

### 1.3. ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

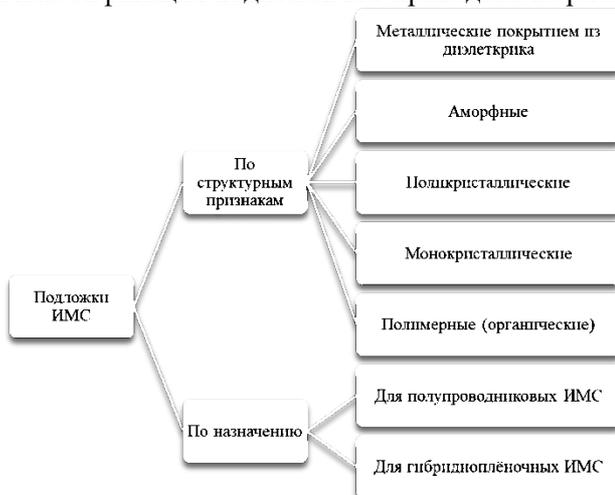
**Цель лекции:** изучение видов подложек для интегральных схем.

#### 1.3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДЛОЖЕК ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Подложки в интегральных микросхемах выполняют 2 основные функции:

- являются несущим элементом конструкции, обеспечивающим механическую прочность ИС в корпусном и бескорпусном исполнении;
- является элементом структуры ИС, на котором в приповерхностном слое или на поверхности формируется топология.

Общая классификация подложек ИС приведена на рис. 1.3.1.



**Рис. 1.3.1.** Классификация подложек ИС

Кремниевые подложки, которые в настоящее время чаще всего используются для производства ИС – монокристаллические, для полупроводниковых микросхем. Остальные группы подложек используются для ГИС.

#### 1.3.2. КРЕМНИЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Пригодность подложек полупроводниковых материалов для изготовления ИС определяется параметрами, зависящими от его (т. е.

полупроводникового материала) физических, оптических, термических, термоэлектрических свойств, а также зонной структуры, ширины запрещенной зоны, положения в ней примесных уровней.

При выборе материала учитываются его следующие физические свойства.

Физические свойства:

- термические;
- термоэлектрические;
- зонная структура;
- ширина запрещенной зоны;
- положение примесных уровней.

Кроме того, очень важны электрические свойства подложек:

- тип электропроводности;
- удельное сопротивление;
- концентрация носителей заряда;
- подвижность носителей;
- время жизни неосновных носителей заряда и их диффузионная длина.

Все эти параметры сильно зависят от метода получения полупроводникового материала.

В настоящее время из всех полупроводниковых материалов, применяемых для производства объектов приборостроения, наибольшее распространение получил *кремний* (см. рис. 1.3.2). По сравнению с германием он обладает лучшими термическими свойствами; кроме того, он гораздо дешевле.



**Рис. 1.3.2.** Поликристаллический кремний (чистота 99,9%)

Источник: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SiliconCroda.jpg>

## СПРАВКА

Кремний – элемент IV группы таблицы Менделеева.

Кремний наиболее распространен в земной коре – 29,5%. В природе встречается в виде окислов и солей кремниевой кислоты.

Кварц содержит 99,99% кремния. Чистый песок – 99,8–99,9%.

Изотопический состав:

- ◆ Si ат. вес 28–92,2%;
- ◆ Si ат. вес 29 – 4,68%;
- ◆ Si ат. вес 30 – 3,05%.

Остальные изотопы кремния радиоактивны.

Плотность – 2,32 г/см<sup>3</sup>.  $T_{пл}$  – 1412°C. Ширина запрещенной зоны – 1,09 эВ (при 300°C).

Подвижность носителей в чистом кремнии:

- ◆ электронов – 1450 см<sup>2</sup>/В·с;
- ◆ дырок – 480 см<sup>2</sup>/В·с.

В зависимости от предназначения различают:

1. Кремний электронного качества (т. н. «электронный кремний») — наиболее качественный кремний с содержанием кремния свыше 99,999 % по весу, удельное электрическое сопротивление кремния электронного качества может находиться в интервале примерно от 0,001 до 150 Ом·см, но при этом величина сопротивления должна быть обеспечена исключительно заданной примесью т. е. попадание в кристалл других примесей, хотя бы и обеспечивающих заданное удельное электрическое сопротивление, как правило, недопустимо.

2. Кремний солнечного качества (т. н. «солнечный кремний») — материал с содержанием кремния свыше 99,99 % по весу, используемый для производства фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей).

3. Технический кремний — блоки кремния поликристаллической структуры, полученного методом карботермического восстановления из чистого кварцевого песка; содержит 98 % кремния, основная примесь — углерод, отличается высоким содержанием легирующих элементов — бора, фосфора, алюминия; в основном используется для получения поликристаллического кремния.

