

## 1.4. Выращивание кристаллов из газообразной фазы.

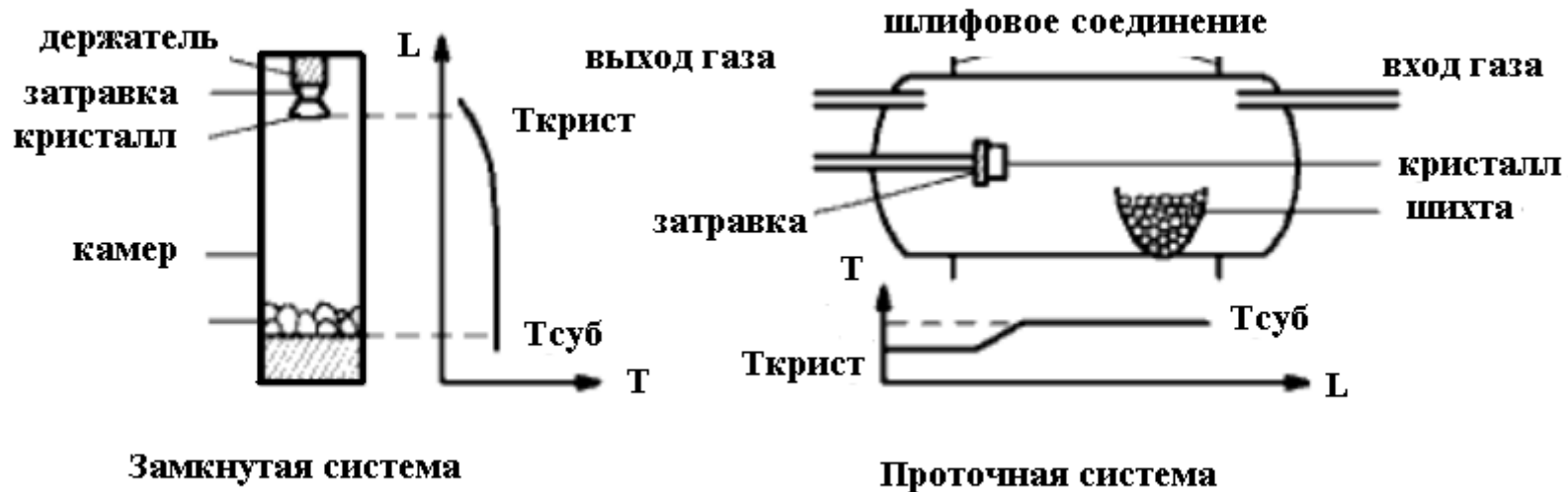
Выращивание кристаллов из газовой фазы может осуществляться с помощью следующих процессов:

- сублимации-конденсации,
- химического транспорта (реакций переноса),
- химических реакций (разложения или восстановления газообразных химических соединений).

## Метод сублимации – конденсации

Применяется для выращивания **конгруэнтно испаряющихся** полупроводниковых соединений ( $\text{CdS}$ ,  $\text{CdSe}$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{PbS}$  и др.), имеющих достаточно **высокое значение давления паров**  $\sim 1$  мм рт.ст.

