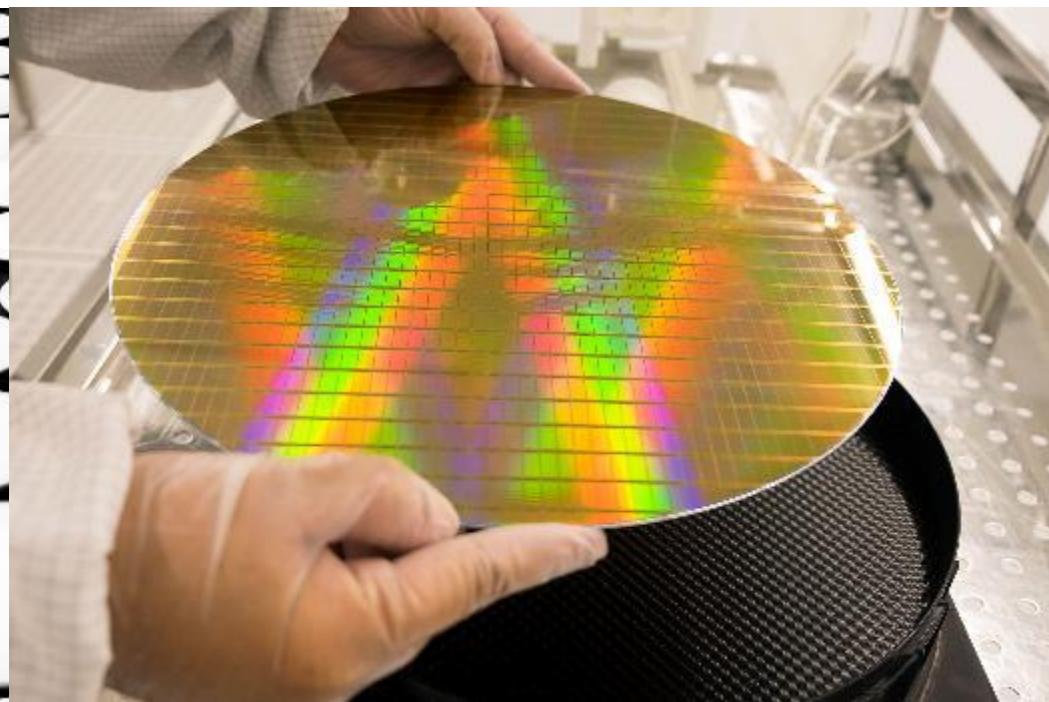
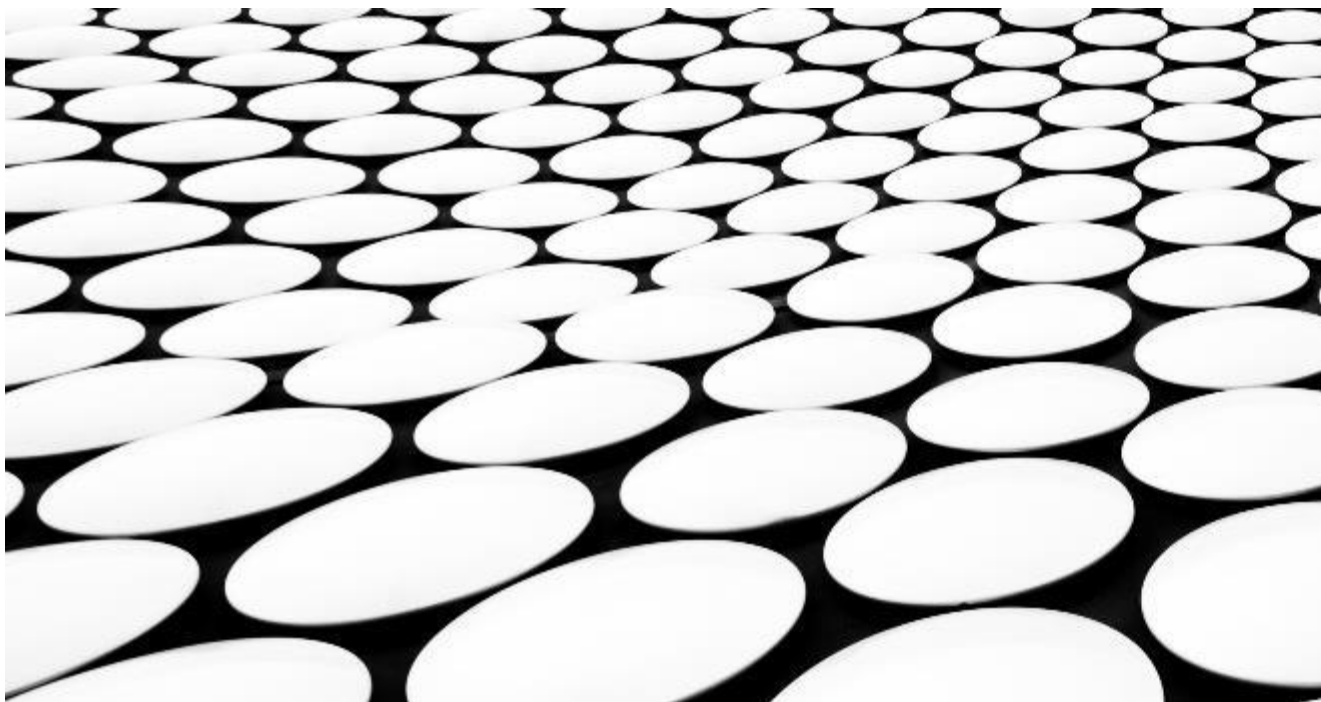


ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

БЛОК 1.2

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ, ЭПИТАКСИЯ, ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ, ДИФФУЗИЯ, ЛИТОГРАФИЯ.



МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Требования к металлам:

- Высокая электропроводность
- Хорошая адгезия
- Возможность осаждения с использованием стандартных планарных технологий
- Коррозионная стойкость
- Механическая прочность соединений

Используемые металлы и сплавы:

- Алюминий
- Медно-алюминиевый сплав
- Медь
- "Барьерные" металлы
- Силициды
- Переходные слои (Ti-Pd-Au, Ti-Pt-Au)

Традиционным металлом для кремниевых ИС является алюминий. Он имеет низкую величину удельного сопротивления (2.7 мкОм·см), алюминий и его сплавы обладают хорошей адгезией к термически выращенному SiO₂ и силицидам. Недостатки – сильная электромиграция и коррозия.

В качестве первого слоя металлизации чаще всего используют тугоплавкие металлы (молибден, ванадий). Имеют высокую электропроводность, стабильность при высоких температурах, хорошую адгезию к SiO₂, легко травятся при фотолитографии. Имеют низкую растворимость в материале подложки.

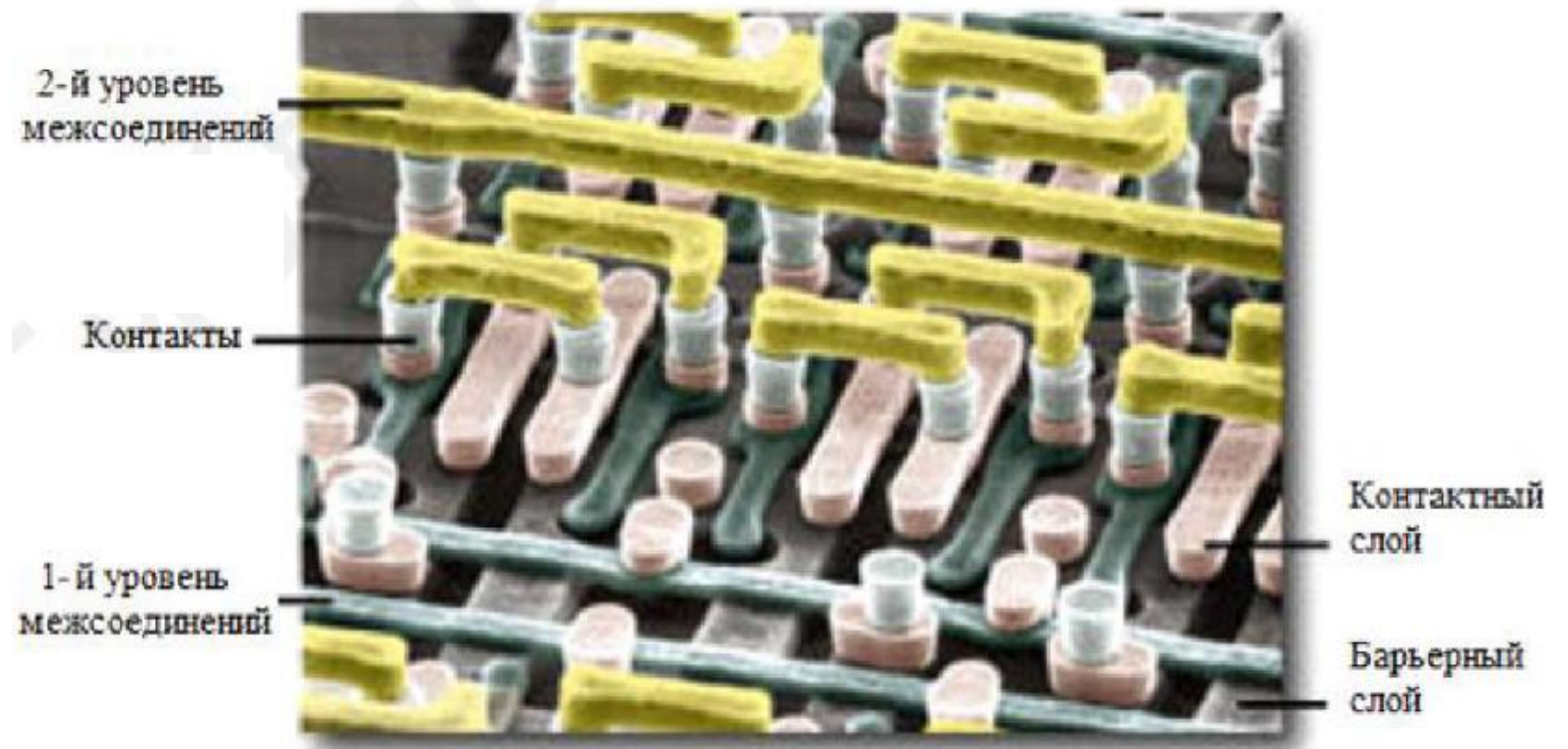
Вторым слоем металлизации обычно служит алюминий, а в особо ответственных устройствах - золото. Последующие слои должны иметь максимально высокую электропроводность и обеспечивать качественное подсоединение контактных площадок к выводам корпуса. Используют медь, реже алюминий и золото.

Тугоплавкие металлы можно осаждать непосредственно на кремний. Та реагирует с Si только при темп. выше 600 °С, а соединение с Al (Al₃Ta) образует при темп. выше 450 °С.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Требования к контактам:

- Должны быть омическими (сопротивление контакта не должно меняться при изменении направления протекающего тока)
- Должен выполняться закон Ома
- Должны обладать высокой теплопроводностью и иметь коэффициент теплового расширения, близкий к окружающим материалам
- Глубина диффузии металлов контакта в полупроводник должна быть минимальной



Техпроцессы front end of line (FEOL) включают в себя процессы изготовления активных приборов (транзисторов).
Техпроцессы back end of line (BEOL) и включает в себя процессы формирования межэлементных соединений и межуровневой разводки.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Для слаболегированного полупроводника удельное сопротивление металлического контакта (термоэлектронная эмиссия):

R – постоянная Ричардсона, φ_B – высота барьера.

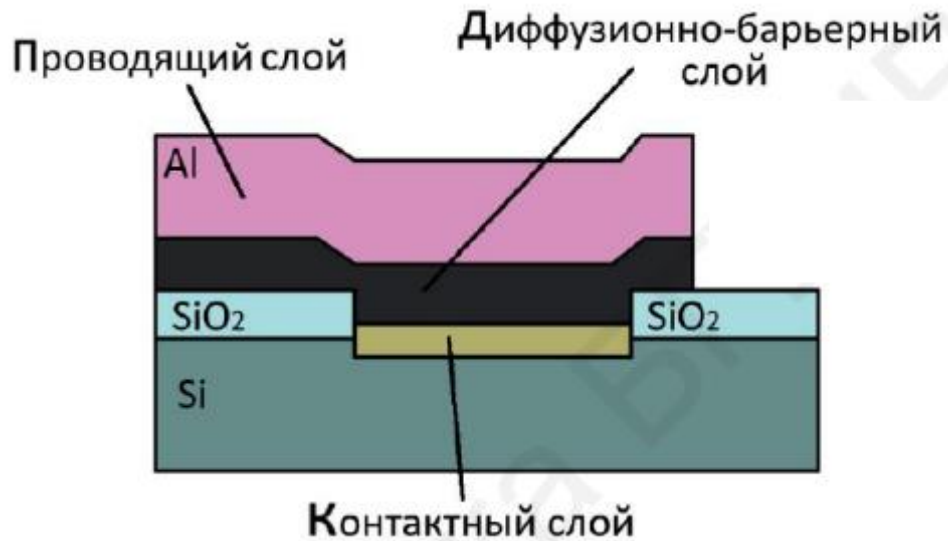
Для сильнолегированного полупроводника важную роль начинают играть процессы туннелирования через барьер:

ϵ_s – диэлектрическая проницаемость кремния, N_d – концентрация легирующей примеси, m^* – эффективная масса носителей заряда.

$$R_c = \frac{k}{qRT} e^{\frac{q\varphi_B}{kT}}$$

$$R_c \approx \exp\left(\frac{4\pi\sqrt{\epsilon_s m^*}}{h} \left(\frac{\varphi_B}{\sqrt{N_d}}\right)\right)$$

контакт Шоттки:

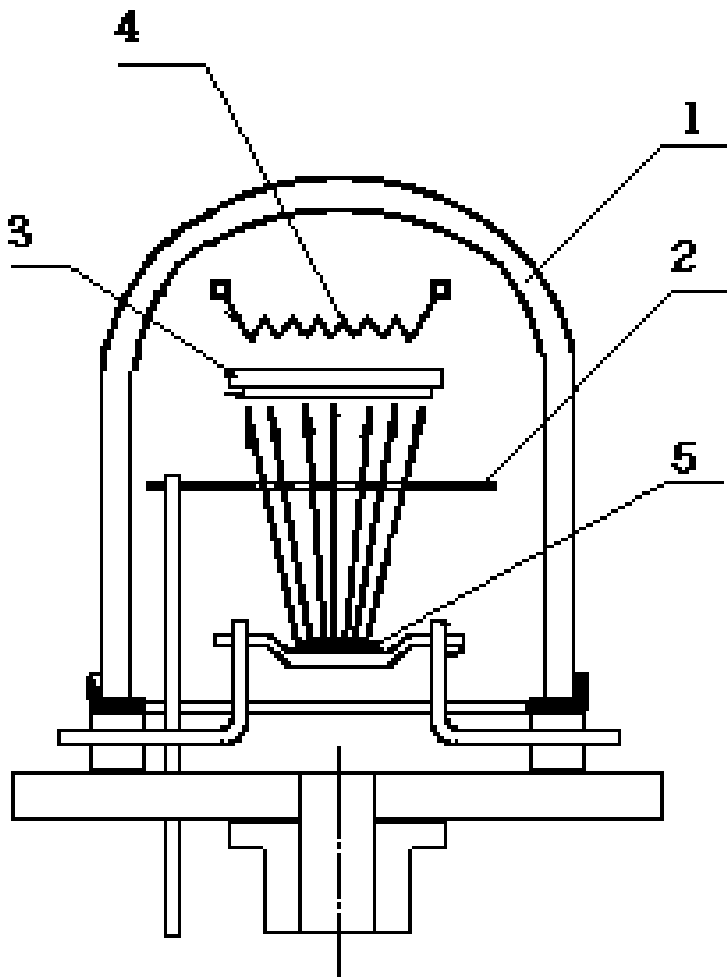


Материал контакта	ϕ для кремния <i>n</i> -типа проводимости, В	ϕ для кремния <i>p</i> -типа проводимости, В
Al	0,72	0,58
Cr	0,61	0,50
Mo	0,68	0,42
Ni	0,61	0,51
Pt	0,90	
Ti	0,50	0,61
W	0,67	0,45

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ: ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ

- **Адгезионный слой** обеспечивает высокую адгезию, т. е. сцепление металлических слоев с диэлектрическими поверхностями (SiO_2 , Si_3N_4 , фосфорно-силикатное стекло, полиимид и др.) и с другими контактирующими элементами. В качестве материала адгезионного слоя используются металлы с высоким сродством к кислороду или высокой теплотой образования оксидов (титан, ванадий, хром).
- **Раскисляющий слой** – это тонкий слой химически активного по отношению к кислороду металла (Ti, Zr, Hf, Ta, Mo), в задачу которого входит очистка поверхности полупроводника от кислорода и других примесей. Это обеспечивает получение качественных контактных слоев силицидов с гладкой межфазной границей силицид-кремний при взаимодействии металла и кремния. В процессе указанного взаимодействия раскисляющий слой расходуется, и продукты его впоследствии химически удаляются.
- **Антиотражающий слой** – слой с низким коэффициентом отражения, что необходимо на операции фотолитографии при совмещении рисунка фотошаблона с ранее созданным на подложке топологическим рисунком. Антиотражающий слой может удаляться после проведения этой операции.
- **Стоп-слой** – тонкий слой, который необходим для остановки процесса сухого травления.

ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ



Одним из наиболее универсальных методов получения плёночных структур самого различного назначения является метод **термовакuumного напыления**, который заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в условиях вакуума на подложке. Этот метод давно и успешно используется в различных областях микроэлектроники, в том числе для металлизации ИС. Высоковакуумные системы откачки создают давление $\sim 6 \cdot 10^{-5}$ Па.

Качество получаемых пленок в значительной мере определяется типом и конструкцией испарителей. В испарителях с *прямым нагревом* ток пропускается непосредственно через испаряемый материал. Достоинство метода – получение особо чистых пленок. Испарители с *косвенным нагревом* бывают: резистивные, индукционные, электронно-лучевые, дугового разряда.

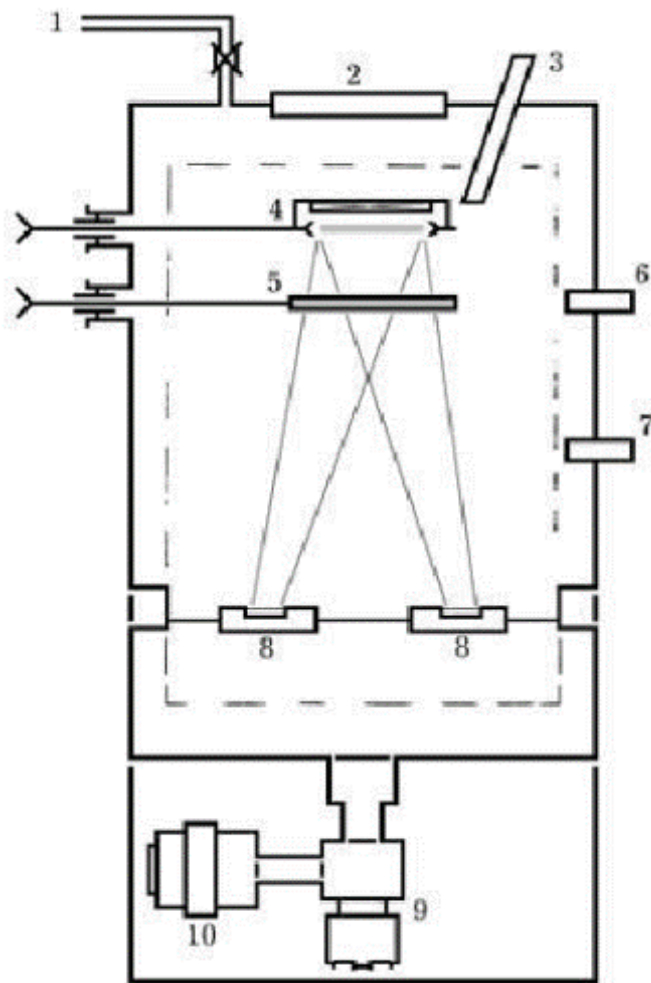
Для формирования молекулярного потока условия в пространстве между испарителем и подложкой должны быть такими, чтобы молекулы испаряемого вещества достигали подложки без столкновений с молекулами остаточных газов. На подложке вокруг отдельных центров кристаллизации происходит рост кристаллов, которые впоследствии срастаются и образуют сплошную пленку.

ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

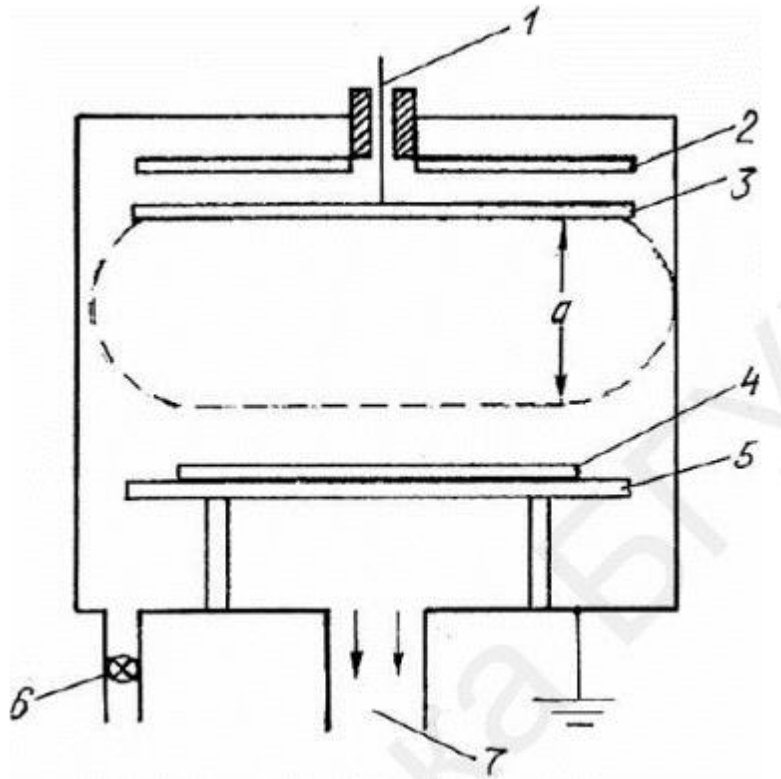
Установка для электронно-лучевого испарения.

Сверху расположен ионный источник (2), позволяющий осуществлять предварительную чистку подложек пучком Ar^+ . В вакуумной камере смонтированы два электронно-лучевых испарителя (8), которые связаны с независимыми блоками управления электронных пушек. Испарители представляют собой тигли, в которые помещается испаряемый материал и катодные узлы. Пучок электронов с катода заворачивается магнитной системой на 270° . Электроны бомбардируют малый участок поверхности мишени, разогревая ее до температуры плавления. В результате происходит испарение материала мишени. Атомы с нее летят преимущественно перпендикулярно поверхности, попадая на подложку через заслонку (5).

Потоки испаряемых веществ контролируются встроенным квадрупольным масс-спектрометром (6). Толщина пленок контролируется с помощью кварцевого резонатора (3). Давление остаточных газов измеряется цифровым вакуумметром, а их состав – встроенным анализатором остаточных газов (7) на базе квадрупольного масс-спектрометра. Подложкодержатель (4) оборудован системой нагрева пластин до температуры $\sim 1000^\circ C$. Расстояние от мишени до подложки составляет 50 см, в результате чего не происходит бомбардирования подложки заряженными частицами.



МЕТАЛЛИЗАЦИЯ



1 – высоковольтный ввод; 2 – экран катода; 3 – катод; 4 – подложка; 5 – анод; 6 – натекатель для рабочего газа; 7 – ввод системы откачки; a – протяжённость катодной области разряда.

Ионно-плазменное осаждение. Осаждение тонких пленок с использованием низкотемпературной плазмы и ионного пучка дают возможность получать пленки различных материалов, которые очень сложно создать термовакuumным методом. При ионно-плазменном нанесении осаждаемый на подложку материал получают путем распыления твердотельной мишени ионами высоких энергий. Важным отличием ионно-плазменного нанесения от термовакuumного является высокая энергия распыленных частиц (3–5 эВ) по сравнению с испаренными (0,15 эВ), что позволяет осаждающимся частицам частично внедряться в подложку, обеспечивая высокую адгезию пленки к подложке.

Диодные устройства ионного распыления на постоянном токе используются только для распыления мишеней из материалов с достаточно высокой электропроводностью. Ионное распыление производят в тлеющем разряде инертного газа с помощью диодной системы (катодное распыление), где мишень из распыляемого материала является катодом, а держатель подложки – заземленным анодом.

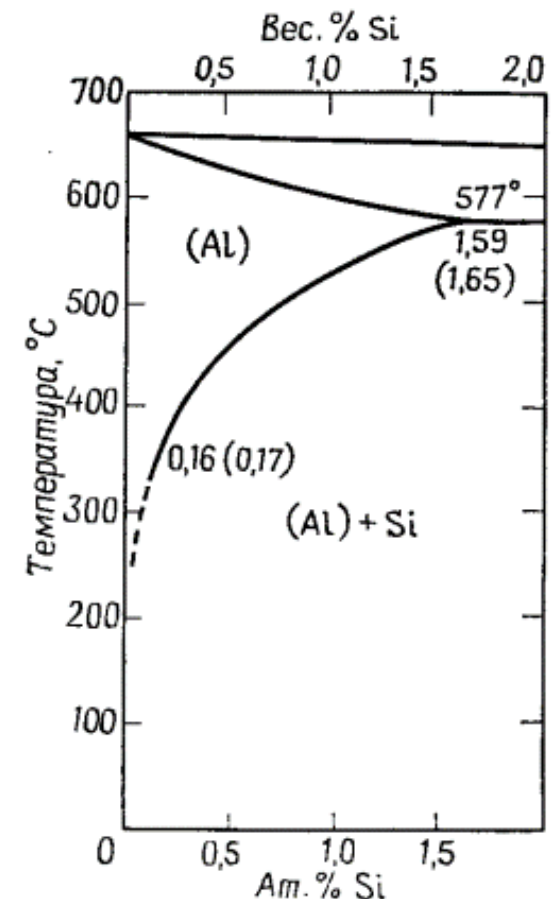
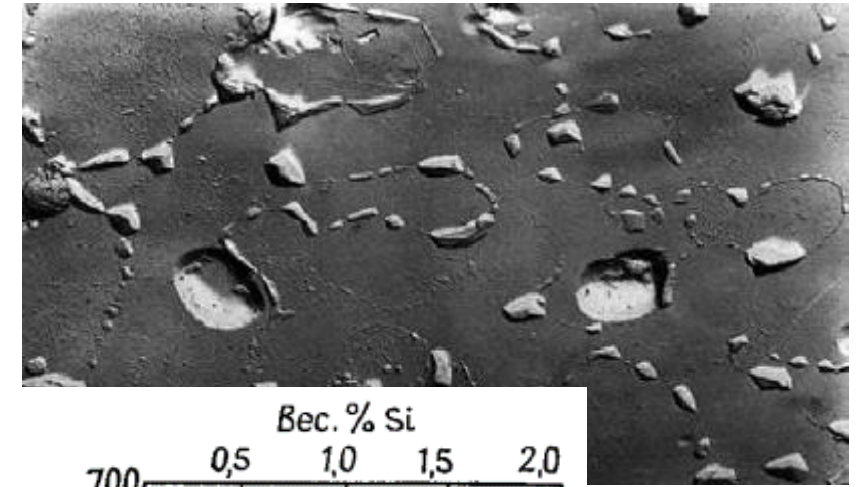
В процессе ионного распыления в диодной системе катод выполняет две функции: является источником электронов для поддержания тлеющего разряда и источником распыляемого материала. Рабочее напряжение в такой системе 1–3 кВ, давление до ~ 10 Па.

ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Для получения стабильного низкоомного контакта и улучшения адгезии алюминия к подложке проводят термообработку алюминия в атмосфере инертного газа в течение нескольких минут при $T = 500\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$. Эта температура ниже температуры затвердевания системы Si–Al, поэтому жидкая фаза не образуется. Термообработка в процессе или после нанесения металла имеет целью растворить приповерхностный загрязненный слой кремния в контактном окне, что на практике всегда обеспечивает улучшение характеристик контакта.

Поскольку алюминий является акцептором по отношению к кремнию, то при создании омических контактов к кремнию n-типа может возникнуть p-n-переход. Чтобы это исключить, область n-слоя вблизи контакта сильно легируют, превращая ее в n^+ -слой с концентрацией доноров 10^{20} см^{-3} и более. Тогда концентрация алюминия оказывается недостаточной для образования p-слоя.