По сравнению с германием, кремний обладает:

- ◆ более широкой запрещенной зоной – поэтому ИС, разработанные на его основе, работают в большем температурном диапазоне;
- ◆ меньшими токами утечки;
- ◆ большими рабочими напряжениями.

Кроме того, на поверхности кремния можно достаточно легко получить оксид SiO<sub>2</sub>. Он не растворяется в воде и обладает маскирующими свойствами, т. е. разными скоростями диффузии в Si и SiO<sub>2</sub> для основных

легирующих примесей. На этом физическом принципе основана планарная технология изготовления полупроводниковых ИС.

### 1.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КРЕМНИЯ

Полупроводниковый кремний получают по следующей технологии:

- получения технического кремния из кварцевого песка;
- технический кремний растворяют в летучей жидкости и получают летучее соединение кремния (легковосстановимое);
- проводится очистка соединения химическими и физико-химическими методами;
- далее кремний восстанавливается из летучего соединения цинком;
- поскольку достигаемая степень чистоты недостаточна, то проводится конечная очистка кремния;
- далее проводится выращивание монокристаллического кремния методом Чохральского.

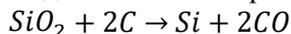
В настоящее время разработаны промышленные технологии получения Si с содержанием примесей на уровне  $10^{12}$ – $10^{13}$  ат./см<sup>3</sup>.

#### Получение кремния из кварцевого песка

Исходным сырьем для получения технического кремния является кварцевый песок, представляющий собой диоксид кремния ( $SiO_2$ ).

Технический кремний получают восстановлением  $SiO_2$  в электрической дуге между графитовыми электродами с использованием кокса (рис. 1.3.3).

Исходное сырье – диоксид кремния и кокс поступают в электродуговую печь, где при нагреве происходит химическая реакция:



Процесс получения металлургического кремния похож на выплавку чугуна из железной руды. Полученный кремний охлаждается и дробится на куски.

Полученный материал содержит 2-5% примеси и не является полупроводником. Он служит исходным сырьем для получения полупроводникового кремния высокой чистоты (с содержанием примесей менее  $10^{-6}\%$ ).

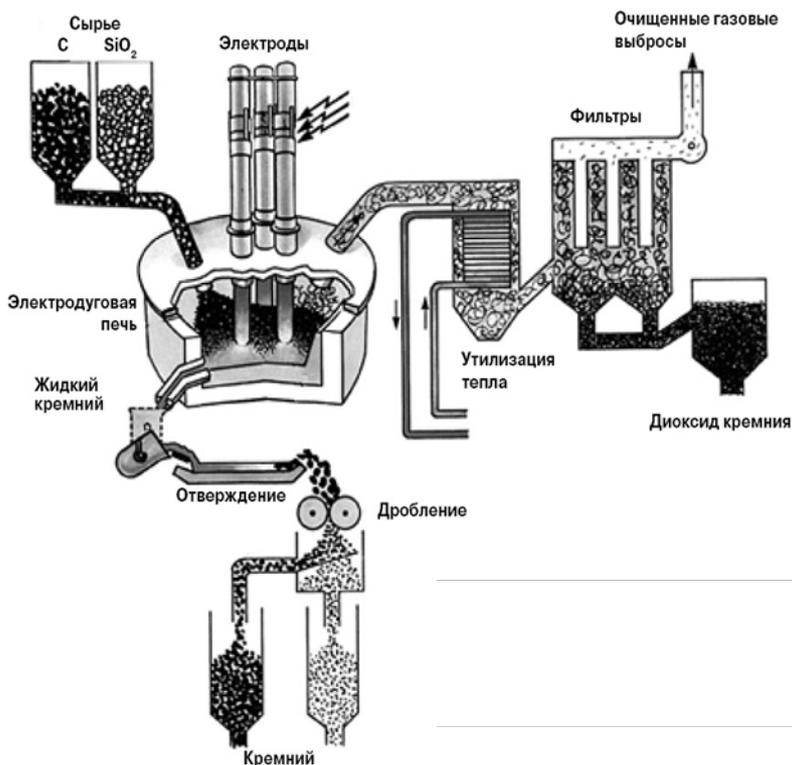
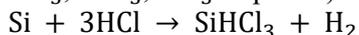
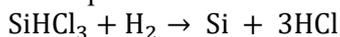


Рис. 1.3.3. Схема установки восстановления кремния

Для получения кремния, так называемой, электронной чистоты производят очистку через силаны. Сущность метода представлена следующими химическими реакциями. На первом этапе при температуре 300°C осуществляют химическую реакцию металлургического кремния, содержащего примеси (FeCl<sub>3</sub>, AlCl<sub>3</sub>, BCl<sub>3</sub> и прочие) с соляной кислотой:



Концентрация электрически активных примесей жидком трихлорсилане SiHCl<sub>3</sub>, таких как Al, P, B, Fe, Cu или Au, составляет меньше одного атома на миллиард атомов кремния. На втором этапе при температуре 650–1300°C осуществляют восстановление кремния:



В результате чего получают химически чистый кремний. Он служит сырьем для выращивания монокристаллического кремния. В основном это делается с помощью метода Чохральского.