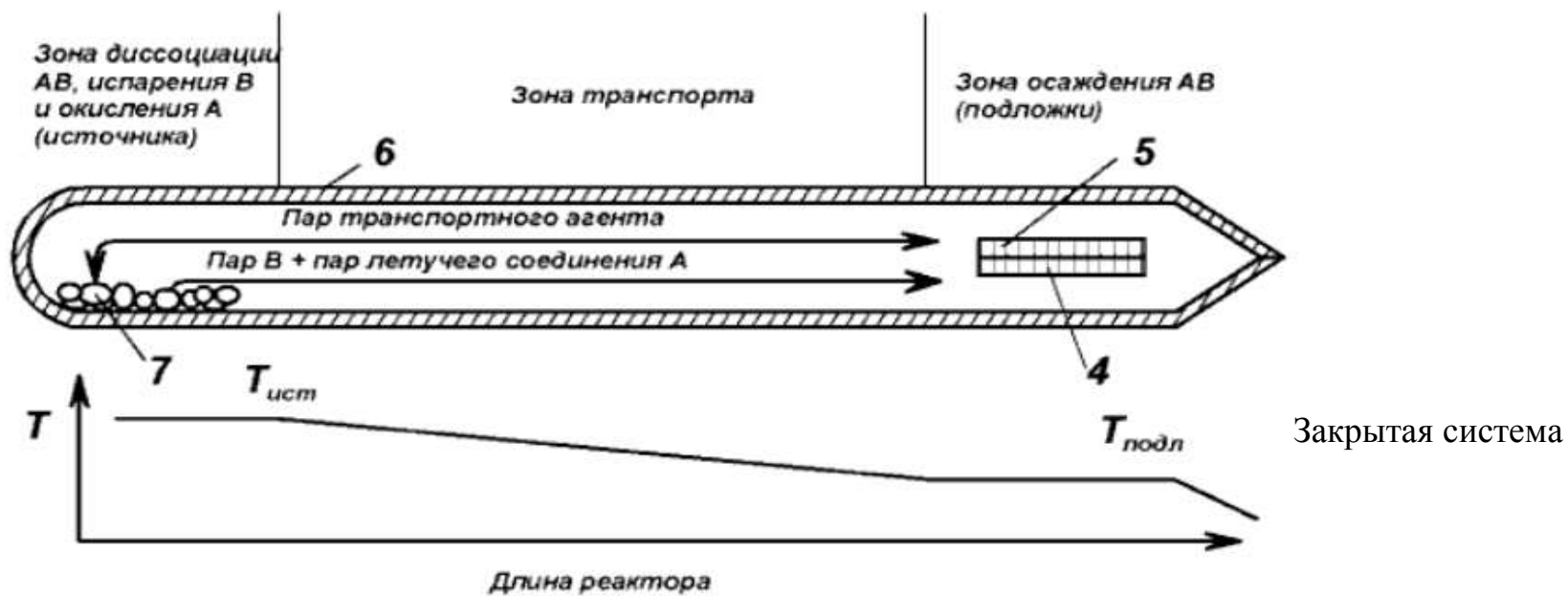
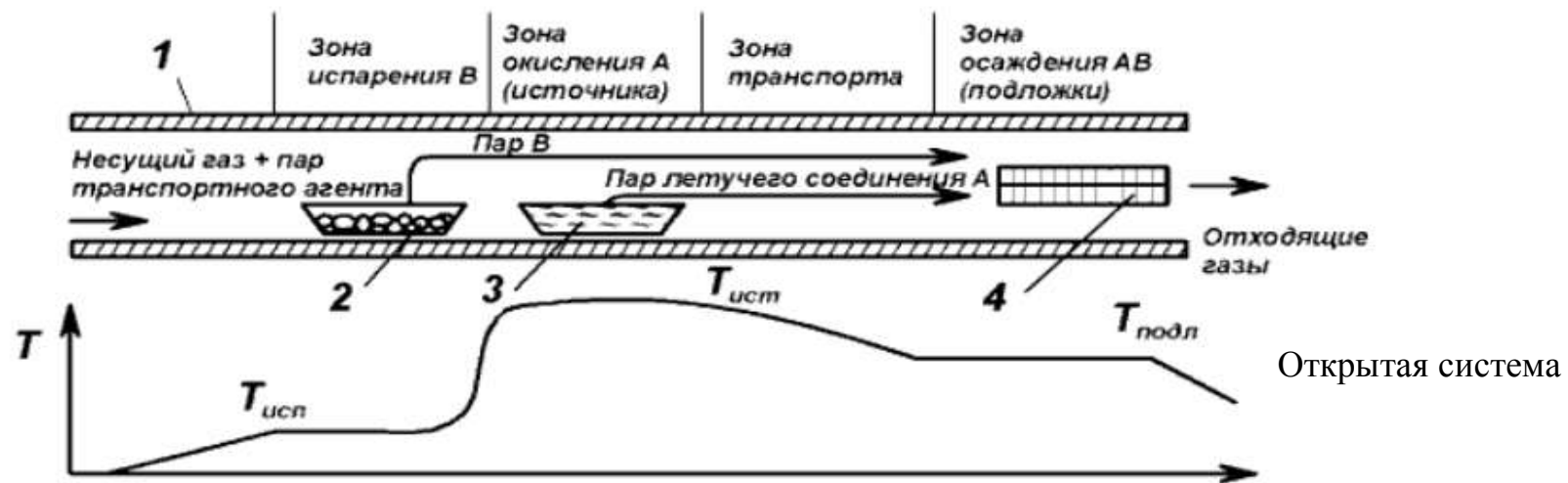
Выращивание кристаллов проводят в **замкнутых** или **проточных** системах, в вертикальной или горизонтальной модификации, с или без затравки.



