

# Технология интегральных микросхем

Козлов Антон Викторович  
К.т.н., доцент каф.ИЭМС

Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»  
Профиль «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети (вечерний факультет)»

## Компетенции / подкомпетенции, формируемые в дисциплине

- (ПК-3): способность обосновывать принимаемые проектные решения, осуществлять постановку и выполнять эксперименты по проверке их корректности и эффективности
- **(ПК-3.36): способность использовать знания в области технологии производства микроэлектронной аппаратуры, а также навыков разработки технологических процессов изготовления МЭА.**

# ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Курс	Семестр	Общая трудоёмкость (ЗЕ)	Общая трудоёмкость (часы)	Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)	Самостоятельная работа (часы)	Промежуточная аттестация
4	7	3	108	16	16	-	76	Зачет

# Учебная нагрузка по ТИМС

- Лекции – в ауд.4204;
- Лаб. работы – допуск в ауд.4201 (выполнение в ауд. 7217 и 7219);
- Сам. работа (подготовка и защита лабораторных работ, подготовка и выполнение тестов в ОРОКС, подготовка и выполнение контрольных работ, подготовка и публичная защита реферата на тему по варианту).

# Разделы дисциплины

- 1. Введение в предмет курса. **Организационно-технологические основы производства изделий микро- и наноэлектроники;**
- 2. **Основы поверхностной обработки полупроводниковых материалов.** Кристаллическая структура кремния. Химическая обработка подложек кремния: очистка в растворителях, травление. Химическое анизотропное травление. Контроль чистоты поверхности подложек;
- 3. **Основные понятия процесса окисления кремния.** Структура окисла кремния. Кинетика роста окисла кремния при высокой температуре (модель Дила - Гроува). Факторы, влияющие на скорость окисления кремния (температура, давление окислителя и другие). Оборудование для окисления кремния. Методы контроля параметров диэлектрических слоев;
- 4. **Диффузия примесей в кремний.** Механизмы диффузии. Коэффициент диффузии. Распределения примесей при диффузии. Источники примесей. Оборудование для процесса диффузии. Методы измерения глубины легированного слоя, его проводимости и распределения примеси;
- 5. **Ионное легирование полупроводников.** Основные параметры процесса. Взаимодействие внедряемых ионов с материалом подложки. Распределение примеси. Образование дефектов и методы их устранения. Оборудование для ионной имплантации;
- 6. **Оптическая литография:** контактная, проекционная. Свойства фоторезистов, критерии их оценки. Основные операции процесса фотолитографии. Производство фотошаблонов. Дефекты при фотолитографии, методы их устранения. Электронная и рентгеновская литографии. Перспективы развития процесса;
- 7. **Основные понятия и механизмы плазменного травления.** Классификация процессов плазменного травления. Оборудование для плазменного травления. Современное состояние технологии плазменного травления;
- 8. **Основные понятия, механизмы и классификация процессов напыления и осаждения металлических пленок.** Требования к материалам контактов и металлизации. Использование поликристаллического кремния и силицидов металлов. Методы контроля качества контактных материалов. Оборудование.

# ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## ● Основная литература

- 1. Лабораторный практикум «Основы технологии электронной компонентной базы, под ред. Ю.А. Чаплыгина, М., МИЭТ, 2013. 176 с.
- 2. А.А. Голишников, М.Г. Путря. Плазменные технологии в наноэлектронике. Уч. пособие. М.: МИЭТ. 2011 г.

## ● Дополнительная литература

- 1. Путря М.Г. Плазменные методы формирования трехмерных структур УБИС. Уч. пособие, 2005 г.
- 2. В.И. Шевяков. Омические и выпрямляющие контакты в ИС. Уч. пособие, М., МИЭТ, 1999 г.
- 3. М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.Г. Путря, В.И. Шевяков. Технология, конструкции методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 2. М.: Изд «БИНОМ. Лаборатория знаний» 2009. 422с.
- 4. Д.Г. Громов, А.И. Мочалов, А.Д. Сулимин, В.И. Шевяков. Металлизация ультрабольших интегральных схем, М.: Изд «БИНОМ. Лаборатория знаний». 2009. 277с.
- 5. М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 1. М.: Изд. «БИНОМ. Лаборатория знаний» 2007. 397с.
- 6. Королев М.А., Ревелева М.А. Технология и конструкции интегральных микросхем. Уч. пособие в 2-х частях. М.: МИЭТ. Ч.1. 2000 г.



# Структура и график контрольных мероприятий

№п/п	Название	Баллы		Неделя
		макс	мин	
1	Тест ОРОКС №1 «Основы технологии изготовления ИМС (веч2017)»	5	0	2
2	Тест ОРОКС №2 «Методы обработки поверхности (веч2017)»	5	0	4
3	Тест ОРОКС №3 «Термическое окисление кремния (веч2017)»	5	0	6
4	Прием защиты лаб. работы №1 «Термическое окисление кремния»	5	0	4
5	Тест ОРОКС №4 «Термическая диффузия примеси в кремнии (веч2017)»	5	0	8
6	Прием защиты лаб. работы №2 «Диффузия примесей в кремний»	5	0	8
7	Контрольная работа №1 «Методы обработки поверхности, термическая диффузия в окисляющей и инертной средах»	10	0	8
8	Тест ОРОКС №5 «Ионное легирование (веч2017)»	5	0	10
9	Тест ОРОКС №6 «Фотолинтография (веч2017)»	5	0	12
10	Прием защиты лаб. работы №3 «Реактивное ионное травление тонких диэлектрических слоев»	5	0	12
11	Прием защиты лаб. работы №4 «Магнетронное распыление в вакууме для формирования тонких металлических пленок»	5	0	16
12	Тест ОРОКС №7 «Формирование рельефа на поверхности кремния (веч2017)»	5	0	14
13	Тест ОРОКС №8	5	0	16

**Мониторинг успеваемости студентов проводится в течение семестра трижды:** - по итогам 1-8 учебных недель;  
- по итогам 9–12 учебных недель;  
- по итогам 13–16.