## Очистка полупроводников методом зонной плавки

Зонная плавка — метод очистки твёрдых веществ, основанный на различной растворимости примесей в твёрдой и жидкой фазах. Сущность метода заключается в нагреве ограниченной зоны вытянутого образца и последующим ее перемещением с одного конца образца на другой.

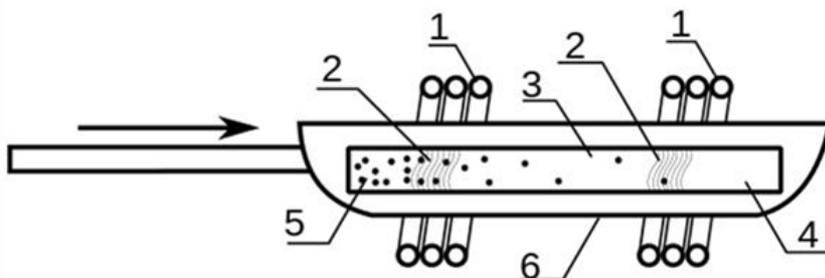
Такая расплавленная зона передвигается по образцу, что приводит к перераспределению примесей.

Метод был предложен Уильямом Гарднером Пфанном в 1952 году и с тех пор завоевал большую популярность. В настоящее время метод используется для очистки более 1500 веществ.

### Метод зонной плавки в тигле

Очищаемое вещество помещают в лодочку (тигель) из тугоплавкого материала (рис.1.3.4). Основные требования к материалу лодочки:

- высокая температура плавления;
- материал лодочки не должен растворяться в очищаемом веществе или реагировать с ним.



**Рис. 1.3.4.** Схема устройства для зонной плавки

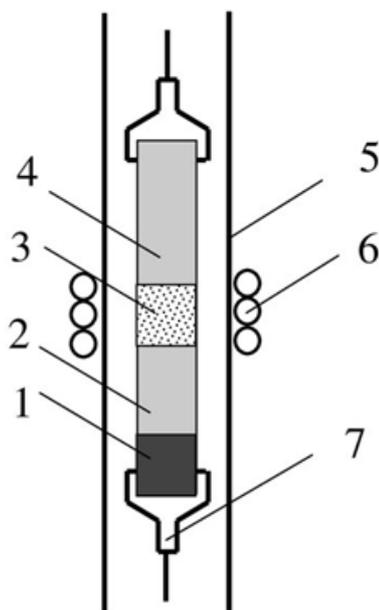
1 — индукционные катушки; 2 — расплавленные зоны; 3 — очищенный полупроводник; 4 — сверхчистый полупроводник; 5 — полупроводник с повышенным содержанием примесей; 6 — графитовая лодочка (тигель)

Лодочку помещают в горизонтальную трубу, у которой один конец может быть запаян или через него подают инертный газ. Если он запаян, то другой конец трубы соединён с вакуумной установкой. Один конец образца расплавляется, затем расплавленная зона начинает двигаться вдоль слитка. Ее длина зависит от длины слитка и составляет несколько сантиметров. Вещество плавится либо индукционными токами, либо теплопередачей в печи сопротивления. Скорость движения составляет, как правило, от

нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в час. Движение может осуществляться либо за счет вытягивания лодочки через неподвижную печь, либо смещением зоны нагрева. Иногда для повышения эффективности увеличивают число проходов зоны или число зон.

Метод обладает рядом недостатков. Основной недостаток — невозможность масштабирования, так как скорость процесса определяется скоростью диффузии примеси. Поэтому метод применяется для конечной стадии очистки при получении особо чистых веществ.

Если расплав вступает в реакцию с материалом тигля (лодочки), или очищаемое вещество имеет высокую температуру плавления ( $>1500\text{ C}$ ), применяют бестигельную зонную плавку. В данном методе стержень из поликристаллического полупроводника удерживается в вертикальном положении и вращается, в то время как расплавленная зона (высотой от 1 до 2 см) медленно проходит от нижней части стержня до его верха, как показано на рис. 1.3.5.