## Метод химического транспорта

В основе метода лежат химические реакции. Рост кристаллов происходит в результате реакций разложения газообразных молекул (пример  $\text{GeI}_4 = \text{Ge} + 2\text{I}_2$ ).

Сущность метода заключается в следующем: при взаимодействии газообразного реагента ( $\text{I}_2$ ) с твердым нелетучим веществом ( $\text{Ge}$ ) при определенных значениях температуры и давлении паров могут образовываться разные по составу летучие соединения. При неизменных условиях – наступает равновесное состояние. Если изменить температуру системы, то состояния равновесия нарушиться и состав компонент измениться. Таким образом, выбирая условия, при которых в области источника идет реакция образования летучего соединения ( $\text{GeI}_4$ ), а в области кристаллизации – его разложение с выделением твердой фазы ( $\text{Ge}$ ).



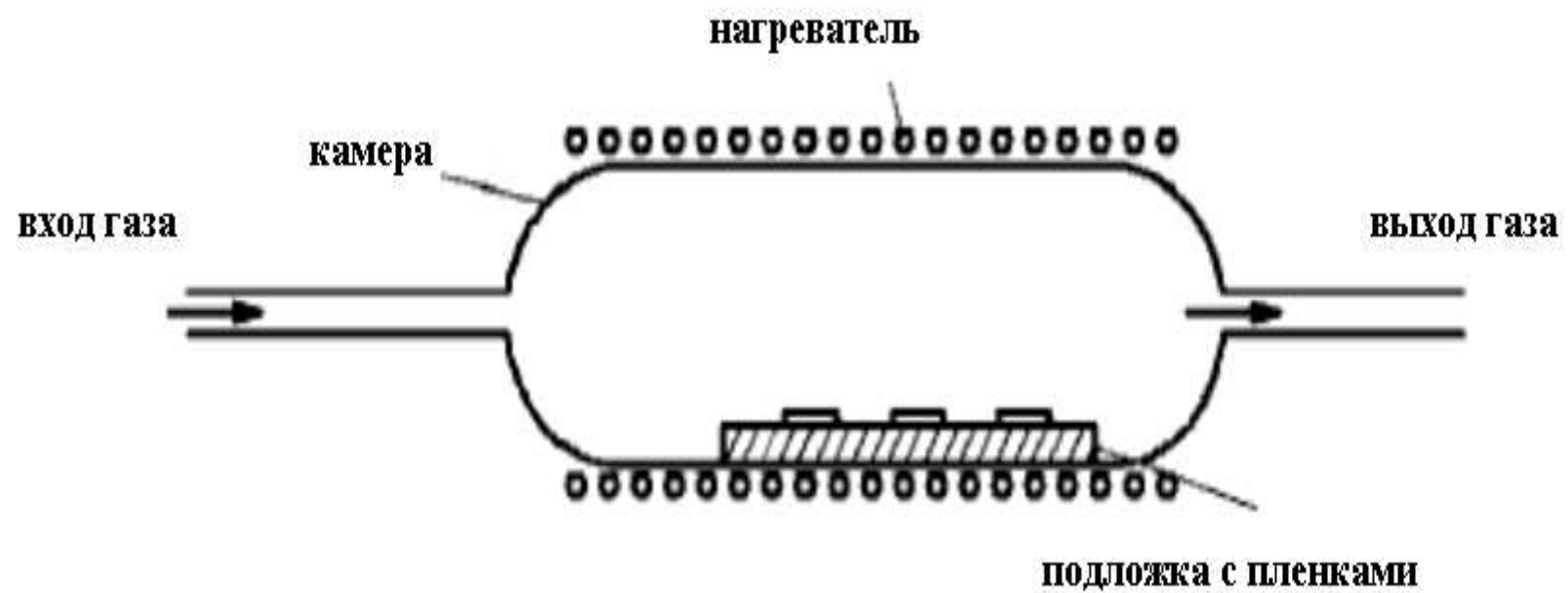
## Метод химических реакций

Источник состоит из газообразных молекул сложного состава, содержащих атомы кристаллизирующегося вещества. Источником материала для роста кристалла служат легколетучие химические соединения, которые подаются в реакционную камеру. Эти соединения подвергаются термической диссоциации