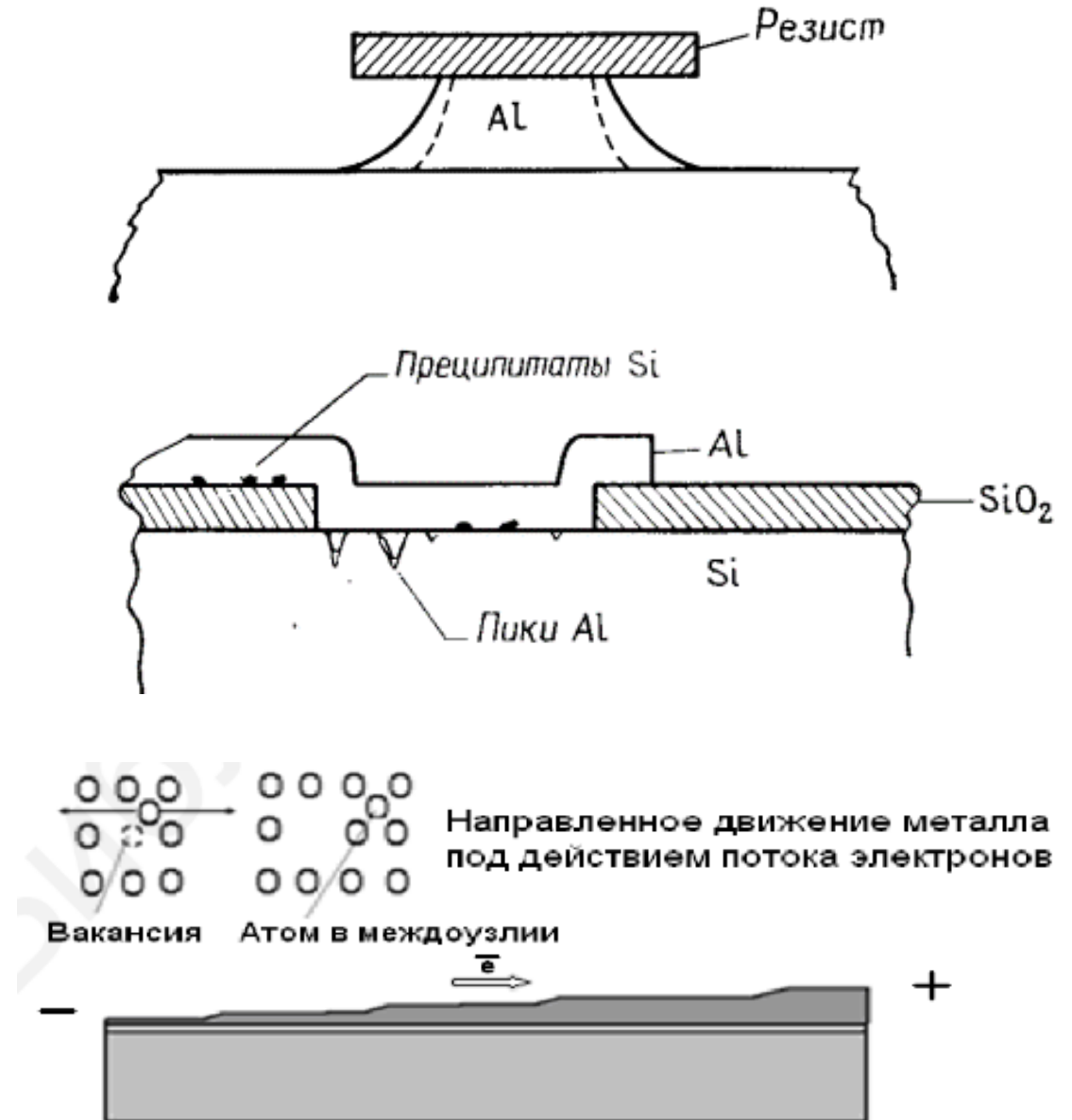
Присутствие кремния в пленках алюминия сдерживает процесс растворения кремния при термообработке и уменьшает вероятность образования глубоких локальных ямок.



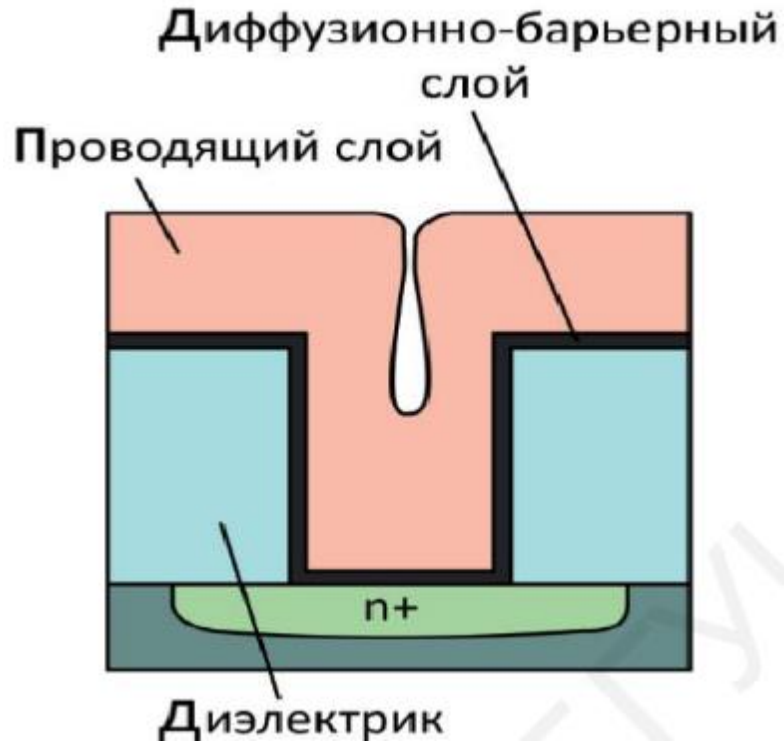
растворение
кремния в
алюминии

ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

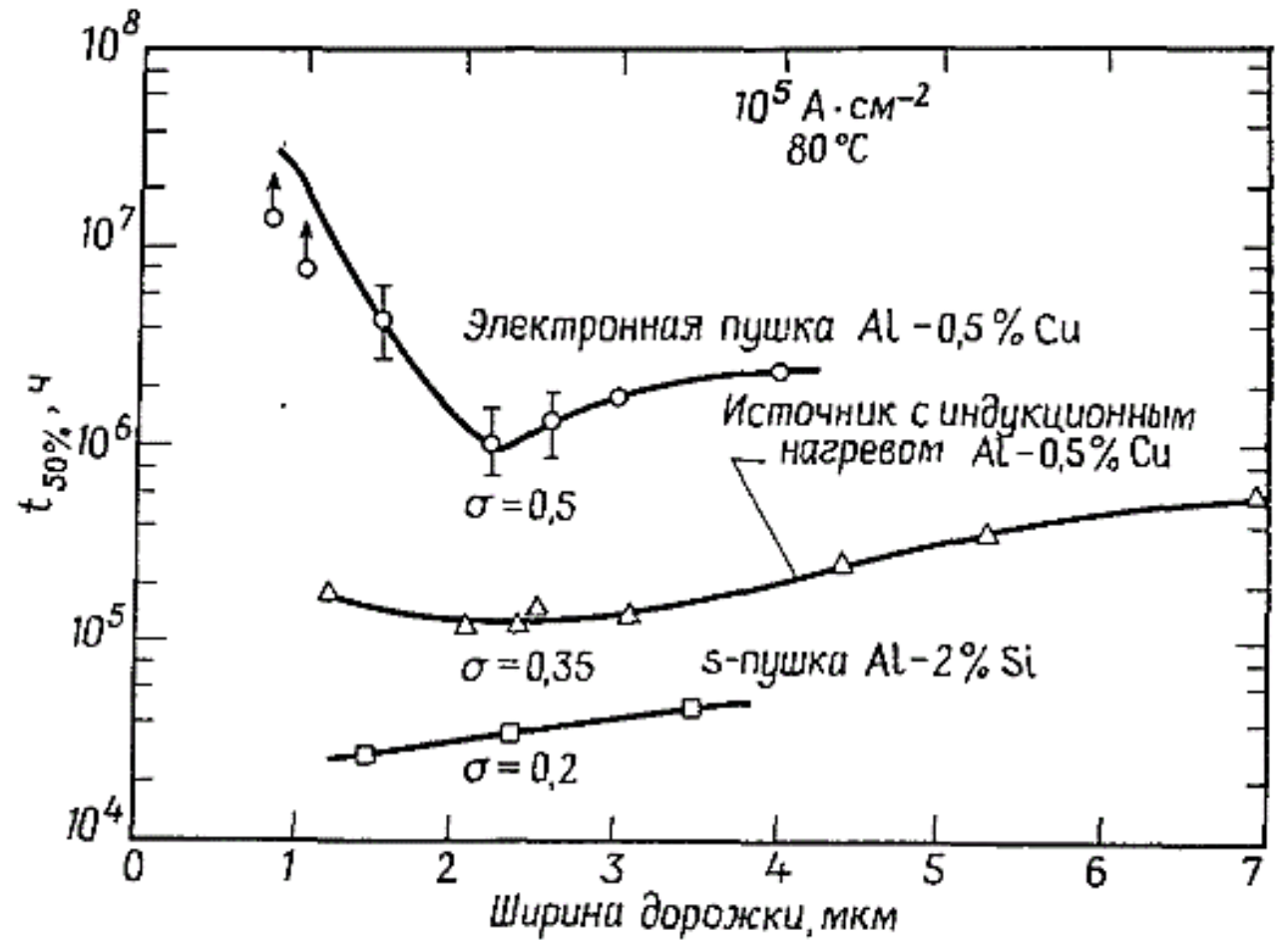
- Равномерность покрытия ступенчатого рельефа на поверхности подложки (без разрывов в углах ступенек)
- Осаждение плёнок на основе сплавов металлов заданного состава
- Получение контакта с низким сопротивлением
- Травление излишков металла (уменьшение ширины линий из-за подтравливания)
- Прокол перехода (проникновение проводящего канала через поверхность p-n-перехода)
- Электромиграция
- Коррозия в среде с высоким содержанием влаги
- Формирование высоких и узких контактных "колодцев"



ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ



Образование пустот при формировании проводящего слоя методом физического осаждения из газовой фазы



Время наработки на отказ (влияние электромиграции) для различных технологий металлизации

СИЛИЦИДЫ МЕТАЛЛОВ

Применение силицидов металлов в качестве омических контактов к тонким (менее 100 нм) слоям кремния – одно из важных направлений технологии ИС. Особенно перспективно использование для этих целей $TiSi_2$. Помимо наименьшего удельного сопротивления силицид титана при взаимодействии с кислородом и окислом кремния образует TiO_2 , который является полупроводником ($E_g \sim 2$ эВ). Окисел титана не препятствует протеканию тока в контакте, лишь незначительно увеличивая его сопротивление.

В качестве материалов для электродов затвора полевых транзисторов используются тугоплавкие металлы W и Mo , а также силициды $TiSi_2$, WSi_2 , $MoSi_2$, $TaSi_2$ и др. Данные силициды стабильны в контакте с поликристаллическим кремнием. В то же время образование летучих окислов чистых W и Mo может привести к разрушению плёнки.

Материал	Характеристика пленки	Удельное сопротивление, мкОм·см
$TiSi_2$	Металл/полукристаллический кремний	13—16
	Пленка, полученная совместным распылением	25
$ZrSi_2$	Металл/полукристаллический кремний	35—40
$HfSi_2$	Металл/полукристаллический кремний	45—50
$TaSi_2$	Металл/полукристаллический кремний	35—45
	Пленка, полученная совместным распылением	50—55
$MoSi_2$	Пленка, полученная совместным распылением	100
WSi_2	Пленка, полученная совместным распылением	70
$CoSi_2$	Металл/полукристаллический кремний	17—20
	Пленка, полученная совместным распылением	25
$NiSi_2$	Металл/полукристаллический кремний	50
	Пленка, полученная совместным распылением	50—60

СИЛИЦИДЫ МЕТАЛЛОВ

Силициды могут быть получены:

- отжигом плёнки металла, нанесённой на поликристаллический кремний
- методами распыления или испарения одновременно из двух источников: металла и кремния
- химическим осаждением из парогазовой смеси с термической или плазменной обработкой

При напылении металла и последующем его сжигании в кремний образующиеся силициды могут иметь три модификации: Me_2Si с температурой образования примерно $200\text{ }^{\circ}C$, $MeSi$ (моносилицид) с температурой образования $400-500\text{ }^{\circ}C$ и $MeSi_2$ (дисицид) с наибольшей (более $600\text{ }^{\circ}C$) температурой образования.

Не все силициды металлов имеют все три модификации, например, Pd, Pt образуют два первых соединения, а Ti и Ta – только два последних.

При формировании силицидов атомы металла диффундируют в кремний по междоузлиям, одновременно идёт диффузия кремния в металл, но она выражена гораздо слабее. Рост силицидов на поликристаллическом кремнии происходит аналогично росту на монокристалле. В присутствии кислорода или паров воды скорость роста силицида уменьшается.