**Рис. 1.3.5.** Схема метода бестигельной зонной плавки

1 – затравка, 2 – кристалл, 3- расплавленная зона, 4 – исходный материал, 5 – стенки герметичной камеры, 6 – индуктор, 7 - кристаллодержатель

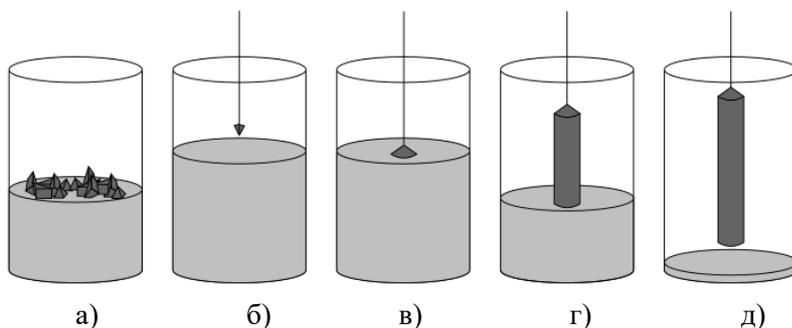
Основными недостатками бестигельной зонной плавки являются трудность управления величинами температурных градиентов вблизи

фронта кристаллизации и трудность управления распределением температур вдоль слитка, что ведет к относительно высокой концентрации собственных дефектов получаемых кристаллов.

### Метод Чохральского

Польский химик Чохральский открыл свой метод в 1916 году и изложил суть своего открытия в статье «Новый метод измерения степени кристаллизации металлов», опубликованной в немецком журнале «Zeitschrift für Physikalische Chemie» (1918).

В 1950 сотрудники американской корпорации Bell Labs Гордон Тил и Джон Литтл использовали метод Чохральского для выращивания монокристаллов германия (рис. 1.3.5).



**Рис. 1.3.6.** Схема метода Чохральского

а – плавление поликристаллического легированного кремния, б – введение затравки, в – начало выращивания кристалла, г – вытягивание кристалла, д – выращенный монокристалл и остаток расплава

Источник: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Czochralski\\_Process-ru.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Czochralski_Process-ru.svg)

Сырьем служит необоженный поликремний, который закладывается в тигель из тугоплавкого материала (рис. 1.3.7). Расплавленный кремний обладает высокой химической активностью, поэтому подбор для него контейнерного и тигельного материалов вызывает определенные трудности. Наиболее чистые материалы, из которых изготовляют тигли (кварц и графит), при высоких температурах взаимодействуют с кремнием. Отсутствие прямого контакта растущего монокристалла с тиглем и возможность изменения его геометрической формы позволяют получать практически бездислокационные монокристаллы.

Далее поликремний нагревается до температуры 1420 °С в специальной герметичной печи, очищенной от воздуха и заполненной инертным газом – аргоном (рис. 1.3.5 а). Расплавленный кремний раскручивается в тигле, а в него погружается, охлаждаемый холодильником, затравочный кристалл кремния, размером и формой напоминающий карандаш (рис. 1.3.5 б). В

начале процесса роста монокристалла часть затравочного монокристалла расплавляется для устранения в нем участков с повышенной плотностью механических напряжений и дефектами. Пока расплавленный монокристаллический кремний остывает, затравочный кристалл, вращая в противоположном направлении, медленно извлекают, увлекая за собой монокристалл полупроводникового материала (рис. 1.3.5 в и г). Расплав смачивает затравку и удерживается на ней силами поверхностного натяжения. Скорость роста кристалла составляет до 80 мм/ч. В результате получается сплошной кремниевый кристалл нужной длины и диаметром (рис. 1.3.8).



Рис. 1.3.7. Необожженный поликристаллический кремний в тигле

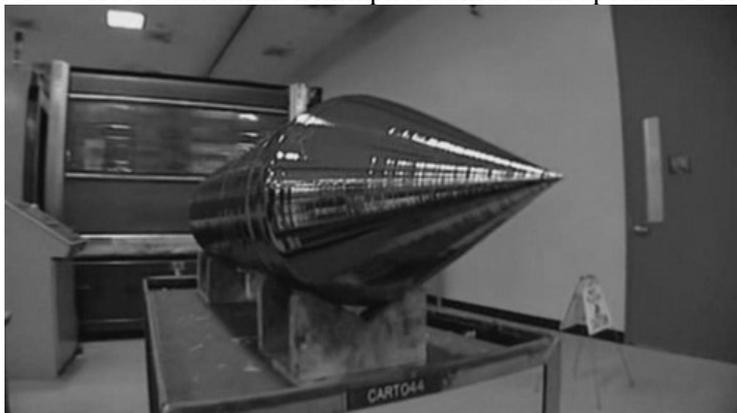


Рис. 1.3.8. Выращенный кристалл

Монокристалл после охлаждения калибруют по диаметру до заданного размера (300 мм) с точностью  $\pm 1$  мм.

Затем проводится травление его поверхности на глубину 0.3 - 0.5 мм и ориентация по заданному кристаллографическому направлению, чтобы получить после резки пластины, ориентированные строго в заданной плоскости. Для кремния она проводится обычно по оси  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  (рис. 1.3.9). Правильная ориентация пластин обеспечивает высокую воспроизводимость электрофизических параметров создаваемых на пластине микросхем.