**При выставлении итоговой оценки используется шкала, приведенная в таблице:**

Сумма баллов	Оценка
Менее 50	2
50 – 69	3
70 – 85	4
86 – 100	5

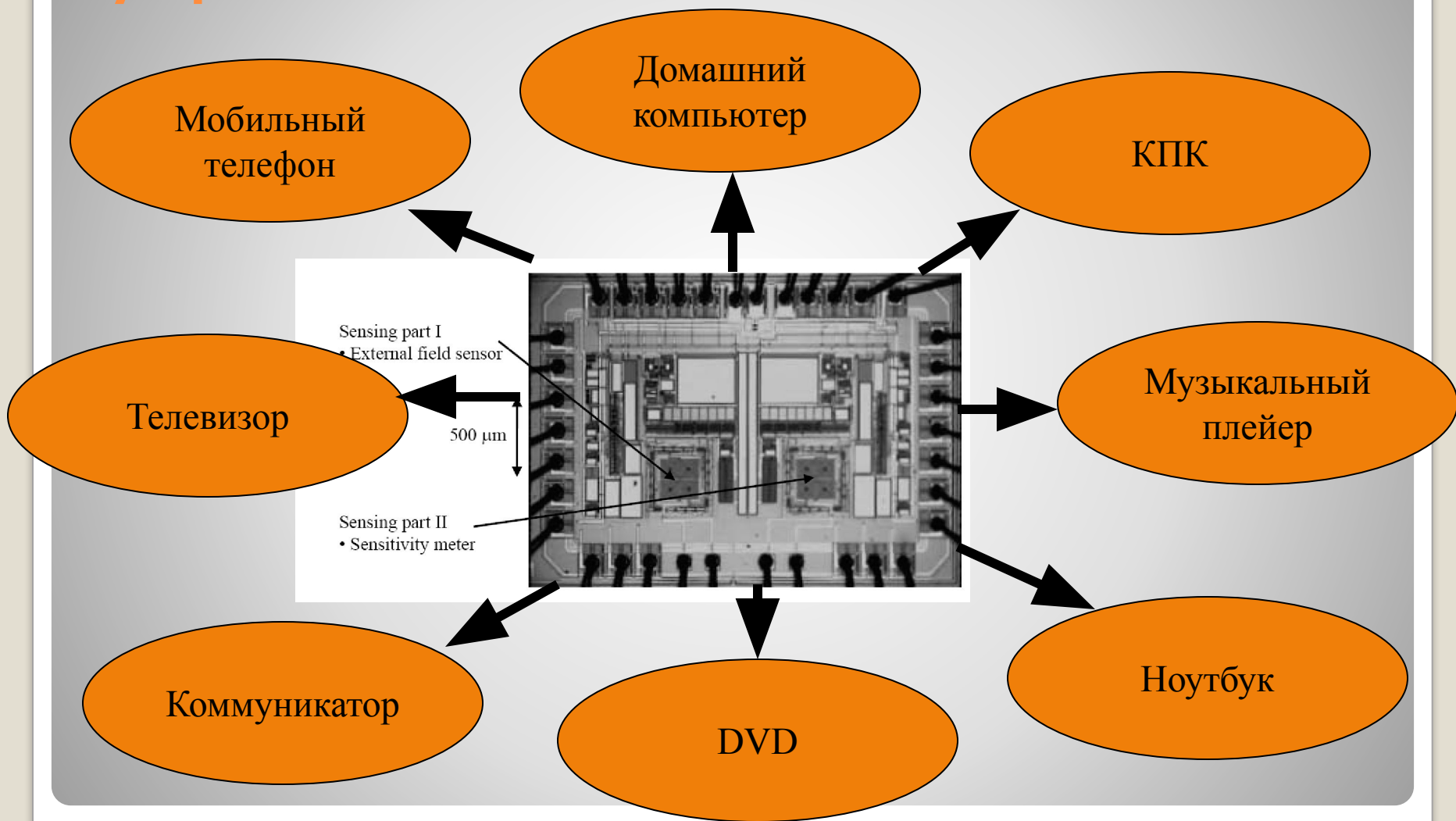
Введение в предмет курса.

Организационно-  
технологические основы  
производства изделий микро- и  
наноэлектроники

**Лекция 1**



# Применение интегральных схем и микросистем в устройствах бытового назначения



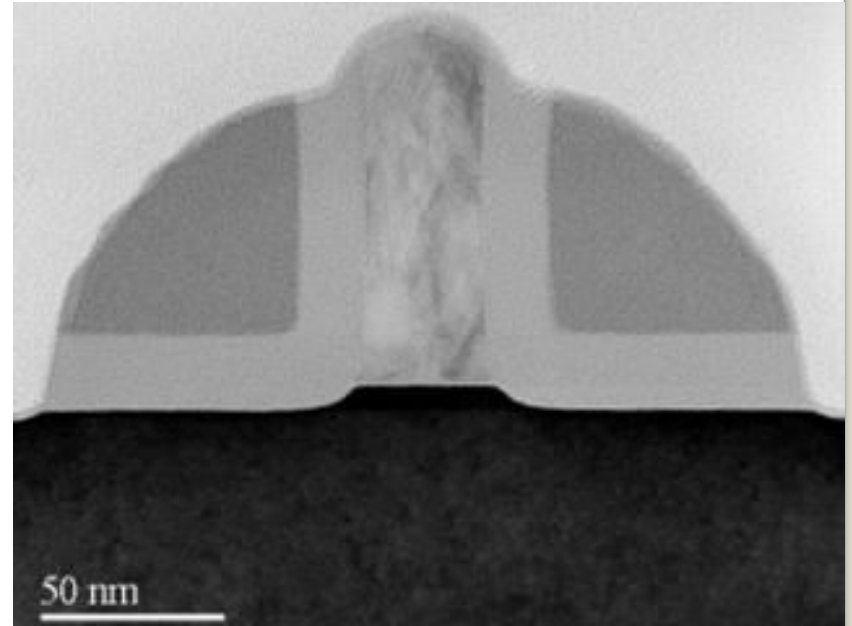
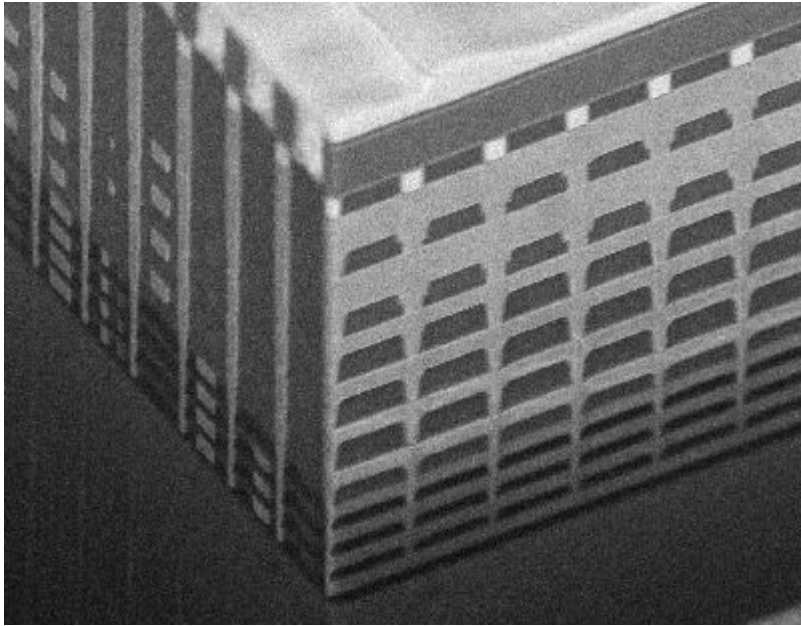
# Проектирование и изготовление ИС и микросистем требует:

- 1) знание физики полупроводников и полупроводниковых приборов;
- 2) **знание технологии изготовления п/п приборов и ИМС;**
- 3) знание схемотехнических решений формирования ИС;
- 4) применение современных САПР и умение работать на них.

# Закон Мура

- Чаще всего для описания эволюции технологии КМОП применяется так называемый «закон Мура».
- Важно понимать предположения, на которых он базируется, так как это позволит нам заглянуть в будущее.
- В 1965 году Гордон Мур заметил, что число элементов наиболее сложной из существующих интегральных схем **ежегодно удваивается**.
- В 1959 году появился **первый планарный транзистор**, а в 1965-м уже выпускались микросхемы, **состоящие из 50-60 элементов**.
- Тогда Мур дал прогноз, согласно которому эта тенденция должна была сохраниться в течение последующих 10 лет, и в 1975 году с удивлением заметил, что **он сбился**.
- Согласно новому прогнозу Мура через некоторое время темпы удвоения числа элементов интегральных схем должны были замедлиться вдвое. По мнению Мура, это снижение темпов роста числа элементов должно было произойти в 1980 году, но оно случилось раньше, уже в 1975-м.
- За последние 20 лет прогноз Мура получил широкую известность и приобрел статус «закона». Термин «закон Мура» стали употреблять для обозначения непрерывного экспоненциального роста функциональности интегральных схем с одновременным снижением их стоимости.

- Ключ к успешному прогнозированию будущего технологий КМОП лежит в понимании факторов, влияющих на величину стоимости, на функцию. КМОП будет доминировать и развиваться до тех пор, пока себестоимость на функцию будет падать.
- Мы рассмотрим следующие важнейшие составляющие этой тенденции. Обеспечение возможности формирования элементов все меньшего размера за счет развития литографии.
- Как указал Мур, это основной фактор, влияющий на рост числа элементов на кристалле.
- Важнейшие составляющие этой тенденции следующие:
  - **улучшение конструкции транзистора, необходимое для достижения большей производительности при меньших размерах;**
  - **разработка новых топологий схем, обеспечивающих увеличение плотности упаковки;**
  - **совершенствование межэлементных соединений, ведущее к повышению плотности упаковки;**
  - **разработка новых семейств интегральных схем;**
  - **создание новых, более компактных ячеек памяти;**
  - **контроль капитальных затрат.**