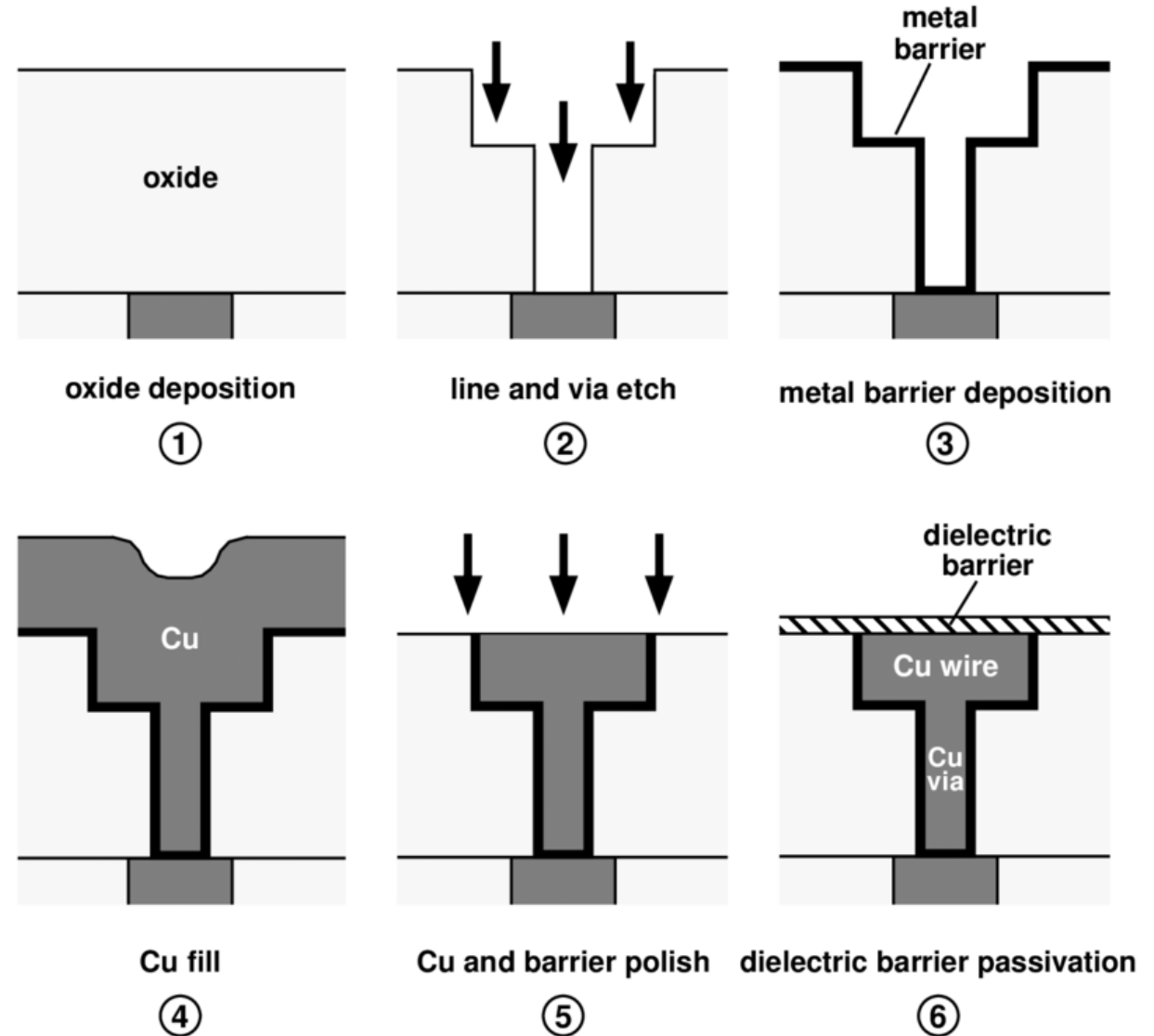
МЕТАЛЛИЗАЦИЯ: МЕДЬ

- Основными преимуществами меди по сравнению с алюминием является более низкое электрическое сопротивление (что увеличивает быстродействие ИС) и стойкость к электромиграции.
- Проблемой использования меди в линиях межсоединений ИС является процесс формирования топологического рисунка. При комнатной температуре медь не образует летучих соединений с плазмой на основе Cl и F. Таким образом, сухое плазменное травление медных пленок затруднено. А химическое травление меди может сопровождаться ее коррозией, так как отсутствие самопассивации делает тонкие медные пленки склонными к окислению во время обработки. Проблема решается нанесением меди с использованием метода "двойной гравировки".
- Другая проблема: медь является хорошим диффузантом в Si и SiO₂ и легко реагирует с силицидами. Медь быстро диффундирует в кремний и может формировать центры с высокоэнергетическими уровнями в запрещенной зоне кремния. Это препятствие может быть преодолено путем использования диффузионных барьеров и пассивирующих слоев при создании медной металлизации.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ: МЕДЬ

Метод двойной гравировки включает формирование шин межсоединений путем первоначального травления канавок или каналов в планарном диэлектрическом слое и последующее заполнение этих канавок металлом. Дополнительно к формированию канавок травится и заполняется ряд отверстий (т. е. контактов к активным областям или к металлу). После заполнения металлом канавок и отверстий пластина "планаризируется" с помощью химико-механической полировки.

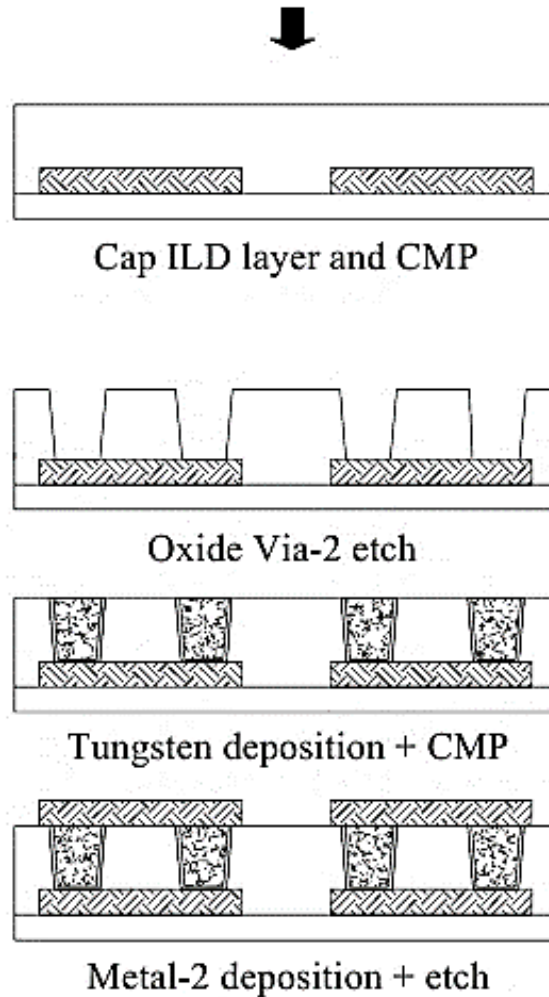
Основным достоинством процесса гравировки является исключение необходимости травления металла. Второе достоинство состоит в исключении необходимости заполнения зазоров в диэлектрике между шинами разводки. Третье достоинство процесса гравировки заключается в том, что он дает возможность обойти некоторые проблемы, связанные с неточностью совмещения фотолитографических слоев, позволяя получать более высокую плотность межсоединений.



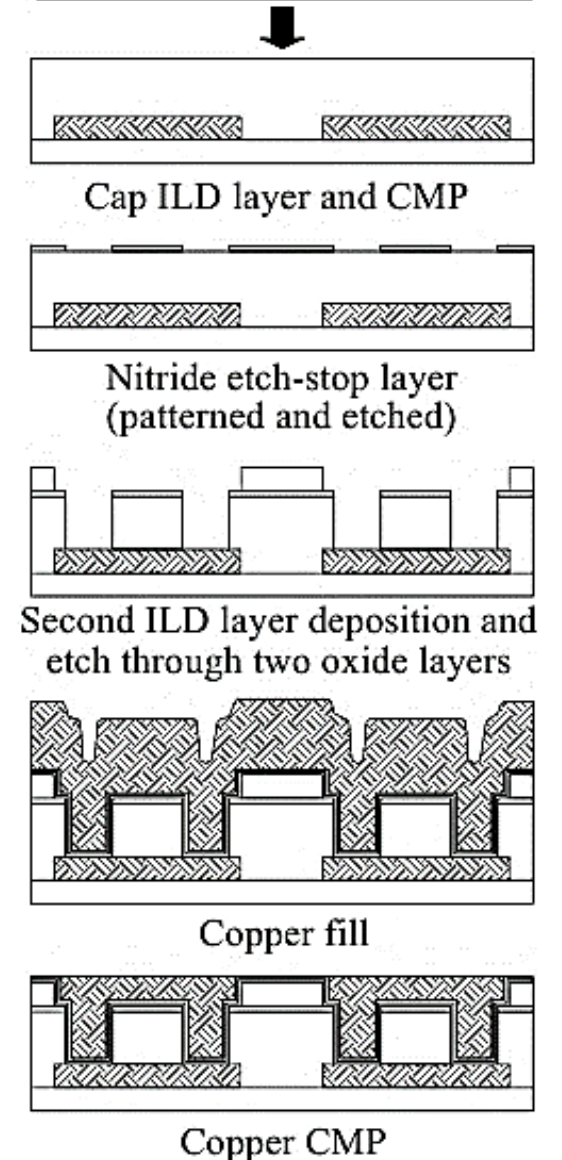
МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Отличительной чертой технологического варианта двойной гравировки с использованием стоп-слоя является применение очень тонкого слоя нитрида кремния, который действует в качестве маски. Нитрид кремния осаждается сверху на диэлектрик в виде топологического рисунка отверстий. Затем осаждается второй уровень диэлектрика сверху нитрида кремния в виде топологического рисунка канавок и травится в верхнем уровне диэлектрика до стоп-слоя нитрида кремния. Однако травление продолжается далее через отверстие в нитриде, формируя тем самым межуровневые отверстия. Преимуществом техпроцесса является то, что в нем присутствует всего одна операция травления и одна операция заполнения углублений металлом.

Traditional Interconnect Flow



Dual Damascene Flow

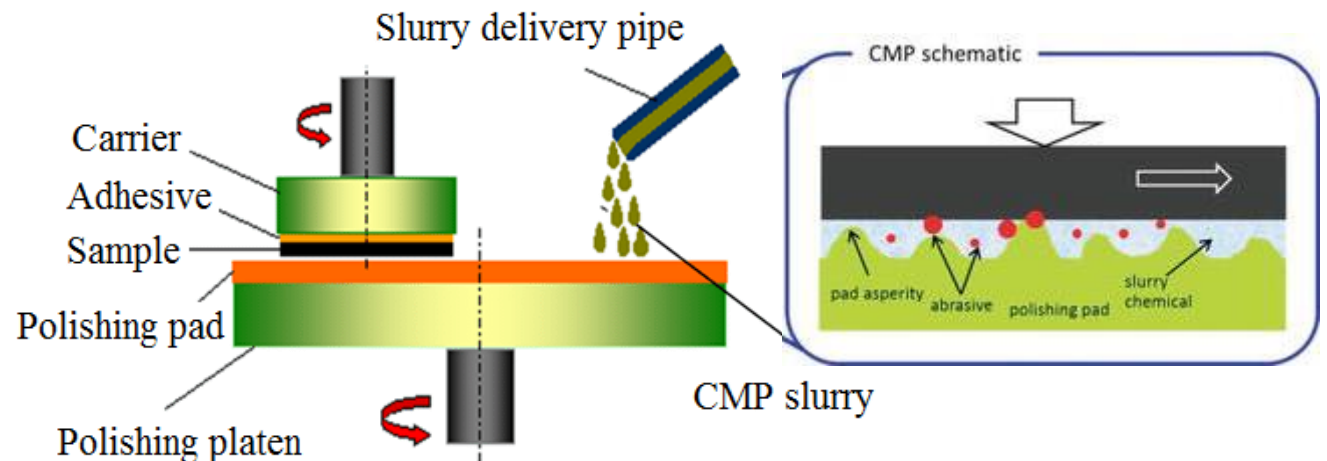


МЕТАЛЛИЗАЦИЯ: ПЛАНАРИЗАЦИЯ РЕЛЬЕФА

Рост количества слоёв межуровневой разводки приводит к тому, что если не предпринимать специальных мер, то, начиная со второго слоя, искажается планарность поверхности пластины. На рельефной поверхности затруднено проведение литографических процессов с требуемой точностью воспроизведения геометрических размеров формируемых рисунков, так как глубина фокуса современных проекционных систем близка к возможной высоте рельефа на полупроводниковой структуре или даже меньше её. Для преодоления данной проблемы была разработана специальная технологическая процедура – *планаризация рельефа*.

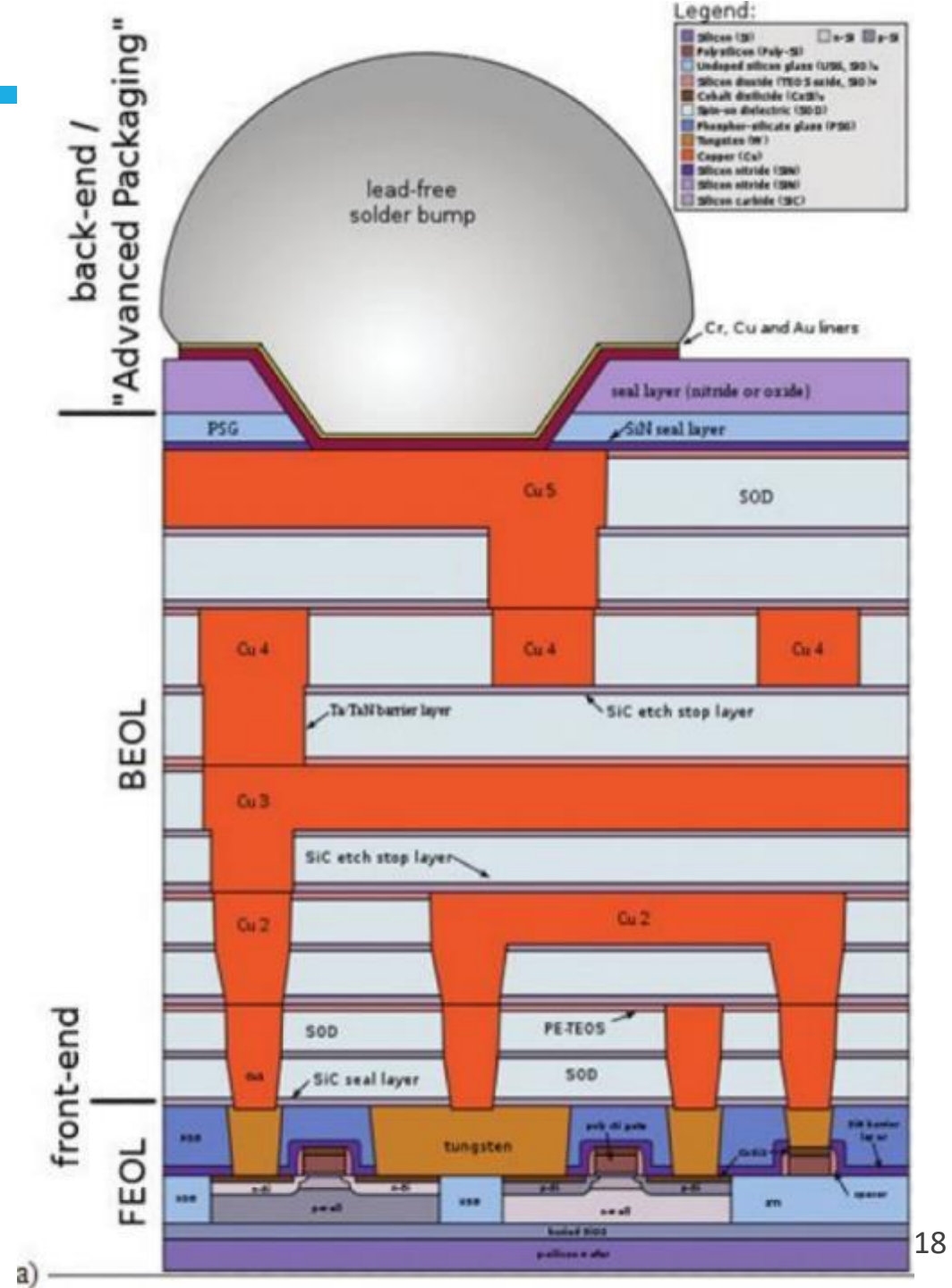
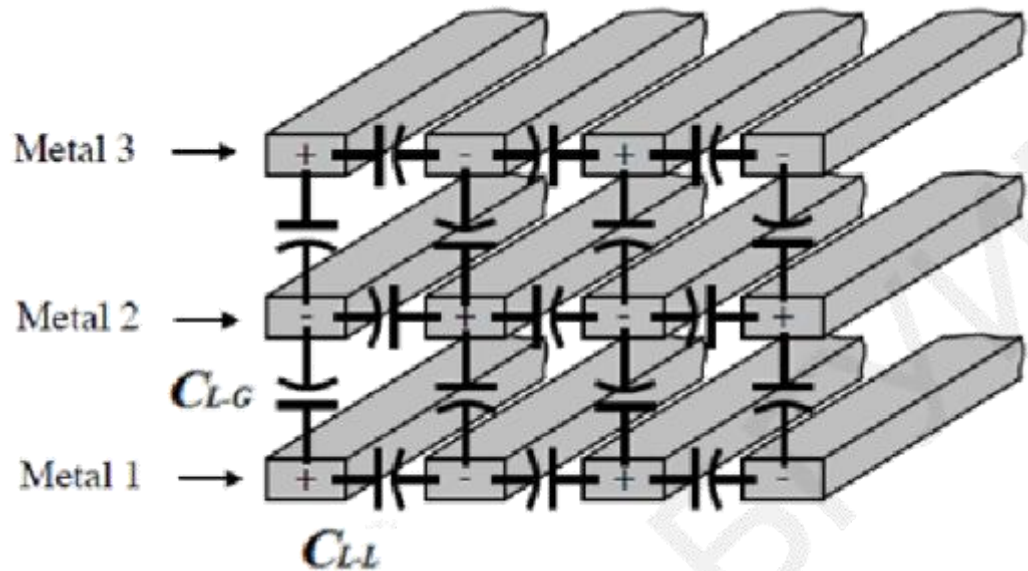
Методы планаризации:

- Оплавление бор-фосфорно-силикатного стекла (межслоевой диэлектрик)
- Травление жертвенного слоя (обычно резиста, покрывающего стравливаемый неоднородный слой оксида: где глубже – там травится медленнее)
- Селективное химическое осаждение вольфрама из газовой фазы (заращивание дефектных "окон")
- Химико-механическая полировка



МЕТАЛЛИЗАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

Несмотря на то что SiO_2 как изолятор имеет много естественных преимуществ применительно к кремниевой технологии, его высокое значение относительной диэлектрической проницаемости (3.9) дает в результате высокие значения потребляемой мощности и RC-задержки в глобальных межсоединениях. Исходя из требований уменьшения паразитной емкости проводников в многослойную структуру межсоединений на технологическом уровне 130 нм были внедрены изолирующие слои с низким значением диэлектрической проницаемости: парилен ($k = 2,3$), деидриглас ($k = 1,5$), ксерогель ($k = 1,3$) и др.



ЭПИТАКСИЯ

- Термин "эпитаксия" применяют к процессам ориентированного выращивания тонких монокристаллических слоёв на монокристаллических подложках. Эпитаксиальный слой – монокристаллический материал, осаждённый на кристаллическую подложку с сохранением её морфологии. Рост кристаллической фазы происходит при температурах ниже температуры плавления.
- Если материал слоя и подложки идентичен – это *автоэпитаксия* или *гомоэпитаксия*. Если материал слоя и подложки различается – это *гетероэпитаксия*. Если эпитаксиальный слой отличается по составу как от подложки, так и от адсорбируемого вещества, говорят о *хемоэпитаксии*.
- Исторически толчком к развитию метода эпитаксии кремния послужило требование улучшения характеристик дискретных биполярных транзисторов. Использование высокоомных эпитаксиальных слоёв на подложках с низким удельным сопротивлением поднимало величину напряжения пробоя при сохранении малого сопротивления коллектора.
- Эпитаксиальные слои кремния обычно не содержат примесей кислорода и углерода, чего нельзя достичь в кремнии, выращенном из расплава. Легирование эпитаксиальных слоёв обычно проводится с концентрацией 10^{14} - 10^{17} см⁻³. Количество дефектов в эпитаксиальном слое определяется чистотой и качеством подготовки поверхности подложек, скоростью и температурой роста.
- Максимально возможная толщина эпитаксиального слоя обычно составляет несколько сотен микрон.

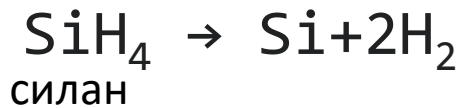
ЭПИТАКСИЯ

Могут быть использованы (в различных сочетаниях) следующие технологические методики:

- **Молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ):**
 - получение монокристаллических слоёв высокой чистоты, так как их рост осуществляется в сверхвысоком вакууме при высокой чистоте потоков веществ
 - выращивание многослойных структур с резкими изменениями состава на границах слоёв благодаря относительно низкой температуре роста, препятствующей взаимной диффузии
 - получение гладких бездефектных поверхностей при гетероэпитаксии
 - получение нанослоёв с контролируемой толщиной за счёт точного управления потоками и малых скоростей роста
 - создание структур со сложными профилями состава и легирования, а также одномерных и нульмерных наноструктур (в зависимости от особенностей агрегации атомов на поверхности подложки и условий осаждения)
- **Осаждение из газовой фазы (CVD)**
- Осаждение из газовой фазы **металл-органических реагентов (MOCVD)**
- **Химическое** осаждение из газовой фазы (ALD)
- **Плазменно-химическое** осаждение из газовой фазы (PE CVD)

ГАЗОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ

Процесс проводится при атмосферном или пониженном давлении в специальных реакторах вертикального или горизонтального типа. Реакция идёт на поверхности подложек (полупроводниковых пластин), нагретых до 400—1200 °С (в зависимости от способа осаждения, скорости процесса и давления в реакторе).



Для выращивания эпитаксиального кремния используются четыре кремнийсодержащих вещества: тетрахлорид кремния (SiCl_4), трихлорсилан (SiHCl_3), дихлорсилан (SiH_2Cl_2) либо силан (SiH_4).

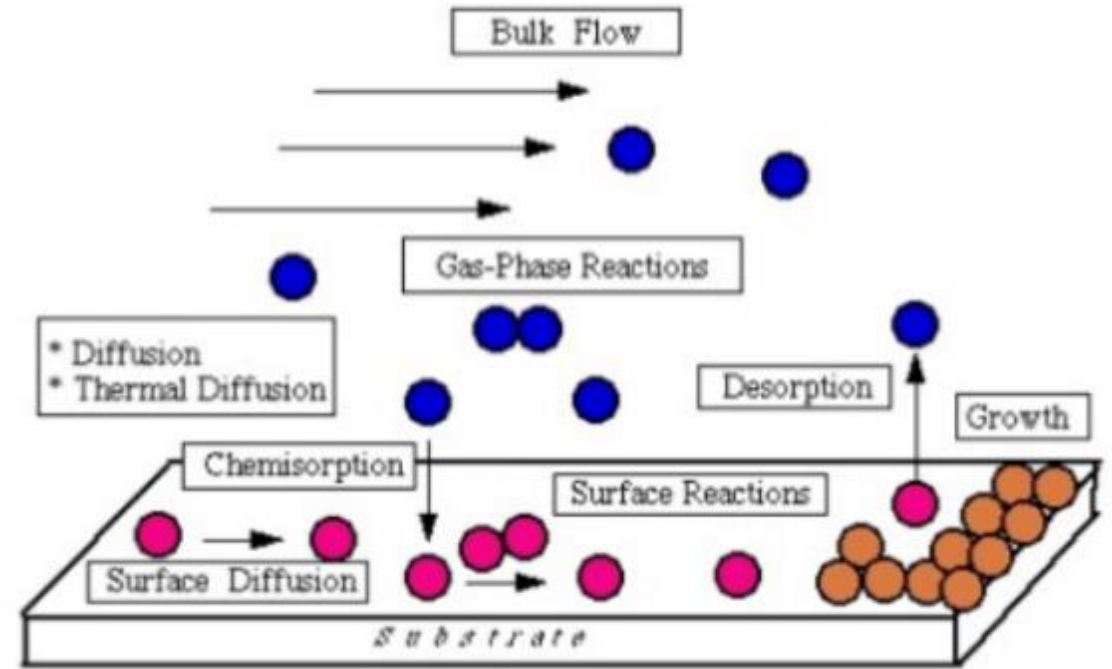
Кроме формирования эпитаксиального слоя, необходимо обеспечивать в нём определённую концентрацию примесей, для чего в процессе эпитаксии добавляют к газам один из гидридов примесных элементов: AsH_3 , PH_3 , B_2H_6

Эпитаксия германия. Осаждение проводят при 800 °С и концентрации тетрахлорида германия 0.2%. Оптимальное значение скорости потока смеси зависит от способа её подачи, конструкции реактора и составляет обычно не более 20 см/с. Скорость роста слоя ~500 нм/мин. Хлоридный метод используется чаще, чем гидридный.

ГАЗОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ

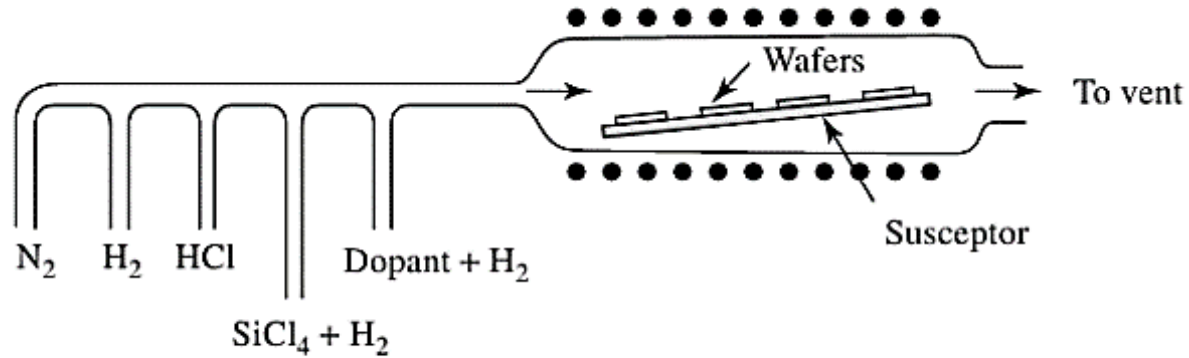
Основным условием образования на поверхности зародышей роста является создания пресыщения, т.е. такого состояния, при котором количество поступающих атомов на поверхность больше количества покидающих её.

Наиболее благоприятные места для встраивания атомов в кристаллическую решётку расположены на боковой поверхности атомарных ростовых ступеней. При подходящих условиях на поверхности образуется мало растущих зародышей, вероятность их разориентации мала и атомы, присоединяясь к зародышам, образуют ростовые ступени, которые постепенно заполняют всю поверхность.

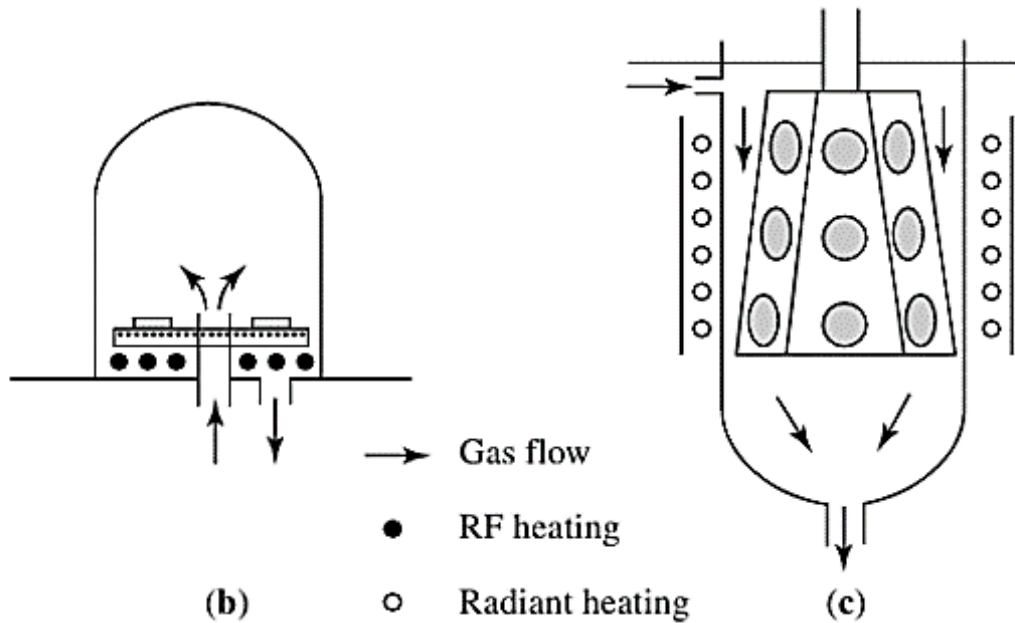


Хлоридный метод ($\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$) обеспечивает высокое совершенство плёнки, но требует повышенных температур. Гидридный метод (SiH_4) проводится при низких температурах, там, где критичными являются процессы автолегирования бором или мышьяком и необходимо слабое размытие профиля примеси скрытого слоя.

РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ РЕАКТОРОВ

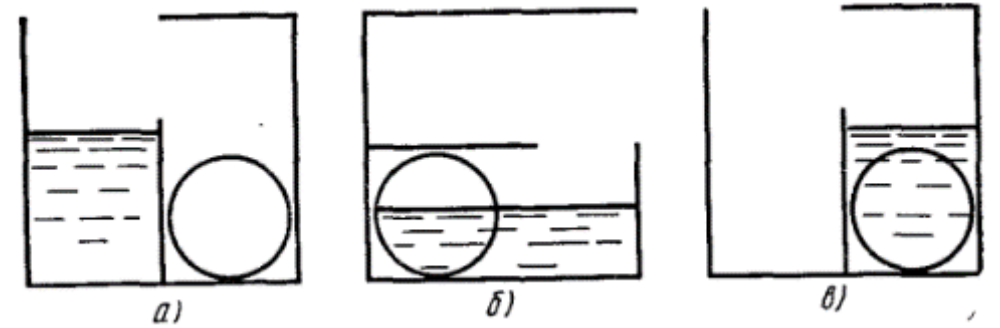


(a)



(b)

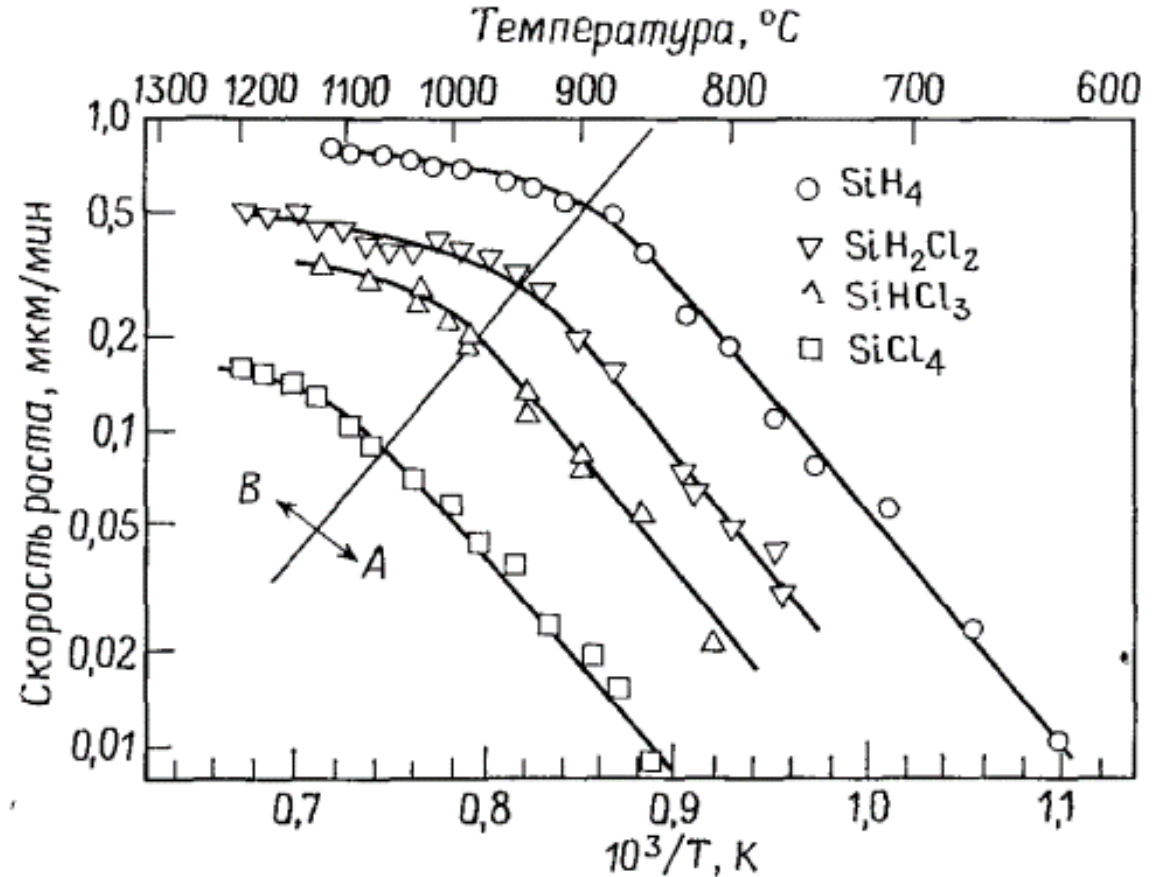
(c)



Жидкофазная эпитаксия применяется весьма ограниченно, в основном для III-V полупроводников.

ГАЗОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ

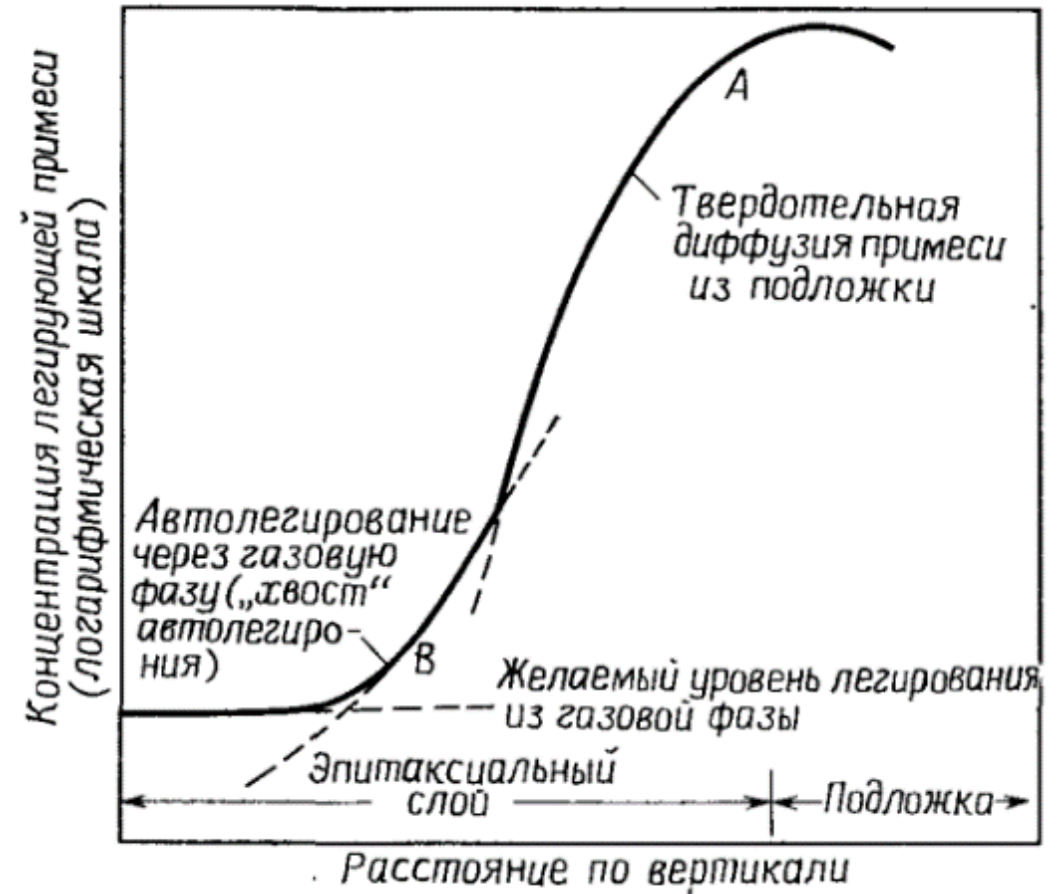
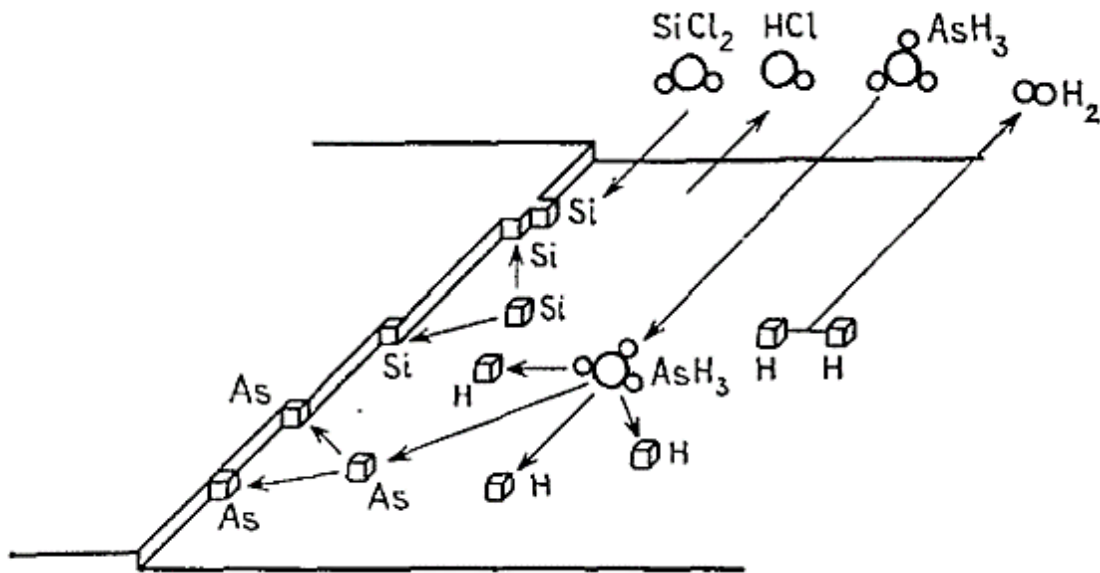
- Перед нанесением эпитаксиального слоя обычно проводится химическая отмывка подложек и газофазное травление безводным HCl при температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$.
- Подложкодержатель должен быть механически прочным, нагреваться до высокой температуры ($900\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$) и не вступать в химические реакции с газами. Обычно используют графит, стеклографит, пироуглерод.
- Реакционную трубу (колпак) обычно изготавливают из кварца. В большинстве схем реакторов труба имеет относительно низкую температуру ("реактор с холодной стенкой"). Давление в реакторе ниже либо эквивалентно атмосферному.
- Газ разлагается на поверхности пластины и на нее осаждаются атомы кремния. Разложение кремнийсодержащих компонент происходит пиролитически, т.е. только за счет тепла. Скорость роста пленки пропорциональна парциальному давлению газа.



В области **А** скорость процесса определяется скоростью химической реакции на поверхности. В области **В** скорость процесса регулируется парциальным давлением кремнийсодержащего реагента в газе-носителе.

ЛЕГИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ

Введение примесей в состав газообразных веществ производят с использованием гидридов примесных элементов - арсина AsH_3 , фосфина PH_3 , диборана B_2H_6 и некоторых других газов, добавляемых в водород.

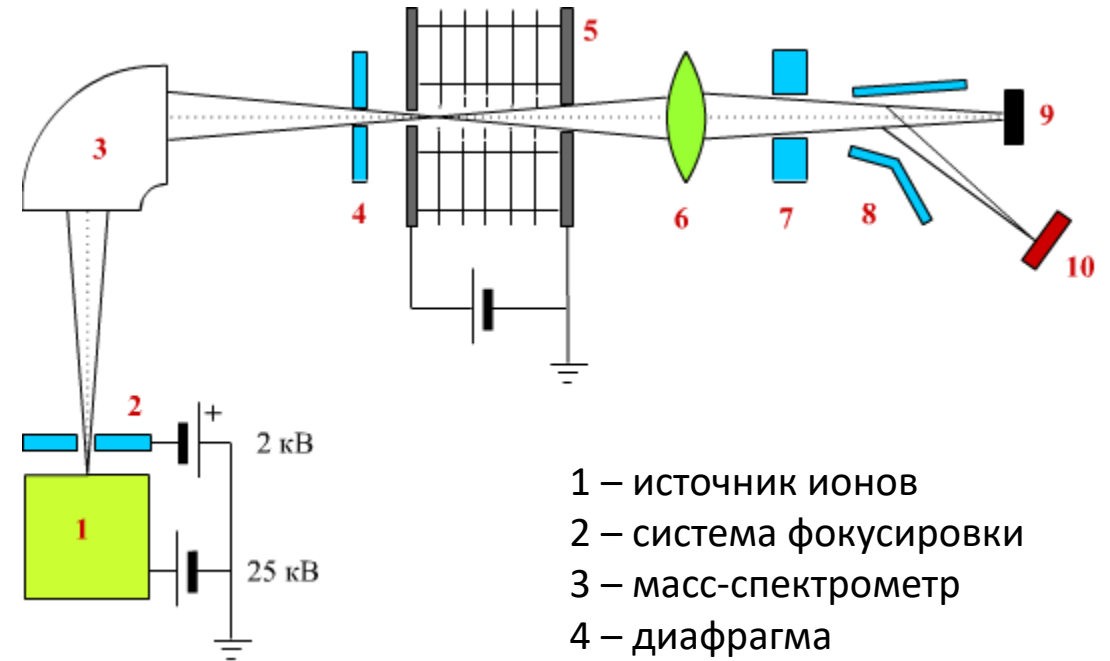


Кроме намеренно вводимой примеси в растущий слой входят и неконтролируемые примеси – идёт *автOLEгирование*. Примеси внедряются в растущий слой за счет твердотельной диффузии через границу слой-подложка, а также за счет испарения и переноса через газовую фазу.

ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

- Ионная имплантация обеспечивает однородные и воспроизводимые профили концентрации, задаваемые посредством управления потоком ионов. Можно точно контролировать поверхностную концентрацию легирующей примеси и ионный состав.
- Ионная имплантация хорошо согласуется с планарной кремниевой технологией. Оксидные слои можно использовать и как маски, и как рассеиватели.
- Ионная имплантация является низкотемпературным процессом, хотя и требующим последующего отжига.

Ионной имплантацией называется процесс внедрения в мишень ионизованных атомов с энергией, достаточной для проникновения в ее приповерхностные области.

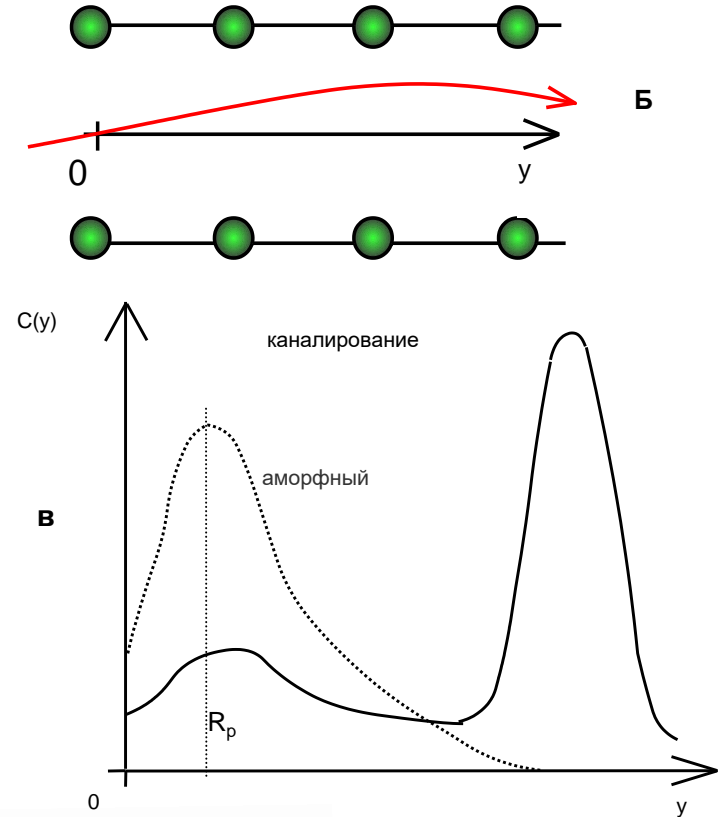
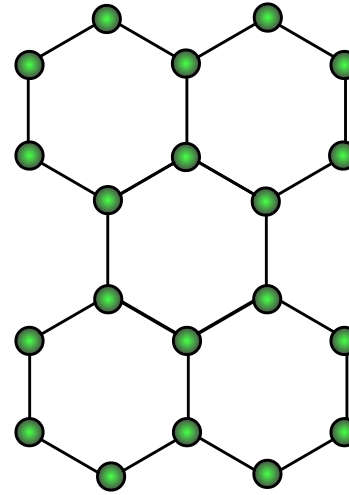


Уровень легирования и распределение примеси в полупроводнике определяются величиной потока и энергией ионов.