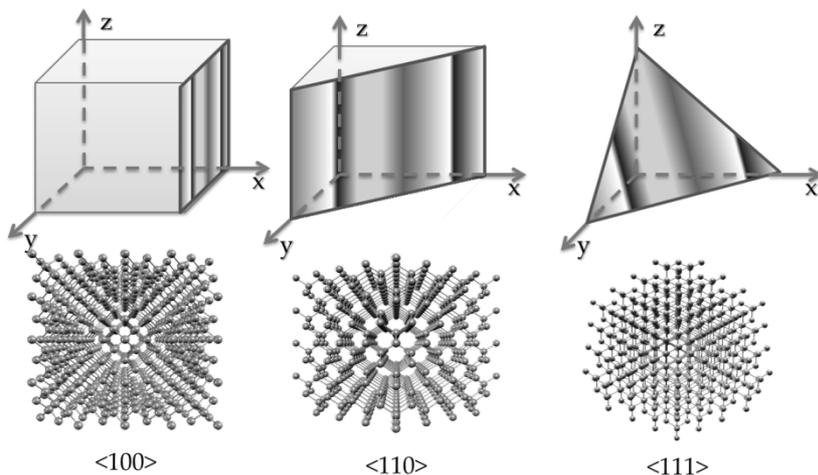


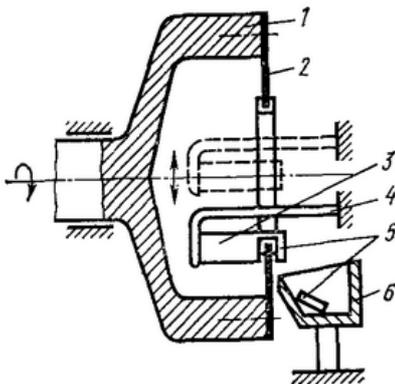
Рис. 1.3.9. Типы ориентации кристалла (индексы Миллера)

### Резка монокристаллических слитков

Существует два основных способа резки слитка на пластины: диском с режущей внутренней кромкой и проволокой с применением абразива.

Сущность метода резки алмазным диском с внутренней режущей кромкой состоит в следующем. На шпиндель станка (рис. 1.3.10) крепят алмазный диск и с помощью специальных растягивающих болтов регулируют его радиальное натяжение. Внутри полого шпинделя помещают держатель с приклеенным к нему полупроводниковым слитком. Перед началом резки весь слиток находится внутри шпинделя, а торцовая его часть немного выступает за кромку плоскости алмазного диска. При включении станка шпиндель с закрепленным на нем алмазным диском начинает вращаться. Если держатель со слитком перемещать в горизонтальном (или вертикальном) направлении, то в определенный момент слиток коснется своей боковой поверхностью кромки алмазного диска и начинается процесс

резки. При полном отрезании пластины от слитка держатель отводится в исходное первоначальное положение и выдвигается из шпинделя на длину, равную толщине отрезаемой пластины. После этого процесс повторяется.



**Рис. 1.3.10.** Схема резки слитка диском с внутренней режущей кромкой

1 – шпиндель, 2 – диск с алмазной кромкой, 3 – слиток, 4 – держатель слитка, 5 – отрезанная пластина, 6 – сборник пластин

Режим резки выбирают, исходя из конкретных условий: вида полупроводникового материала, диаметра, толщины отрезаемой пластины, требований по классу и чистоте обработки, точности геометрических размеров и требований по плоскостности и плоскопараллельности пластины. На процесс резки существенное влияние оказывает скорость подачи слитка (сила прижатия к алмазному диску). При малых скоростях подачи слитка производительность резки слишком мала. С увеличением скорости подачи производительность повышается, а точность обработки снижается за счет прогибания диска. Отрезаемая пластина будет иметь искривленную поверхность. При малой толщине пластины это может привести к ее разлому в процессе резки (более низкая скорость подачи для тонких и более высокая – для толстых пластин). На скорость подачи существенное влияние оказывает твердость обрабатываемого материала.