**FUJITSU**

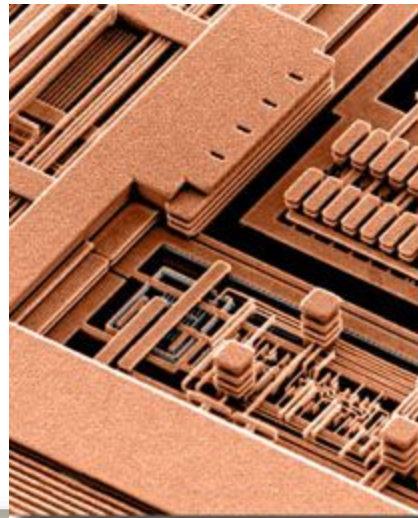
**1-Poly and 10-Metal(9Cu + 1Al)**

**Shallow Trench Isolation (STI)**

**Salicide Gate Salicide Source and**

**Drain CMP Planarization**

**Production availability: 2003**



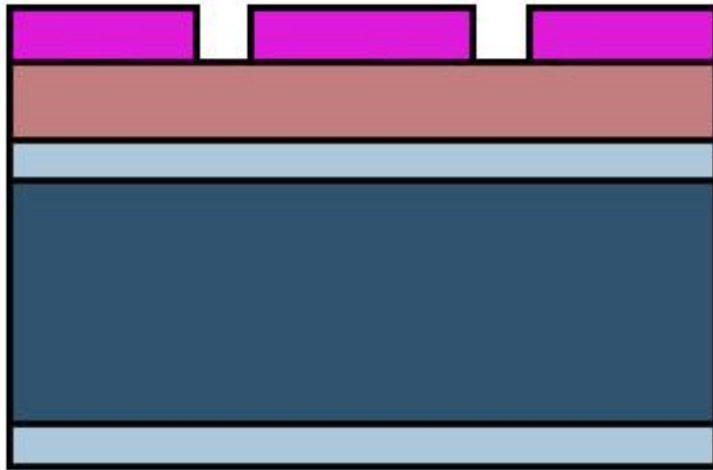
*IBM*

# Базовые этапы создания ИМС

## Окисление кремния



# Фотолитография



фотомаска  
светочувствительный  
слой

$\text{SiO}_2$

$\text{Si}$

$\text{SiO}_2$



светочувствительный  
слой

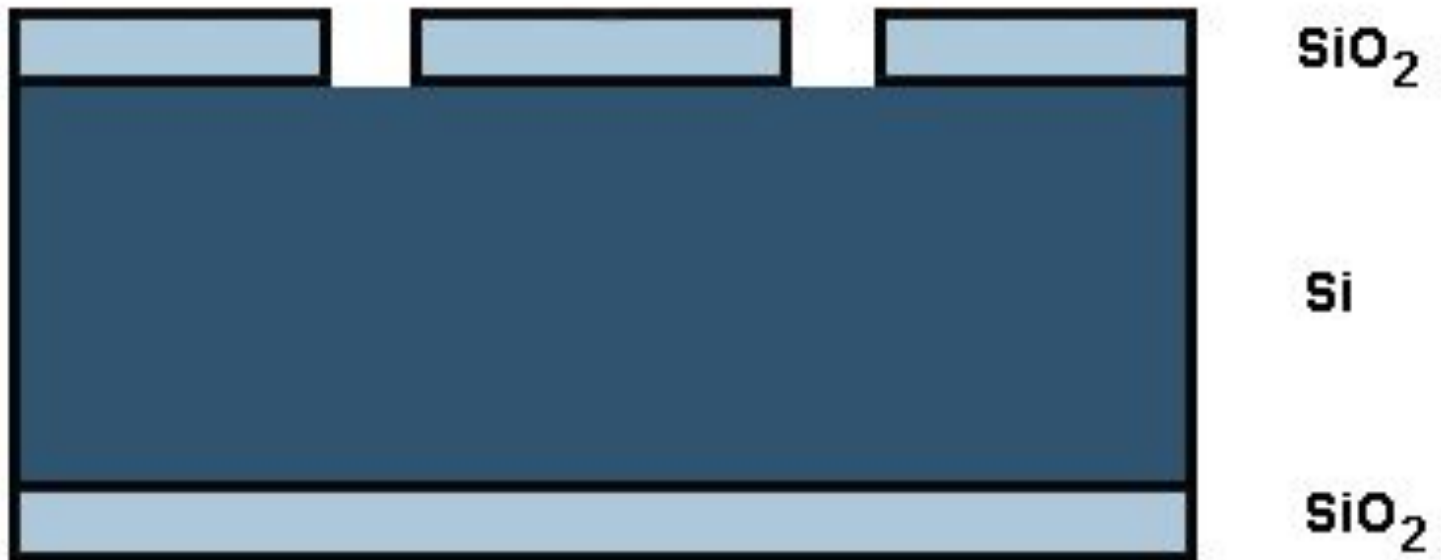
$\text{SiO}_2$

$\text{Si}$

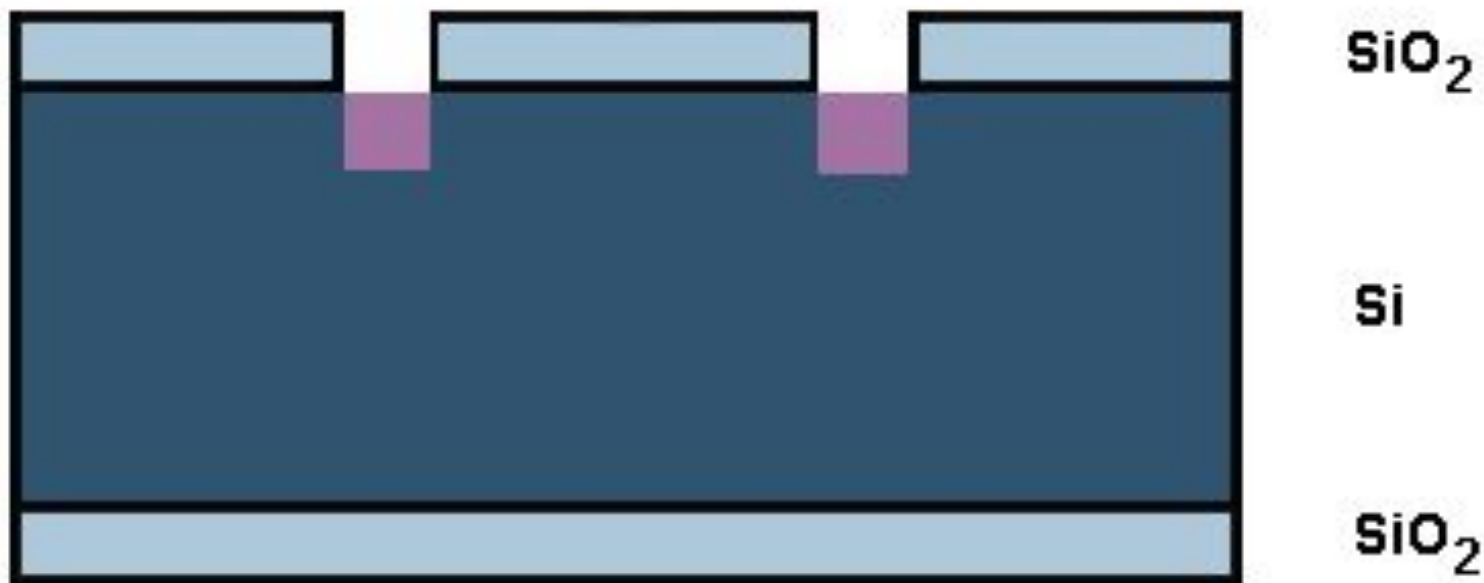
$\text{SiO}_2$



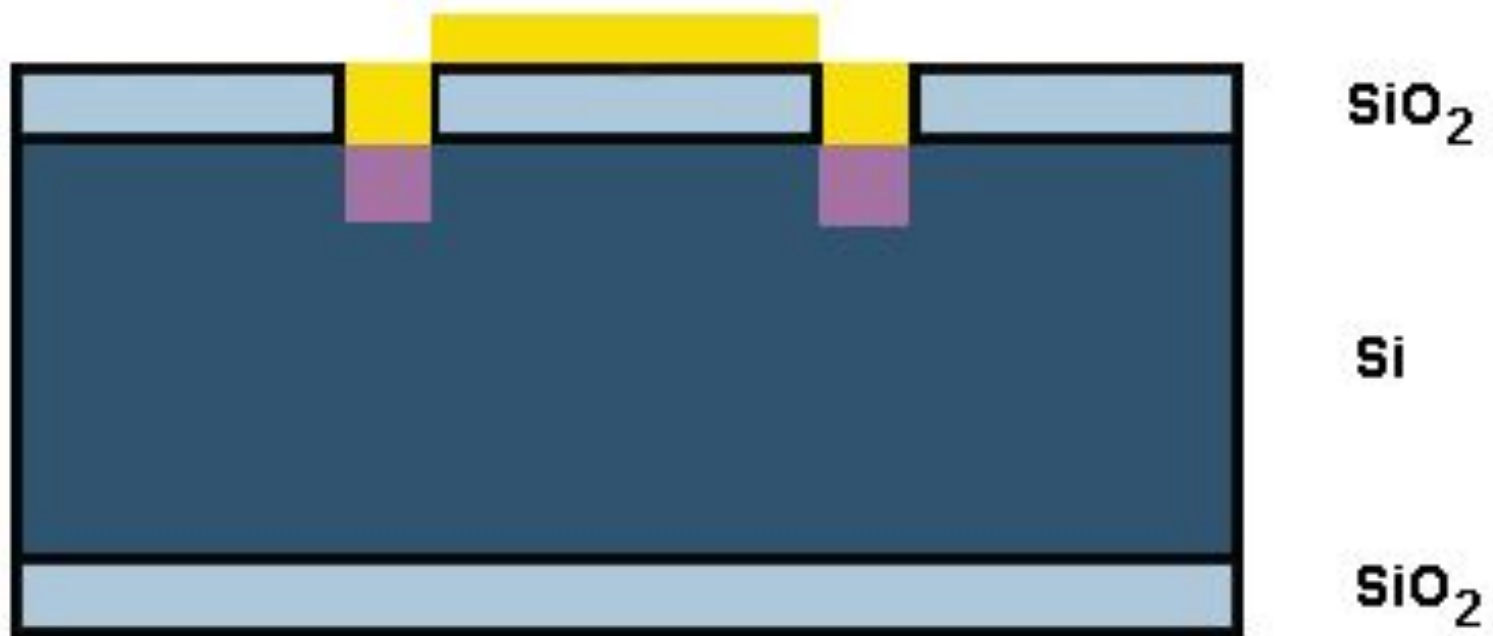
# Травление слоя



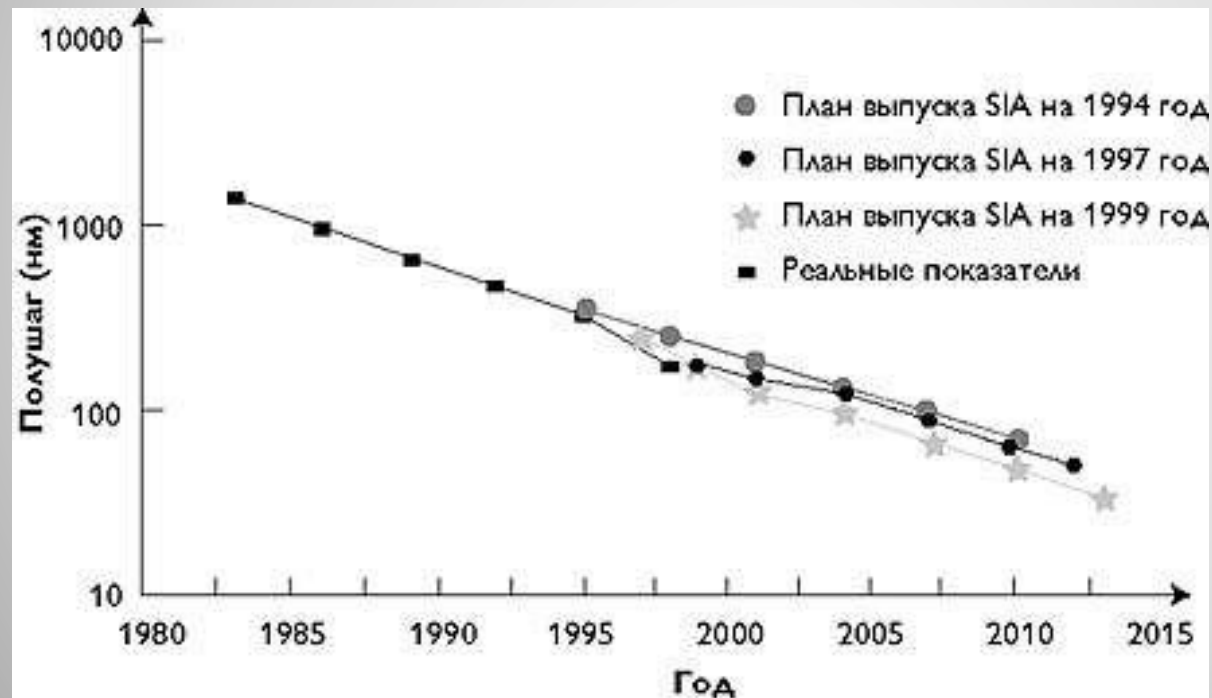
# Создание легированных областей



# Металлизация



## Тенденции в изменении разрешающей способности литографического процесса



- полушаг – это минимальный размер литографических параметров на кристалле.

# CMOS technologies - key features

Technology	0.18 um	0.25 um	0.35 um	0.50 um
Supply Voltage (V)	1.8	2.5 3.3	3.3* <sup>2</sup>	
Available Interface (V)	1.8/2.5/3.3	2.5/3.3	3.3/5.0	3.3/5.0
Available Poly/Metal Layers	2P6M* <sup>1</sup>	2P5M	2P4M	2P4M
Substrate	P-sub	P-sub	P-sub	P-sub
Mixed-Signal Options* <sup>3</sup> Triple-well	Yes	Yes	Yes	No
Diffusion Resistor	Yes	Yes	Yes	Yes
Capacitor	Poly-Poly			
&				
Bulk-Poly	Poly-Poly	Poly-Poly		
&				
Bulk-Poly	Bulk-Poly			
Mass Production Availability		Now	Now	Now

\*1: "2P6M" means Poly 2 Layers + Metal 6 Layers.

\*2: Please contact us, before using the 0.50um technology at 5 V.

\*3: No limitation in the combination of Mixed-Signal Option.