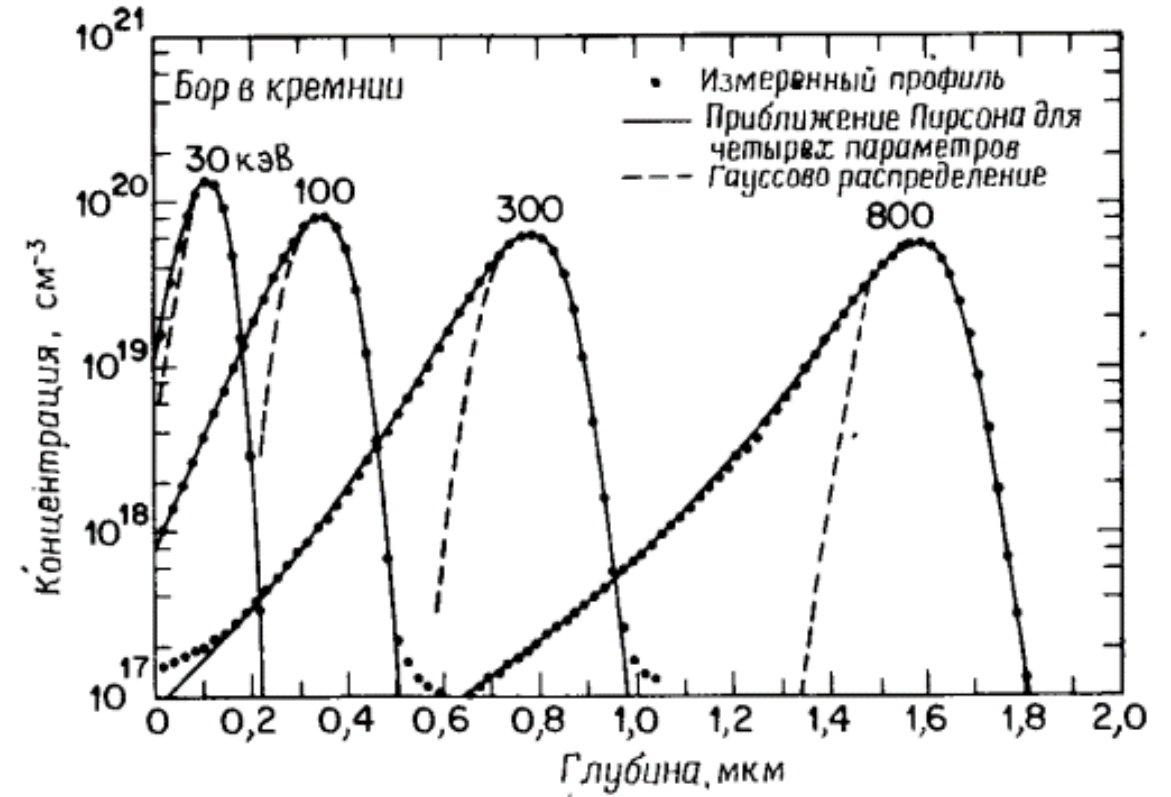
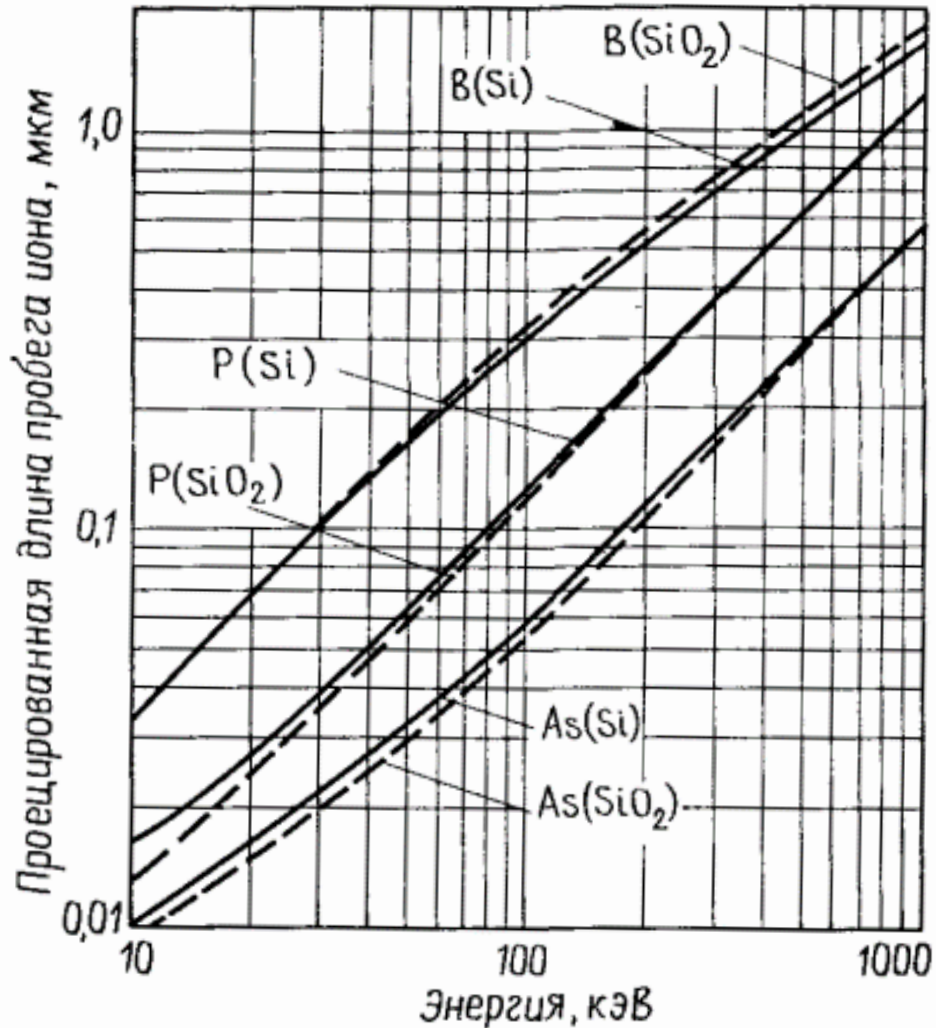
- 1 – источник ионов
- 2 – система фокусировки
- 3 – масс-спектрометр
- 4 – диафрагма
- 5 – ускоряющая трубка
- 6 – система фокусировки
- 7 – отклоняющая система
- 8 – система поворота пучка
- 9 – мишень для поглощения нейтральных частиц
- 10 – подложка + электрометр

ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

- Ионы, ускоренные электрическим полем, проникают в кристаллическую решётку, преодолевая отталкивающее действие атомных остовов. Глубина проникновения ионов зависит от их энергии и от вида имплантируемого материала. Лёгкие ионы проникают более глубоко, нежели тяжёлые, однако траектории движения тяжёлых ионов более прямолинейны. Энергия легирующих ионов бора, фосфора и мышьяка от 3 до 500 кэВ достаточна для их внедрения в кремний на глубину 10-1000 нм.
- При точной ориентации направления падения пучка ионов вдоль одной из кристаллических осей пластины полупроводника часть ионов движется внутри широких каналов, свободных от атомов. Попав в канал, ионы испытывают существенно меньшее торможение и проникают в подложку в несколько раз глубже, чем в случае разориентированного пучка.



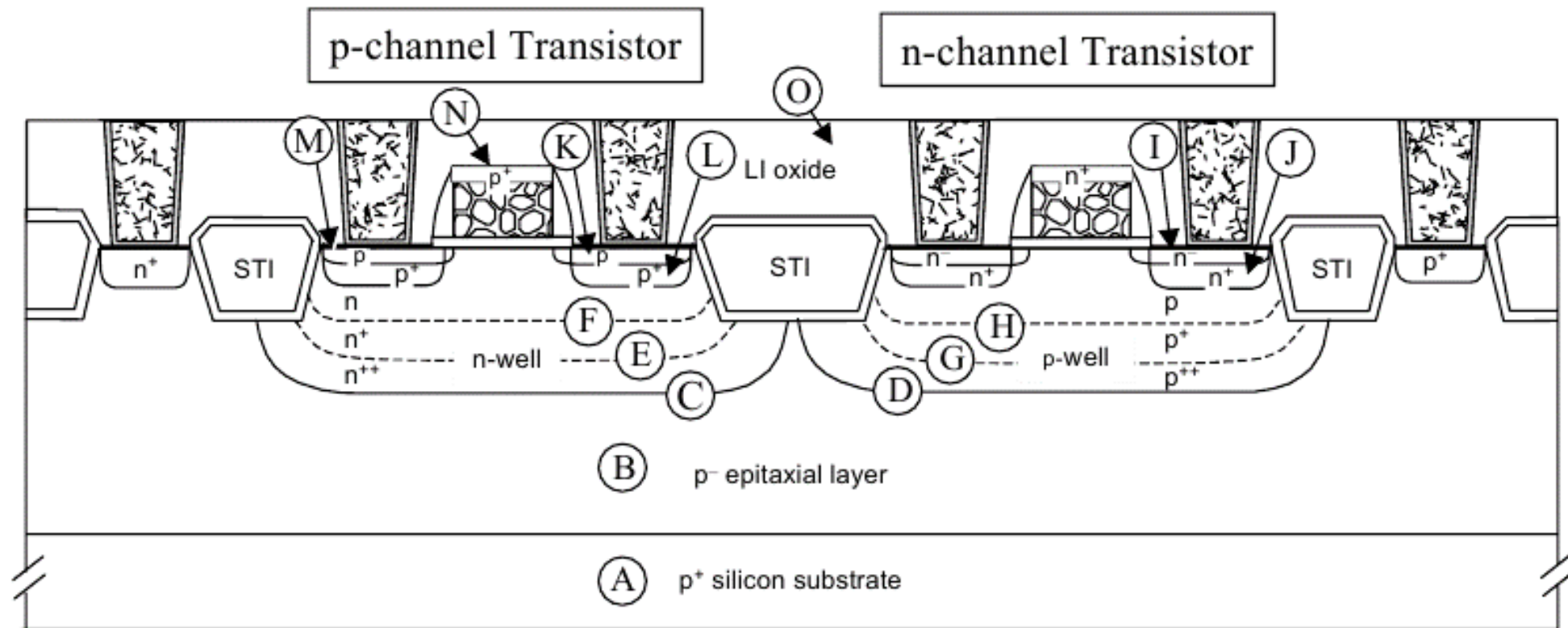
ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ



Для аппроксимации распределения концентрации As и P используется "сдвоенная" функция Гаусса. Распределение бора хорошо аппроксимируется статистическим распределением Пирсона IV.

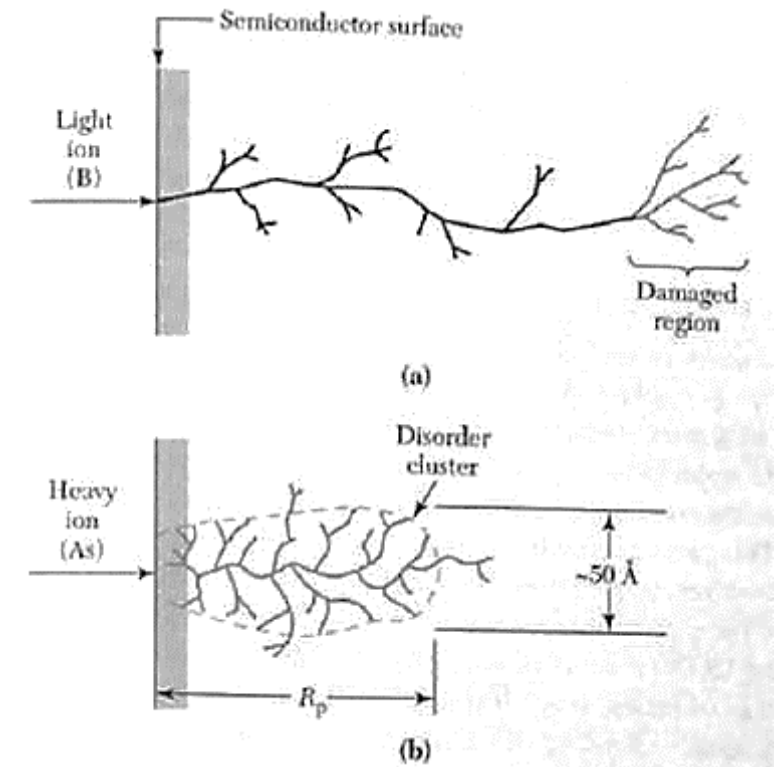
МЕСТО ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В СТЕКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИС

CMOS Structures with Doped Regions



ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

- При имплантации ионов в кристаллическую решётку кремния они подвергаются электронным и ядерным столкновениям, однако только ядерные взаимодействия приводят к смещению атомов кремния. Число смещённых атомов кремния обычно всегда больше числа имплантированных ионов. При этом возникают как электронные, так и дырочные ловушки.
- Лёгкие ионы (B) при внедрении в подложку первоначально испытывают в основном электронное торможение и теряют большую часть энергии до того, как начинают взаимодействовать с атомами. В этой связи дефектообразование от таких ионов преобладает в глубине подложки. При имплантации ионов бора с энергией 300 кэВ и дозой 10^{13} см^{-2} концентрация радиационных дефектов $\sim 7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.
- При внедрении тяжёлых ионов (P, As) они сразу начинают взаимодействовать с атомами кремния, что приводит к сильному дефектообразованию непосредственно вблизи поверхности и вглубь подложки на расстоянии средней длины свободного пробега атома кремния. Концентрация радиационных дефектов в этом случае может быть $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$. При таких условиях каждый атом мишени испытывает смещение, и материал мишени становится *аморфным*. Однако повышение температуры подложки предотвращает поверхностную аморфизацию кремния при ионной имплантации.