или восстановлению на поверхности роста (примеры:  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si} + 4\text{HCl}$  – реакция восстановления,  $\text{SiH}_4 = \text{Si} + 2\text{H}_2$  – термическая диссоциация).

Процессы кристаллизации происходят в 2 последовательные стадии:

1. выделения вещества на поверхности роста в результате химической реакции;
2. встраивание атомов в решетку кристалла.

Используются только проточные системы!



## **1.5. Легирование кристаллов в процессе выращивания.**

Возможны следующие способы легирования:

- Легирование уже выращенных кристаллов
- Легирование кристаллов в процессе выращивания из жидкой фазы
- Легирование кристаллов в процессе выращивания из газовой фазы

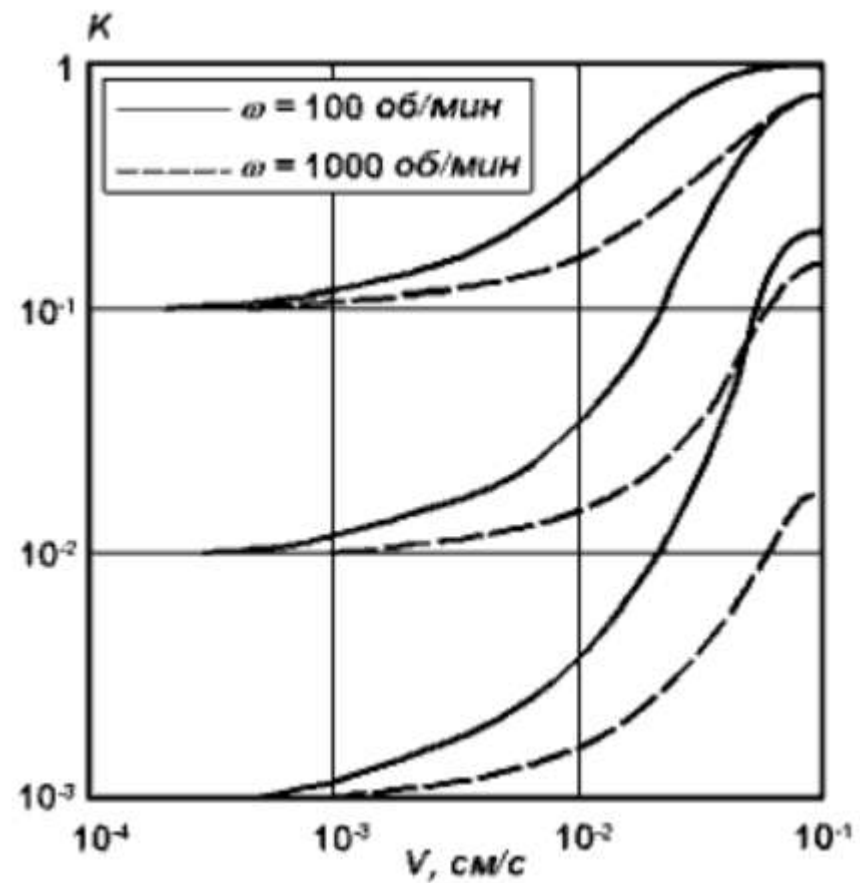
## Легирование кристаллов в процессе выращивания из жидкой фазы

Общий принцип легирования: навеска примеси  $p_i$ , подлежащая введению в расплав для получения в твердом кристалле концентрации  $N_i$ , рассчитывается по формуле, определяющий коэффициент разделения примеси  $K$

$$p_i = \frac{N_i M_i V_L}{N_A} \frac{1}{K}$$

При выборе примеси необходимо учитывать коэффициент разделения и его изменение при разных условиях выращивания.