## Физические и механические свойства германия, кремния и арсенида галлия

Свойства	<u>Ge</u>	<u>Si</u>	<u>GaAs</u>
Атомный (молекулярный) вес	72,59	28,09	144,6
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,327	2,33	5,316
Модуль Юнга, $\times 10^9$ Н/м <sup>2</sup>	13,7	16,9	1,13
Коэффициент Пуассона	0,256	0,262	0,336
Температура плавления, °C	936	1420	1238
Теплопроводность, кал/град м·с	0,14	0,2	0,125
Удельная теплоемкость, кал/г·град	0,074	0,210	0,086
Критерий хрупкости	4,4	2,0	3,0
Коэффициент термического расширения $\alpha$ , $\times 10^{-8}$ град <sup>-1</sup>	5,75	2,23	5,74
Ширина запрещенной зоны, эВ	0,76	1,11	1,36
Тип кристаллической структуры	Алмаз	Алмаз	Цинковая обманка
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /В·с	3900	1400	8800
Подвижность дырок, см <sup>2</sup> /В·с	1900	480	400
Концентрация собственных носителей при 300 К, см <sup>-2</sup>	$2 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^6$
Диэлектрическая постоянная	16	11,8	11,1

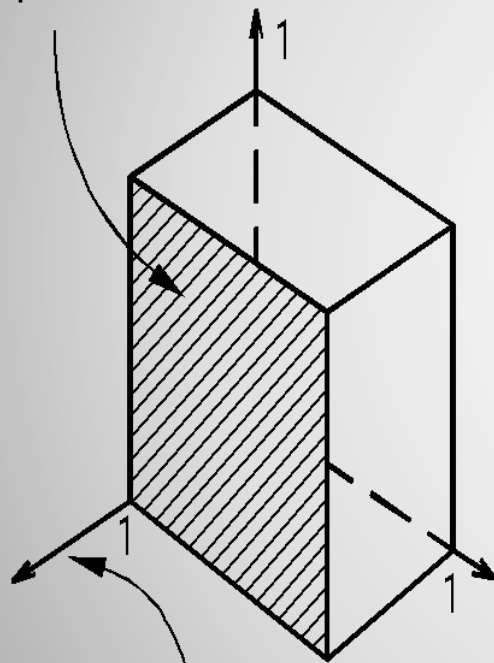
## Схематическое представление кристаллической решетки кремня





# Схематическое представление плоскостей с различными индексами Миллера в кубической решетке

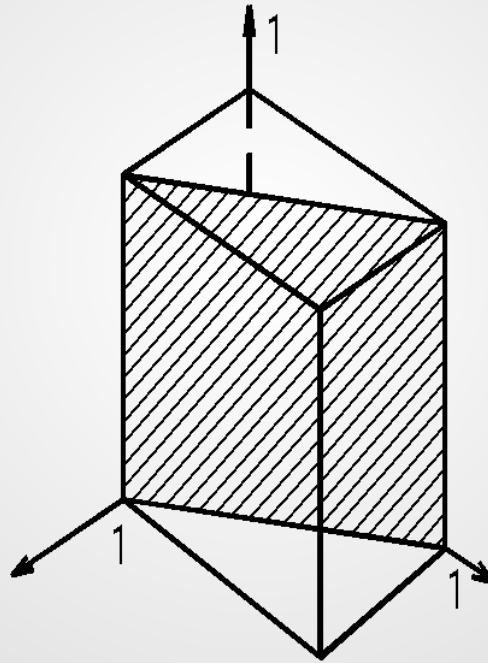
Кристаллографическая плоскость



Направление [100]

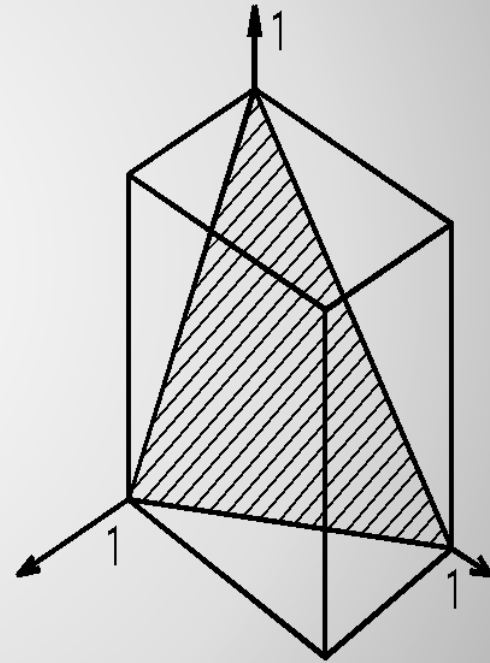
(100)

а)



(110)

б)



(111)

в)