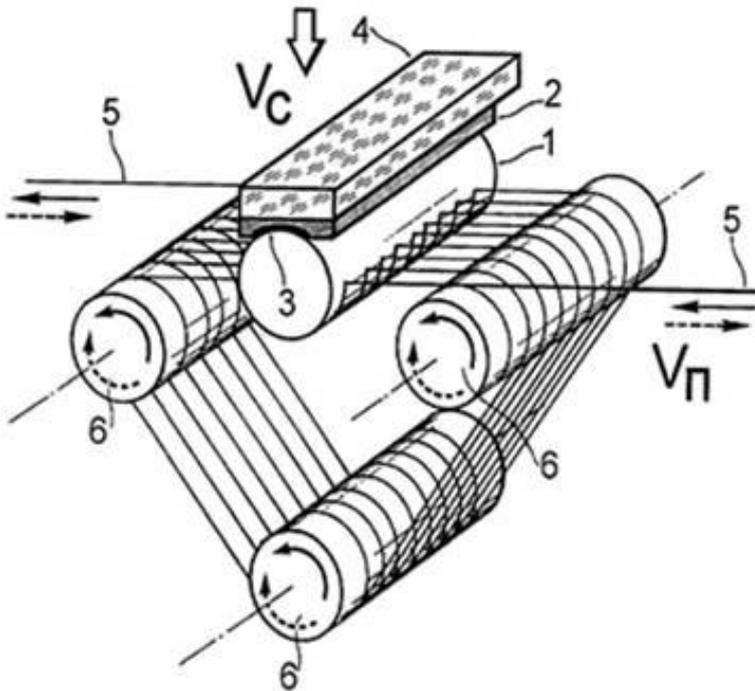
Качество процесса резки в сильной степени зависит от применяемой охлаждающей жидкости и ее расхода (2-4 л/мин). Процесс изнашивания рабочей поверхности алмазного диска характеризуется тремя периодами: выкрашивание из связки отдельных непрочно закрепленных алмазных зерен; округление вершин и расщепление алмазных зерен, а также частичное скалывание отдельных зерен по плоскости спайности; увеличение усталостных явлений в основе диска, зерне, связке. Тепловые явления, возникающие при резке слитка на пластины, оказывают существенное влияние на качество резки – увеличивается толщина нарушенного слоя, создаются остаточные напряжения и микронеровности, структурные

изменения поверхности полупроводникового материала и алмазного диска.

Резка проволокой (рис.1.3.11) с применением абразива получила в настоящее время наибольшее распространение. Резка происходит по принципу перематки проволоки с одного ролика на другой с большой скоростью. Разрезаемый слиток подводят к движущейся проволоке до соприкосновения и устанавливают определенную скорость подачи слитка. В процессе перематки происходит резка пластин на кристаллы.

На проволоку непрерывно подается абразивная суспензия. Взаимодействие абразивных зерен с полупроводниковым материалом приводит к появлению микротрещин и выколок в последнем и послойному удалению обрабатываемого материала.

При малых скоростях подачи полупроводникового материала происходит незначительное его разрушение. Для резки полупроводниковых слитков обычно используют проволоку из вольфрама, стали, никеля, нихрома. Диаметр проволоки 0.05 - 0.15 мм, ширина реза равна 0.08 - 0.2 мм.



**Рис. 1.3.11.** Схема резки слитка проволокой

1 – слиток, 2 – держатель, 3 – место приклейки слитка к держателю, 4 – станина, 5 – проволока, 6 – ролики

Характеристики получаемых кремниевых подложек приведены в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1.

Геометрические характеристики кремниевых подложек

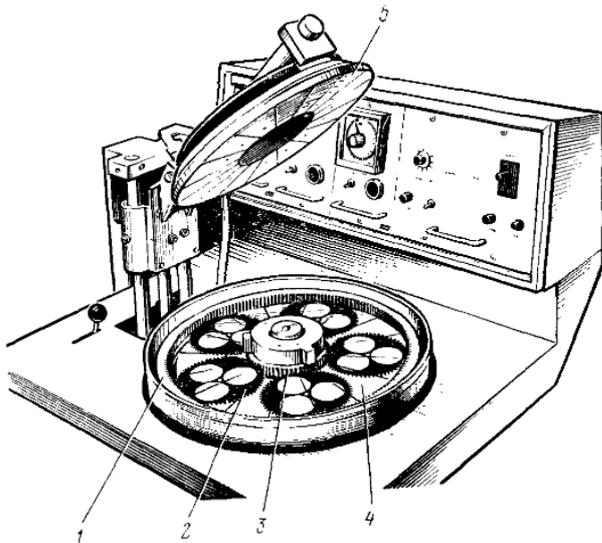
|                 |     |     |     |           |
|-----------------|-----|-----|-----|-----------|
| Диаметр,<br>мм  | 100 | 150 | 200 | 300       |
| Толщина,<br>мкм | 300 | 500 | 650 | 800...900 |

### **Механическая шлифовка и полировка полупроводниковых пластин**

Под процессом шлифовки понимают обработку полупроводниковых пластин на твердых шлифовальных дисках абразивными микропорошками. По технологическим признакам шлифовку подразделяют на предварительную (с более крупным порошком) и окончательную (с более мелким порошком). Предварительная шлифовка проводится для того, чтобы быстро выровнять плоскости пластин и удалить припуск. Окончательную шлифовку проводят для дальнейшего улучшения геометрических параметров и качества поверхности обрабатываемых пластин. Утонение пластин также производится шлифовкой.