Зависимость коэффициента разделения примеси от скорости кристаллизации, при разных скоростях вращения кристалла.

## 1.6. Механическая обработка кристаллов.

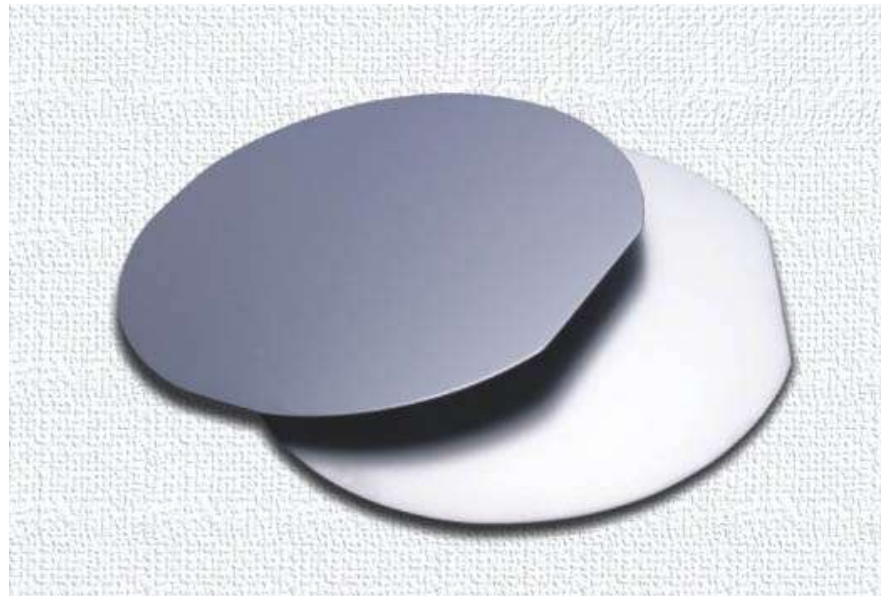
### 1.6.1. Физические основы механизма разрушения хрупких полупроводниковых материалов при механической обработке

Для механической обработки полупроводниковых материалов не могут быть использованы обычные токарные, фрезерные, строгальные и сверлильные станки, которые широко применяются для обработки различных материалов. Это связано с высокой **хрупкостью** полупроводниковых материалов. Поэтому основным способом механической обработки является обработка с использованием **абразивов**, как в связанном состоянии (алмазные диски и шлифовальники), так и в свободном (абразивные суспензии и алмазные пасты).

Физическая сущность свободного абразива - частицы абразивного материала, вдавливаясь в поверхность обрабатываемого полупроводникового материала, вызывают

образование в ней микротрещин. Эти микротрещины в процессе обработки увеличиваются и распространяются вглубь от поверхности. Дальнейшая обработка приводит к созданию сети трещин, которые, смыкаясь, вызывают сколы отдельных участков полупроводникового материала. Отколовшиеся части удаляют с поверхности исходного образца. Таким образом, происходит послойное удаление материала и осуществляется механическая обработка исходного образца.

Физическая сущность связанного абразива - при обработке связанным абразивом к разрушению под действием нормальной силы, направленной перпендикулярно поверхности (случай обработки свободным абразивом), добавляется разрушение обрабатываемого материала за счет срезания микровыступов поверхности закрепленным зерном абразива под действием сдвигающей силы, направленной вдоль поверхности пластины.