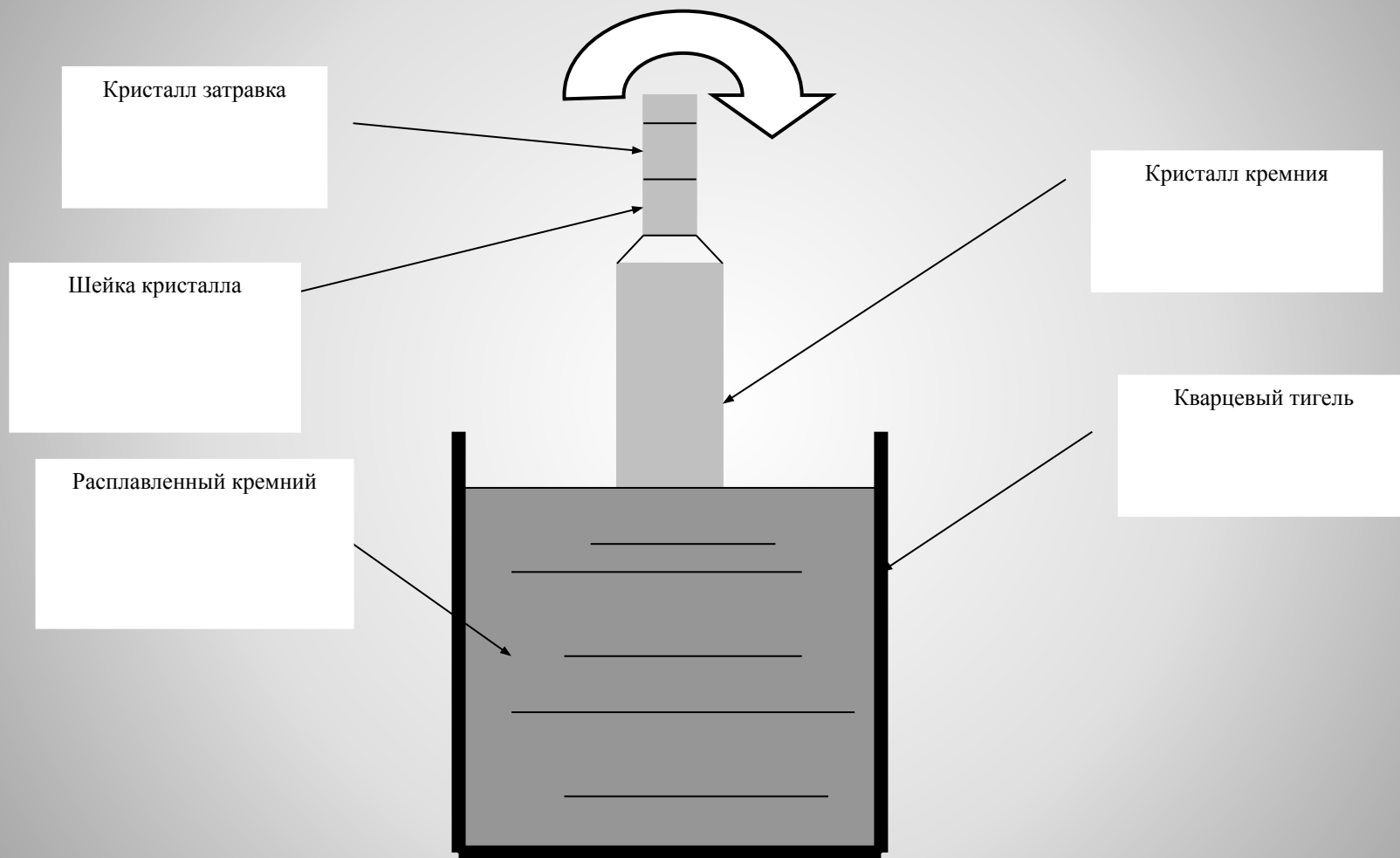
Идея метода получения кристаллов по Чохральскому заключается в росте монокристалла за счет перехода атомов из жидкой или газообразной фазы вещества в твердую фазу на их границе раздела. Применительно к кремнию этот процесс может быть охарактеризован как однокомпонентная ростовая система жидкость - твердое тело.

## Технология процесса

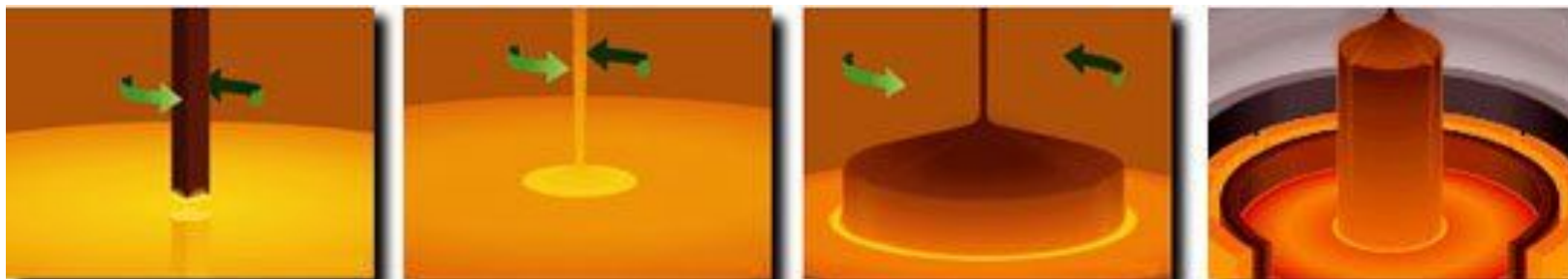
Затравочный монокристалл высокого качества опускается в расплав кремния и одновременно вращается. Получение расплавленного поликремния происходит в тигле в инертной атмосфере при температуре, незначительно превосходящей точку плавления кремния  $T = 1415$

направлении противоположном вращению. С тигель вращается для осуществления перемешивания расплава и сведения к минимуму неоднородности распределения температуры. 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. Легирование осуществляется введением определенного количества примесей в расплав.

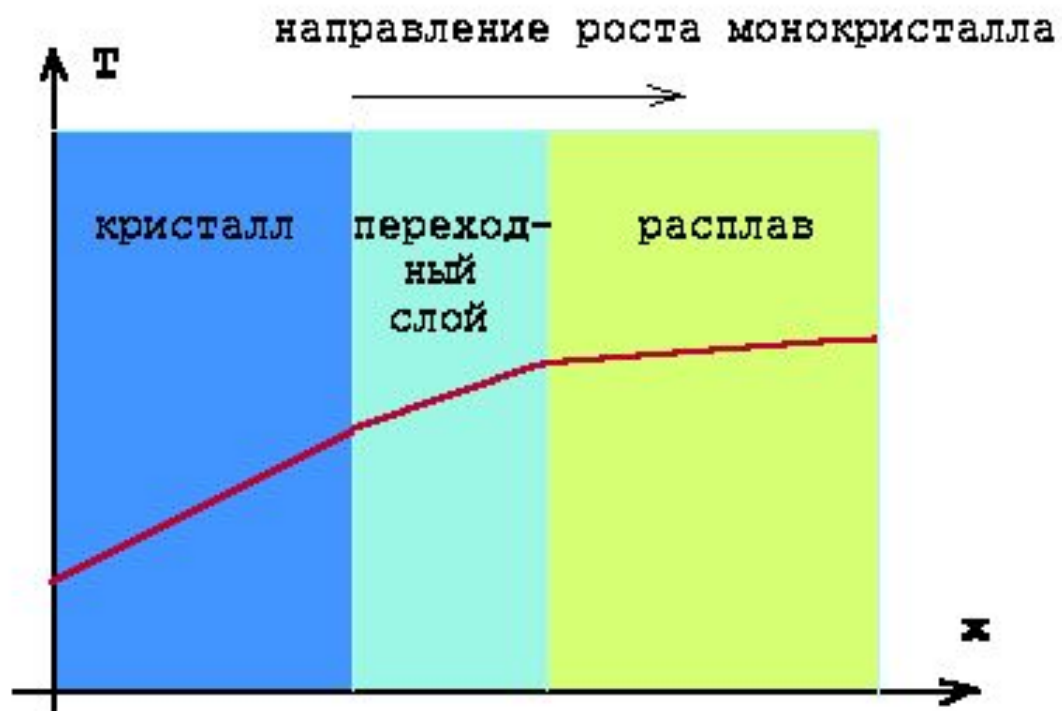
# Процесс Чохральского для выращивания кристаллов кремния