Шлифовка и полировка пластин производится на плоскошлифовальных прецизионных станках (рис.1.3.12) с использованием абразивных материалов с размером зерна около 40 мкм (микропорошки). Чаще всего применяют группы микропорошков с зёрнами 14 мкм и меньше. Микропорошки изготавливаются из карбидов бора, кремния, электрокорунда и алмаза.

Привод станка осуществляется от электродвигателя через систему шестерен. Верхний шлифовальный диск 5 закреплен на поднимающейся крышке. Из дозатора через отверстия в верхнем шлифовальнике в зону обработки подается абразивная суспензия. Обрабатываемые пластины помещают в круглые отверстия сепаратора 4, выполненные с наружным зубчатым венцом. Шлифовальники изготавливают из достаточно твердых материалов (сталь, чугун, стекло, керамика, твердосплавы). Отверстия в сепараторах делают на 0,2– 0,5 мм больше диаметра пластин. Уменьшение зазора приводит к плотному заполнению абразивом и продуктами шлифования, и затруднению вращения пластин внутри сепараторов, увеличение зазора способствует ударам пластин о кромки сепараторов и их разрушению. Толщина сепараторов на 10–15 мкм тоньше обработанной пластины.



**Рис. 1.3.12.** Схема шлифовального станка

1 – зубчатое колесо, 2 – сепаратор, 3 – центральная шестерня, 4 - нижний шлифовальник, 5- верхний шлифовальник

### **Механическая полировка пластин**

Для улучшения качества поверхности полупроводниковых пластин и уменьшения глубины механически нарушенного слоя проводят процесс полировки, который осуществляется на аналогичных станках, что и шлифовка. Процесс полировки проводят при помощи полировальных дисков, обтянутых мягким материалом. В качестве абразива используют микропорошки синтетического алмаза, оксида алюминия, оксида хрома, диоксида кремния более мелких фракций.

### **1.3.4. Подложки для пленочных и гибридных ИС**

К материалам подложек для пленочных и гибридных ИС предъявляются следующие требования:

- высокое удельное электрическое сопротивление изоляции;
- низкая диэлектрическая проницаемость и малый тангенс угла диэлектрических потерь;
- высокая электрическая прочность для обеспечения качественной изоляции;
- высокая механическая прочность в малых толщинах,

обеспечивающая целостность подложки при изготовлении и эксплуатации;

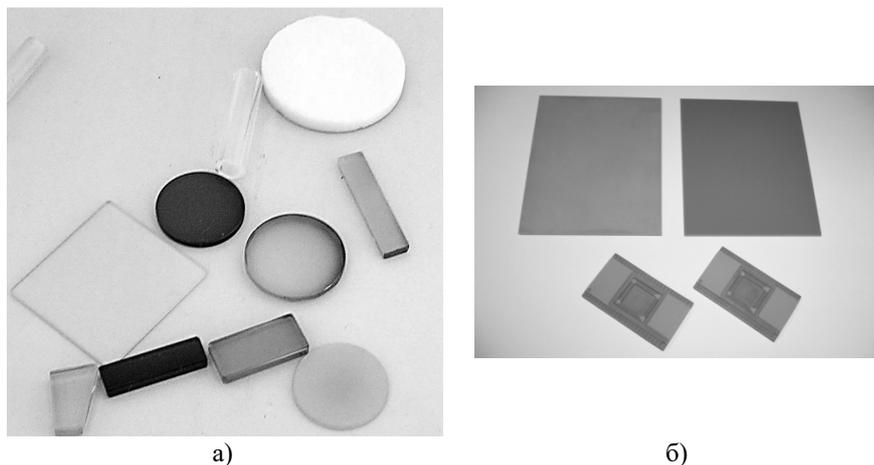
- высокий коэффициент теплопроводности для обеспечения нормального теплового режима;
- высокая физическая и химическая стойкость к воздействию высокой температуры в процессе нанесения тонких пленок, термообработке при формировании толстых пленок;
- стойкость к воздействию химических реактивов при электрохимических и химических методах обработки при формировании элементов;
- минимальное газовыделение в вакууме во избежание загрязнения пленок;
- Способность к хорошей механической обработке (полированию, резке, шлифованию);
- температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) по возможности близкий к ТКЛР материалов напыляемых пленок, чтобы не было механических напряжений;
- высокая химическая инертность к осаждаемым материалам.

Отдельные требования предъявляются к качеству поверхностей подложек. Для тонкопленочной технологии используется 14 класс чистоты поверхности, допустимая высота микронеровностей 25 нм. Для толстопленочной технологии используется 8 класс чистоты поверхностей, допустимая высота микронеровностей 2 мкм.