## 1.6.2. Абразивные материалы

Основные свойства: твердость, абразивная способность, механическая стойкость, химическая стойкость

- **твердость** - способность абразивного материала сопротивляться вдавливанию в него другого материала, не получающего остаточных деформаций. Твердость обычно определяют нанесением риски (царапины) одним материалом на другой. Материал более твердый оставляет на более мягком царапину определенной глубины. По этому принципу построена минералогическая **шкала Мооса**, по которой самому твердому материалу алмазу соответствует десятый класс, корунду — девятый, топазу — восьмой, кварцу — седьмой и т. д.

- **абразивная способность** - возможность с помощью одного материала обрабатывать другой или группу различных материалов. Абразивная способность определяется количеством удаленного с поверхности обрабатываемого материала в единицу времени. Если принять абразивную способность алмаза за единицу, то абразивная способность других материалов будет иметь следующие значения: карбид бора — 0,6; карбид кремния — 0,5; монокорунд — 0,25; электрокорунд — 0,15. Более точной характеристикой абразивного материала является **микротвердость**, определяемая глубиной вдавливания в исследуемый материал алмазной иглы
- **механическая стойкость** - способность абразивного материала выдерживать механические нагрузки и не разрушаться при механической обработке полупроводниковых материалов.
- **химическая стойкость** - способность абразивных материалов не изменять своих механических свойств в растворах щелочей, кислот, а также в воде и органических растворителях.

## Некоторые абразивные материалы и их свойства

**Алмаз** — микротвердость  $9,8 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. В промышленности используются в основном искусственные алмазы, которые получают из графита, обработанного под большим давлением и при высокой температуре.

**Карбид кремния** — твердость по шкале Мооса 9,2. Микротвердость равна  $3,4 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Выпускают карбид кремния двух разновидностей: зеленый и черный. Черный карбид кремния отличается от зеленого большей хрупкостью и меньшей твердостью.

**Карбид бора** — твердость близка к твердости алмаза и по шкале Мооса равна 9,7. Микротвердость его  $4,8 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

**Аэросил** - рыхлый голубовато-белый порошок, представляющий собой чистый диоксид кремния. Выпускается марок А-175, А-300 и А-380, в которых средний размер частиц составляет соответственно 10—40, 5—20 и 5—15 мкм.

## Основные группы абразивных материалов по размеру зерен

- шлифзерно (2000 – 160 мкм)
- шлифпорошок (125 – 40 мкм)
- микрошлифпорошки (63 – 14 мкм)
- тонкие микрошлифпорошки (10 – 3 мкм)

Зернистость шлифзерна и шлифпорошков обозначают как 0,1 размера стороны ячейки сита в свету в микрометрах, на котором задерживаются зерна основной фракции. Зернистость микрошлифпорошков обозначают по верхнему пределу размера зерен основной фракции.

### 1.6.3. Резка полупроводниковых слитков на пластины

Процесс включает в себя разрезание монокристаллического слитка на тонкие (250—600 мкм) плоскопараллельные пластины и является начальной операцией в общем цикле изготовления полупроводниковых приборов и ИМС.

В настоящее время для разрезания монокристаллических слитков на пластины используют два способа: **резка диском с алмазной внутренней кромкой; резка металлическими полотнами с применением абразива.**