## Процесс формирования слитка по методу Чохральского



## Распределение температуры в процессе роста слитка по методу Чохральского



## Установки для выращивания слитков и готовый слиток монокремния

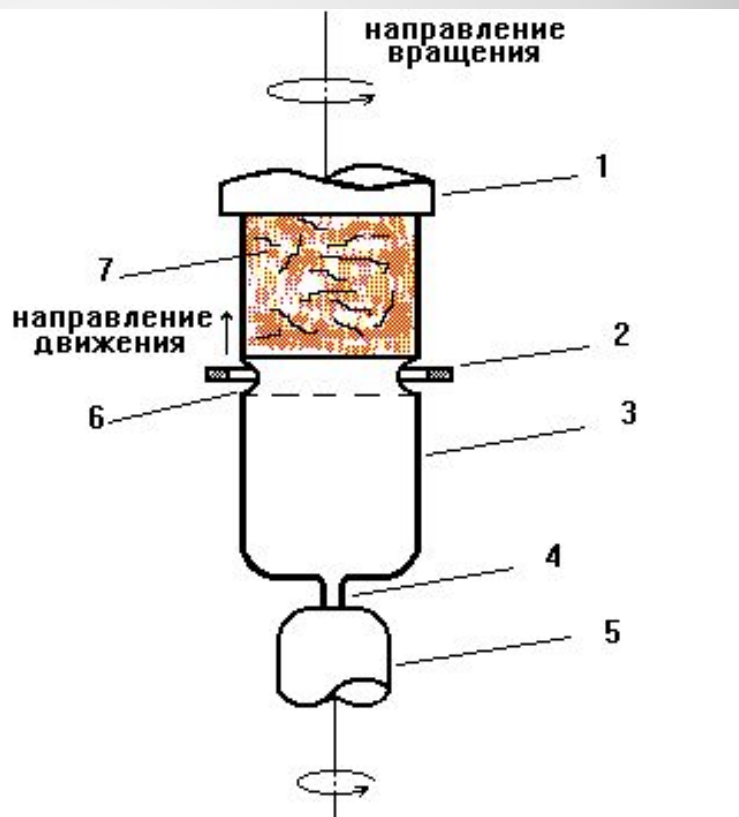




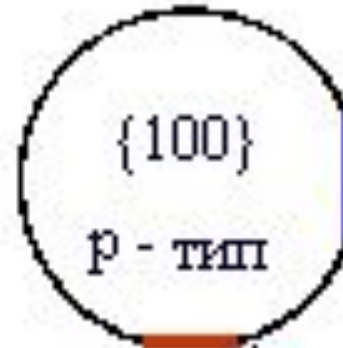
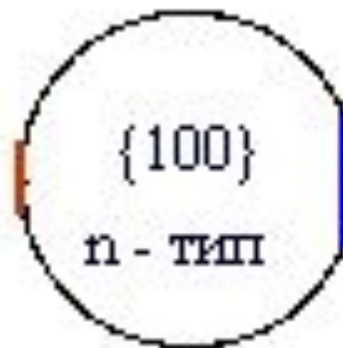
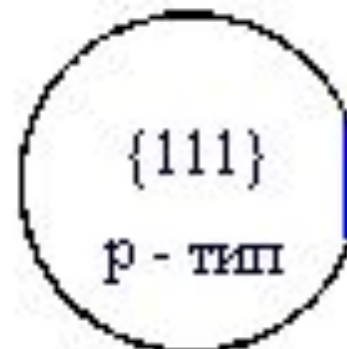
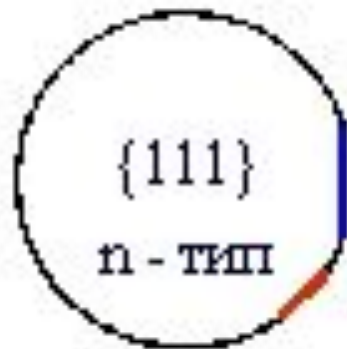
**Зонная плавка** является одним из наиболее эффективных методов глубокой очистки полупроводников.

**Идея метода** связана с различной растворимостью примесей в твердой и жидкой фазах.

- 1 - Держатель
- 2 - Обмотка нагревателя
- 3 - Монокристаллический кремний
- 4 - Затравочный монокристалл
- 5 - Держатель
- 6 - Расплавленная зона
- 7 - Стержень из поликристаллического кремния



## Ориентация пластин подложек



— дополнительный срез  
— основной срез

## 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.

В окончательном виде кремний представляет из себя пластину диаметром 15 - 40 см, толщиной 0.5 - 0.65 мм с одной зеркальной поверхностью.

## Список источников литературы по теме:

1. Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; Под ред. Ю. А. Чаплыгина. - 3-е изд., электронное. - М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2015. - 400 с.
2. Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 2 : Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М. А. Королев; Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - 3-е изд., электронное.
3. Лабораторный практикум «Основы технологии электронной компонентной базы, под ред. Ю.А. Чаплыгина, М., МИЭТ, 2013. 176 с.

## Контрольные вопросы по первой теме:

1. В чём заключается суть закона Гордана Мура?
2. В чём заключается суть процесса роста монокристаллического слитка кремния по методу Чохральского?
3. Изобразите схематично кристаллическую решетку кремния с различными индексами Миллера.
4. Изобразите схематично ориентацию пластин кремния с базовыми срезами.
5. Приведите значения известным Вам физических и механических свойств кремния, германия и арсенида галлия.

# Спасибо за внимание!

Козлов Антон Викторович

*Следите за информацией на сайте [orioks.miet.ru](http://orioks.miet.ru)*