Для подложек могут использоваться следующие материалы:

- стекло;
- керамика;
- поликор;
- ситалл;

Стекланные подложки (рис. 1.3.13) относятся к группе аморфных. Для их производства могут использоваться боросиликатные и алюмосиликатные сорта. Главные достоинства подобных подложек – низкая шероховатость, кроме того, подложки легко полируются. К недостаткам можно отнести малую теплопроводность и невысокую механическую прочность.



**Рис. 1.3.13.** Подложки: (а) стеклянные, (б) керамические

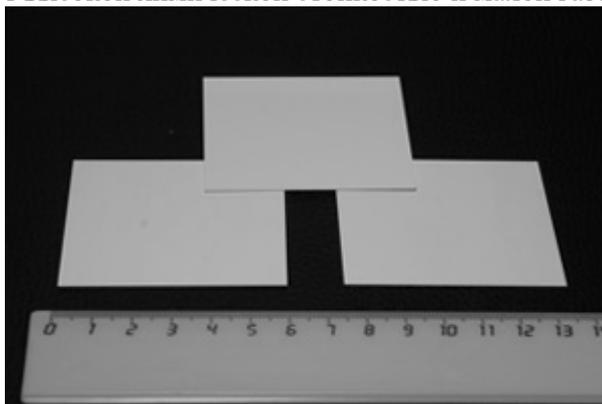
Керамические подложки (рис. 1.3.13) обладают высокой теплопроводностью, но и значительной шероховатостью. Из-за данного недостатка они используются для толстопленочных ИС. Используют или бериллиевую или корундовую керамику (на основе окиси алюминия  $Al_2O_3$ ). Корундовая керамика обладает более высокой прочностью, стабильностью электрических и физических характеристик, но у нее ниже теплопроводность, чем у бериллиевой.

Одной из разновидностей корундовой керамики является поликор (за рубежом люкалос, рис. 1.3.14). Беспористый прозрачный поликор содержит 99,7...99,9%  $Al_2O_3$  и 0,3...0,2% окиси магния. В отличие от обычной корундовой керамики он прозрачен.



**Рис. 1.3.14.** Подложка из поликарбоната

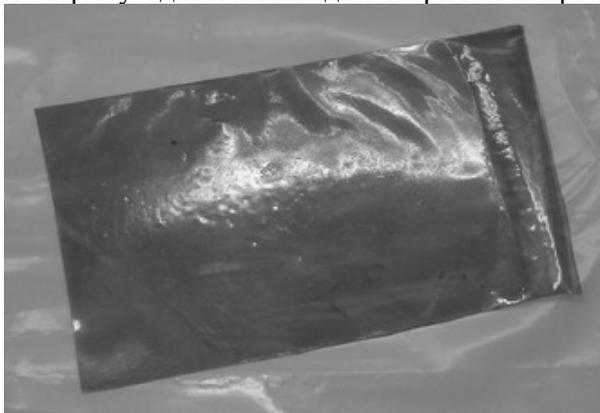
Для тонкопленочной технологии одним из самых распространенных материалов является ситалл (рис. 1.3.15), представляющий собой стеклокерамический материал, получаемый термообработкой (кристаллизацией) стекла. К его достоинствам можно отнести хорошую обрабатываемость: можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом. Он прочнее стекла, выдерживает температуры до 700 °С и обладает высокой химической стойкостью и малой газоотдачей.



**Рис. 1.3.15.** Подложки из ситалла

Еще одним распространенным материалом подложек является полиимид. Это полимерный материал, подложки из полиимида представляют собой гибкая плёнка толщиной 40 ... 50 мкм (рис. 1.3.16). Он допускают

двухстороннюю обработку и нанесение пленок в вакууме, фототравление отверстий под переходы. Главные достоинства полиимидных подложек – гибкость, прочность, малые толщина и вес. Недостатком подобных подложек является термоусадка и низкая диэлектрическая проницаемость.



**Рис. 1.3.16.** Полиимидная пленка

Еще одной разновидностью подложек для пленочных и гибридных ИС являются металлические (рис. 1.3.17).



**Рис. 1.3.17.** Металлические подложки

Они изготавливаются из двух материалов: анодированного алюминия (толщина диэлектрического слоя 40...60 мкм) или из стали, покрытой диэлектрическим покрытием из полиимидного лака, эмали, стекла. Их главными достоинствами являются хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность. Кроме того, металл можно использовать как шину питания или земли.

**ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 3**

|          |   |
|----------|---|
| Вопрос 1 | Основным методом получения чистого кремния является |
| Ответы:  |   |
| 1        | Метод Чохральского                                  |
| 2        | Метод Герца   |
| 3        | Метод Ньютона                                       |
| Вопрос 2 | Чистый кремний получается из:                       |
| Ответы:  |   |
| 1        | кварцевого песка                                    |
| 2        | графита   |
| 3        | мрамора   |