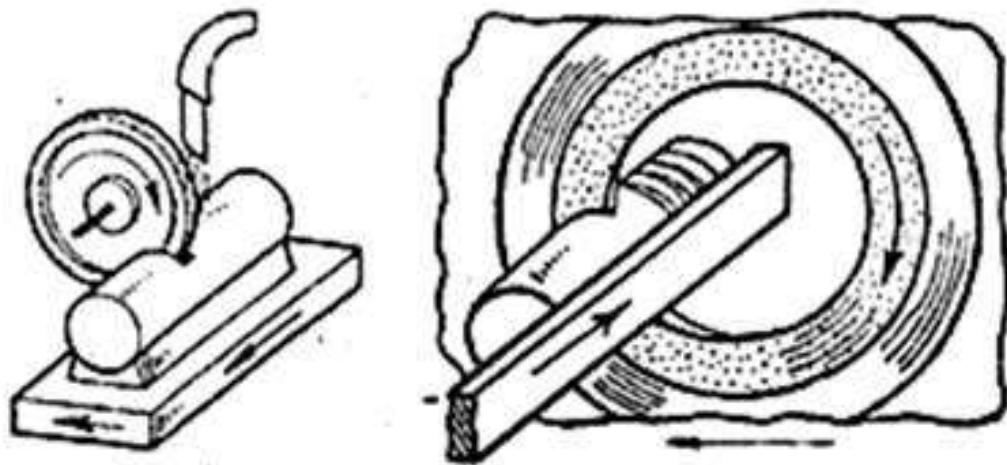
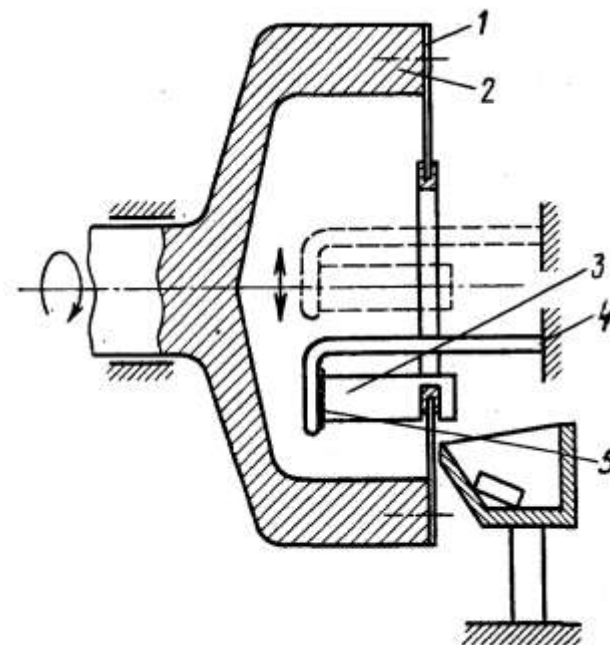


Схема резки слитка кругом АКВР: 1 - круг АКВР, 2 - барабан, 3 - слиток, 4 - оправка, 5 - клеящая мастика



#### 1.6.4. Шлифовка полупроводниковых пластин

Полученные после разрезания слитка полупроводниковые пластины обладают рядом нарушений, к которым относятся наличие механически нарушенного слоя, неплоскостность и неплоскопараллельность сторон, изгиб и большой разброс по толщине. Поэтому после проведения процесса резки обязательной технологической операцией является **шлифовка** - обработка полупроводниковых пластин на твердых доводочных дисках - шлифовальниках абразивными микропорошками. Шлифовальники обычно изготавливают из чугуна, стекла, стали, меди или латуни. Зернистость микропорошков для шлифования полупроводниковых пластин выбирают от M14 до M5.

### 1.6.5. Полировка полупроводниковых пластин

Процесс полировки отличается от процесса шлифовки технологическим режимом, размером зерна и видом абразива, а также материалом полировальника. Общим у этих процессов является вид обработки — односторонняя с использованием свободного абразива.

Процесс полировки полупроводниковых пластин состоит из трех основных этапов:

*Первый этап* (предварительная полировка) состоит в приготовлении абразивной суспензии и подготовки полировального круга. На стеклянный диск натягивают мягкий материал (батист) с помощью металлических палец. Поверхность батиста смачивают спиртом или приборным маслом для равномерного распределения абразивных зерен. На поверхность вспомогательного стеклянного диска наносят алмазный порошок АСМЗ, общий вес которого не превышает одного карата, и несколько капель приборного масла.

Полученную смесь растирают другим таким же стеклянным диском до равномерного распределения алмазного порошка по всей поверхности стеклянных дисков. После этого поочередно каждый диск переносят на приготовленный батистовый полировальник и проводят втирание алмазного порошка в батист. Втирание ведут до тех пор, пока весь алмазный порошок не перейдет на поверхность батиста. На приготовленный таким образом полировальник помещают рабочие головки с наклеенными на них полупроводниковыми пластинами.

