанном в

1952 году и с тех пор завоевал большую популярность. В настоящее время метод используется для очистки более 1500 веществ.



Слиток, изготовленный сплавлением порошкового кремния-сырца, закрепляется в зажимах, которые могут перемещаться вверх-вниз и вращаться. Чтобы кремний не окислился, рабочую камеру продувают азотом или водородом в течение всего процесса. Затем кремний расплавляют с помощью кольцевого индуктора, перемещаемого сверху-вниз со скоростью 1мм/мин. Плавлению подвергается узкая область слитка. Жидкая зона не растекается и удерживается между твердыми областями за счет сил поверхностного натяжения. Примеси, стремясь остаться в жидкой фазе, из той части слитка, который, охлаждаясь, начинает затвердевать. Многократно повторяя процесс, примеси оттесняют от одного конца слитка к другому, после чего загрязненную часть его отрезают. Для лучшего перемешивания расплава верхнюю и нижнюю части слитка вращают в разные стороны.

В результате получается поликристаллический кремний.

5. Получение монокристалла кремния.

Метод Чохральского — это метод выращивания кристаллов путём вытягивания их вверх от свободной поверхности большого объёма расплава

с инициацией начала кристаллизации путём приведения затравочного кристалла (или нескольких кристаллов) заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава.

Может использоваться для выращивания кристаллов элементов и устойчивых при температурах плавления-кристаллизации химических соединений. Метод наиболее известен применительно к выращиванию монокристаллического кремния.

Жёсткая или гибкая подвеска (зависит от производителя оборудования) с закреплённым на ней затравочным кристаллом необходимой структуры и ориентации опускается вниз, затравочный кристалл приводится в контакт с поверхностью расплава и выдерживается там для прогрева и оплавления зоны контакта. Если зона контакта не была полностью оплавлена до начала роста, то, во-первых, возможно получение кристалла ненадлежащей структуры или ориентации, а также в дальнейшем может произойти разлом по недоплавленному месту и падение слитка в расплав.

Начинается вытягивание затравочного кристалла вверх в холодную зону. В ходе вытягивания сначала формируется цилиндр диаметром в несколько миллиметров — продолжение затравочного кристалла, особенно важное при выращивании бездислокационных кристаллов. Диаметр оттяжки может быть неизменен по длине, хотя некоторые производители делают его ступенчатым. Диаметр финальной части призатравочного цилиндра стараются сделать минимальным (с учётом её прочности на разрыв и имеющихся возможностей по коррекции малого диаметра). Длина цилиндра для кристаллов из различных материалов, при различных требованиях по структуре и ориентации смогут колебаться от нескольких миллиметров до нескольких сотен миллиметров.

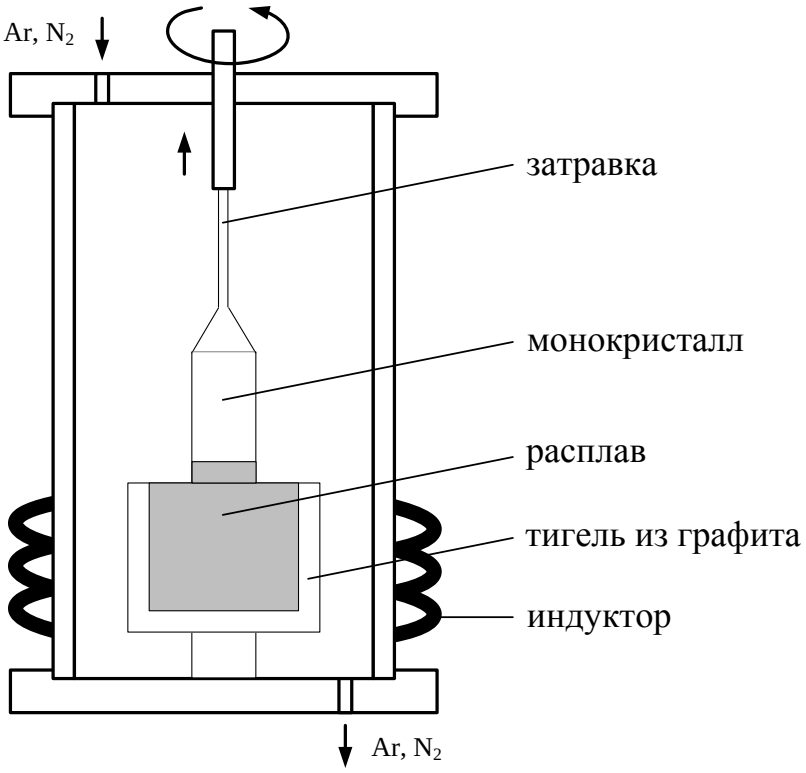
Затем за счёт снижения температуры и скорости вытягивания диаметр призатравочного цилиндра увеличивают до необходимой величины, после чего вытягивают цилиндр максимально возможной длины. При этом предусматривается оставление некоторого запаса расплава для финишных операций процесса роста. В случае вытягивания кристаллов большого веса некоторые производители формируют утолщения в верхней части кристалла, предназначенные для работы поддерживающих устройств. Такие устройства обычно устанавливаются на ростовые установки с жёсткой подвеской затравочного кристалла.

Перед завершением процесса за счёт увеличения температуры расплава и за счёт некоторого увеличения скорости вытягивания диаметр кристалла постепенно уменьшают (длина формируемого конуса для слитков кремния диаметром более 300 мм и более может достигать 2-х диаметров).

После завершения конуса и исчерпания остатков расплава производится отрыв слитка от расплава и постепенное охлаждение слитка до заданной температуры при некоторых условиях.

Все режимные параметры каждого из этапов процесса являются, как правило, ноу-хау конкретного производителя.

http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-2/



Монокристалл Si получают при вытягивании монокристаллического кусочка кремния (затравки) из очищенного и расплавленного кремния. В этот расплав уже добавлены элементы III (V) группы для получения p- (n-)-электропроводности. Затравка закреплена на вращающемся вокруг своей оси стержне и медленно поднимается. Атомы расплава достраивают кристаллическую решетку затравки и формируется монокристалл. При неточном соблюдении технических условий имеют место следующие дефекты монокристалла:

1) Точечные:

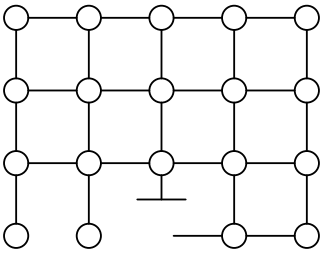
а) вакансия (отсутствие атома в кристаллической решетке);

б) лишний атом в междоузлии;

в) замещенный атом.

2) Линейные дислокации – смещение слоев кристалла относительно друг друга. Такое смещение образуется, если один слой атомов не достроен и образовалась полуплоскость.

http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-2/



3) Винтовые дислокации – объемный дефект – смещение плоскостей (слоев) по винтовой линии.

Дефекты могут перемещаться по кристаллу под воздействием повышенной температуры, эл. поля – это т.н. миграция дефектов, при этом происходит дрейф параметров п/п и соответственно ИС (неуправляемое изменение свойств полупроводника).