*Второй этап* (промежуточная полировка) характеризуется сменой материала полировальника и использованием алмазного порошка АСМ1. Для этого на стеклянный диск натягивают другой мягкий материал (велюр), смоченный горячей водой или спиртом. На поверхность велюра рассмотренным способом наносят алмазный порошок с приборным маслом. После проведенных операций очищенные от следов предыдущей обмотки головки с полупроводниковыми пластинами располагают на вновь приготовленном полировальнике и процесс полировки продолжается.

**Третий этап** (окончательная тонкая полировка) включает в себя смену полировальника и абразивного материала. В качестве материала полировальника используют новую партию батиста, а абразивным материалом могут служить оксид хрома, диоксид кремния и диоксид циркония. Наиболее часто тонкую полировку полупроводниковых пластин проводят с использованием оксида хрома с величиной зерна менее 1 мкм. Обычно применяют оксид хрома двух сортов: **грубый** с размером зерна 0,6—0,8 мкм, получаемый путем восстановления бихромата калия серой, и **тонкий** с размером зерна 0,2—0,4 мкм, получаемый термическим разложением бихромата аммония.

## 1.6.6. Резка полупроводниковых пластин на элементы (кристаллы)

Для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы используют следующие способы: резку алмазным диском с внешней, режущей кромкой; резку металлическими полотнами с применением абразива; резку металлическими полотнами с алмазной режущей кромкой (штрипсами); резку проволокой с применением абразива), резку с использованием ультразвуковых установок;

**алмазное скрайбирование** с последующим разламыванием; электронно-лучевое скрайбирование с последующим разламыванием; лазерное скрайбирование с последующим разламыванием.



*Алмазное скрайбирование* наиболее широко применяется для разделения пластин на кристаллы квадратной и прямоугольной форм. Сущность способа заключается в том, что на поверхности полупроводниковой пластины алмазным резцом наносят риски в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вокруг нанесенной риски на поверхности полупроводниковой пластины возникают механические напряжения, ослабляющие материал в локальных областях. При приложении к пластине изгибающего усилия она разламывается вдоль нанесенных рисок.

*Электронно-лучевое скрайбирование.* Нанесение рисок на поверхность полупроводниковой пластины можно проводить, остросфокусированным *электронным лучом*. Электронный луч производит микрорасплавление локального участка поверхности пластины. Процесс нагрева и охлаждения локальных областей полупроводниковой пластины происходит в течение короткого времени, что вызывает возникновение термомеханических напряжений в области созданных электронным лучом бороздок. При последующем приложении к пластине изгибающего усилия пластина раскалывается по бороздкам.

*Лазерное скрайбирование* находит все большее применение для разделения пластин на кристаллы. При лазерном скрайбировании риска на поверхности полупроводниковой пластины образуется не механическим, а электрофизическим способом (подобно электронному лучу) путем нагрева и испарения узкой полосы полупроводникового материала. Данный метод позволяет проводить скрайбирование пластин с любым покрытием на любую глубину и сквозное разделение.

Применяют различные **способы разламывания пластин** на отдельные кристаллы. Рассмотрим три из них, наиболее широко используемые.

При *первом способе* (ручном) пластину помещают на мягкую подложку (резину, поролон и др.) рисками вниз и сверху прокатывают резиновым валиком в двух взаимно перпендикулярных направлениях, причем ось валика должна быть строго параллельна рискам, по которым идет разламывание, иначе ломка пластины может произойти не по рискам, а по произвольному направлению.



*Второй способ* предусматривает механизацию процесса разламывания пластин с рисками. Сущность способа состоит в том, что после наклейки пластины ее пропускают через пространства между двумя движущимися металлическими лентами, которые имеют определенный радиус закругления. Проходя участок закругления, пластина раскалывается по рискам на кристаллы.

*Третий способ* основан на прижатии пластины с рисками к сферической поверхности линзы, в результате чего происходит одновременное разламывание пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Устройство для разламывания состоит из линзы со сферической поверхностью и резиновой мембраны. Пластину располагают на резиновой мембране рисками вниз, а сверху к пластине подводят сферическую поверхность линзы. При определенном, давлении воздуха на резиновую мембрану происходит прижатие полупроводниковой пластины к сферической поверхности линзы и разламывание.