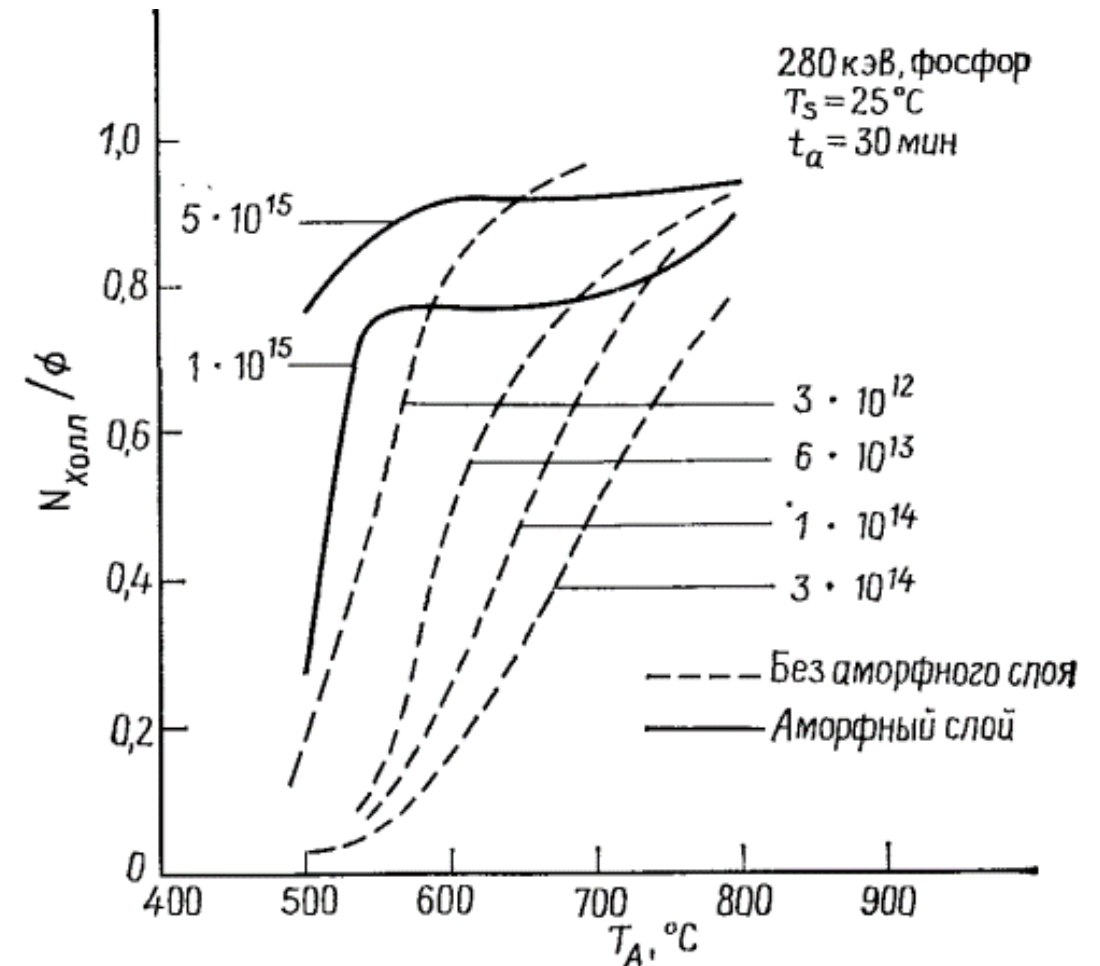


ОТЖИГ (МЕДЛЕННЫЙ И БЫСТРЫЙ)

В процессе ионного легирования важна операция отжига, при которой устраняются радиационные дефекты и "активизируются" внедренные атомы. Режим отжига зависит от дозы облучения. Для малых доз температура отжига составляет примерно 260 °С, для больших $T_{\text{отж}} = 570$ °С. При температуре ~ 600 °С протекает процесс *эпитаксиальной перекристаллизации*.

Обычно во время отжига имеет место *диффузия* примеси внутри кристалла, которая приводит к изменению результирующих профилей распределения концентрации. Обычно граница между понятиями "отжиг" и "диффузия" лежит вблизи 1000 °С. При температурах < 1000 °С эффектом диффузии (иногда) можно пренебречь.

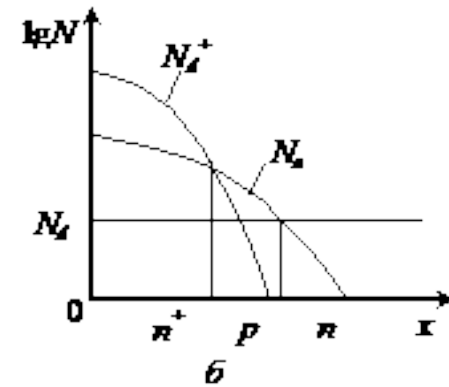
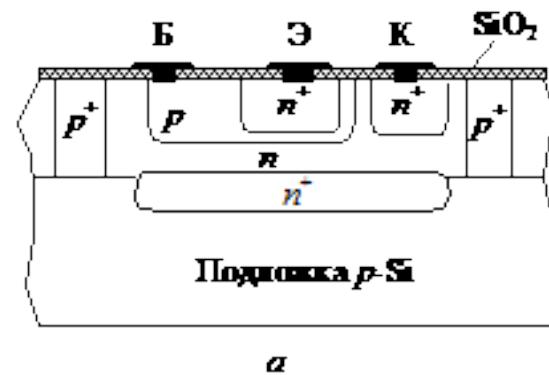
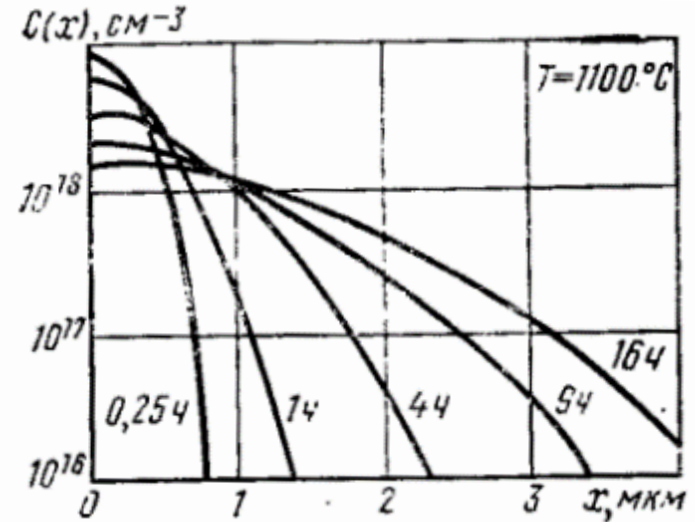
Импантированные слои могут быть подвергнуты лазерному отжигу с плотностью энергии в диапазоне 1-100 Дж/см². Вследствие короткого времени нагрева импантированные слои могут быть обработаны без заметной диффузии примеси. В процессе импульсного лазерного отжига происходит расплавление аморфного кремния с его последующей кристаллизацией в бездефектном состоянии.



Зависимость концентрации свободных носителей заряда от температуры отжига для различной дозы имплантации фосфора (при постоянном времени отжига)

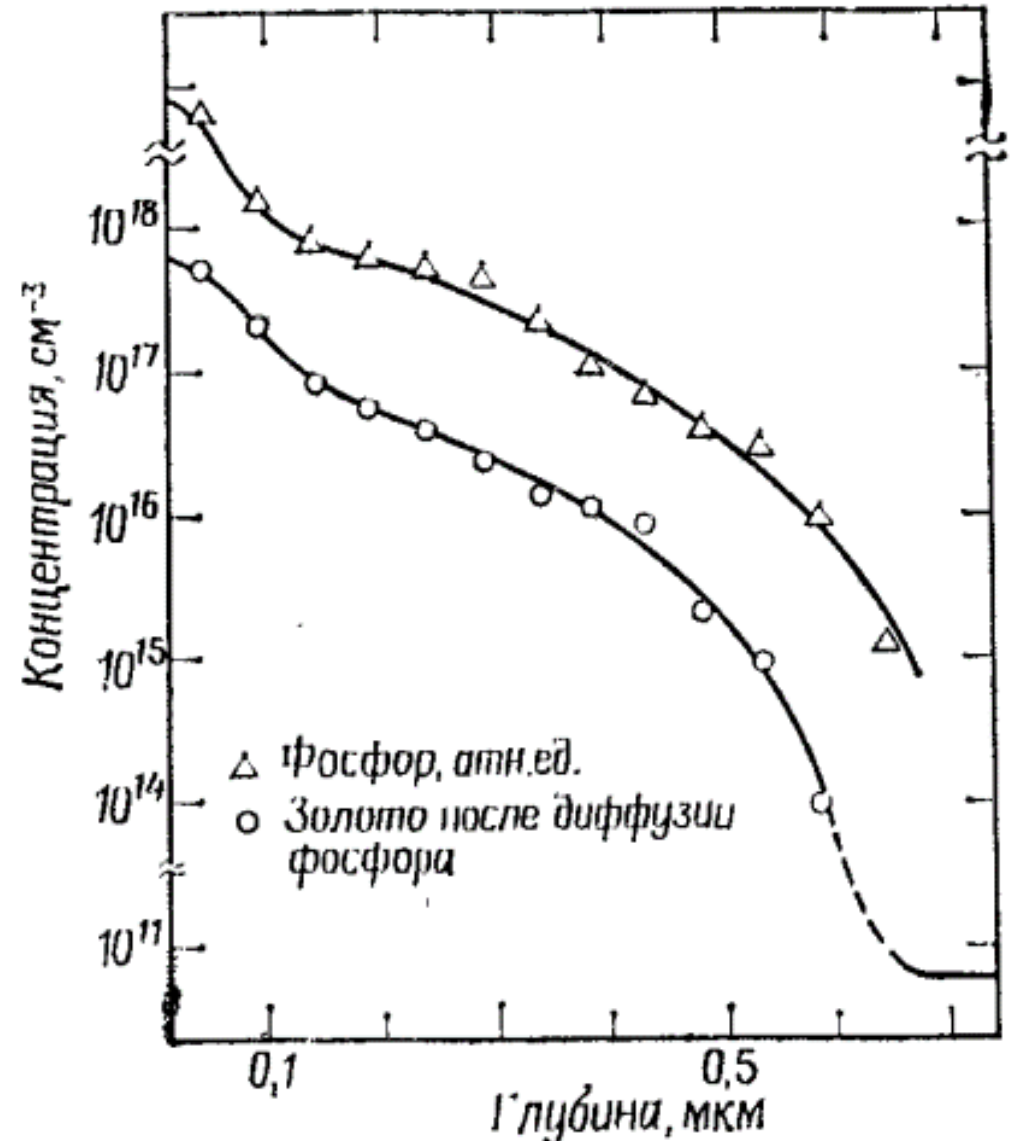
ДИФФУЗИЯ ПРИ ОТЖИГЕ

- Одним из наиболее распространённых приёмов в технологии ИС является сочетание ионной имплантации и диффузии. Ионная имплантация используется для предварительной загонки в пластину строго фиксированного количества примеси, а диффузия служит для последующей разгонки внедрённой примеси с целью обеспечения нужного профиля распределения примесных атомов с требуемой глубиной залегания.
- В тех случаях, когда для постимплантационного отжига нет возможности использовать быстрый термический отжиг, в целях предотвращения расплывания профиля легирования применяется отжиг при пониженной температуре (600-900 °С). Однако и в этих случаях наблюдается радиационно-ускоренная диффузия примеси, хотя параметры этого процесса отличаются от наблюдаемых при быстром отжиге. Особенно заметно это явление при легировании кремния бором при его концентрации меньше $2n_i$ (при температуре отжига). Предполагалось, что при низкой температуре ускорение диффузии объясняется взаимодействием примеси с нейтральными точечными дефектами.

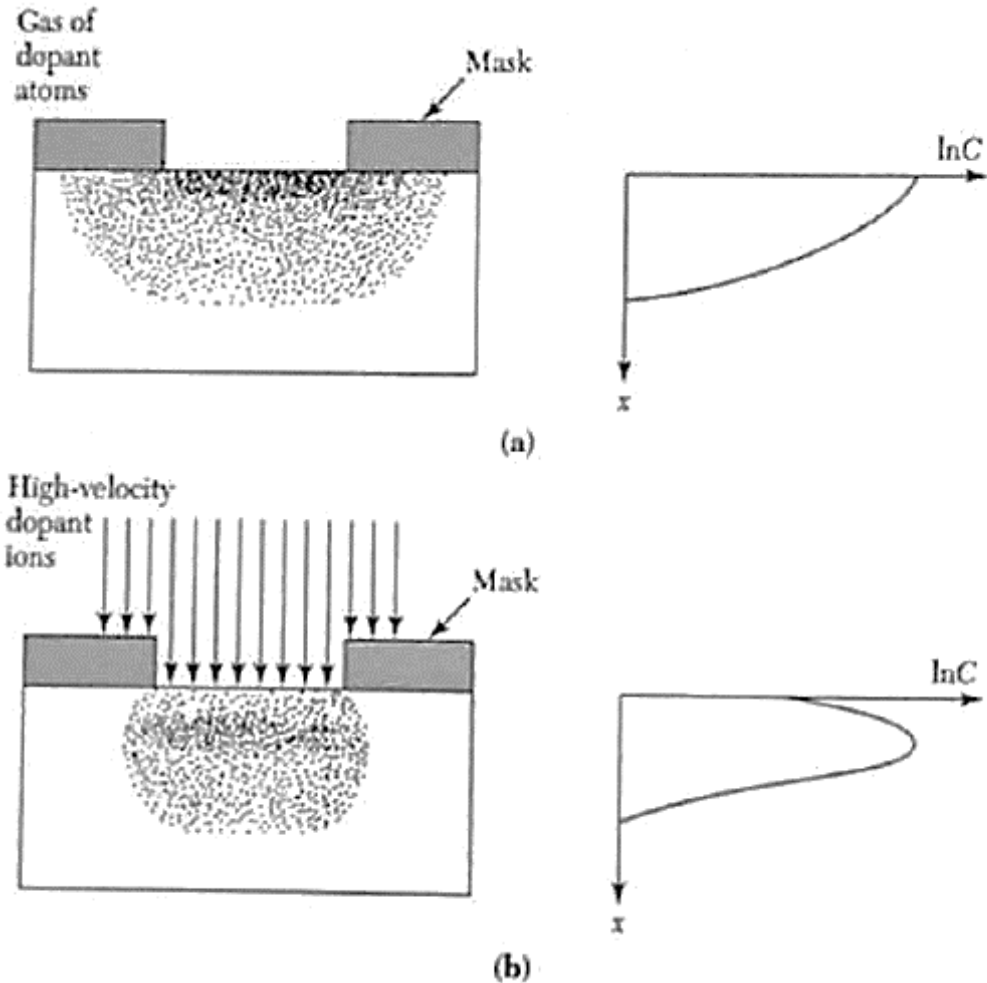


ГЕТТЕРИРОВАНИЕ

- *Геттерирование* есть удаление нежелательных примесей или дефектов из активной области полупроводника. Использование геттерирования помогает улучшить рабочие характеристики р-n-переходов планарных транзисторов.
- Одним из способов геттерирования является захват атомов нежелательной примеси на дефекты, которые образуются в результате ионной имплантации. Для этого атомы примеси должны высвободиться, диффундировать и быть захваченными на дефектах.
- Диффузия фосфора удачно подходит для геттерирования атомов меди, которые обычно находятся в междоузлиях и легко диффундируют. Однако в области полупроводника, легированного фосфором, ионизованные атомы меди занимают узлы кристаллической решётки, создавая при этом сильную связь с положительно заряженными ионами фосфора.



ЛЕГИРОВАНИЕ ДИФфуЗИЕЙ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ



Перенос примеси при диффузии (гетеродиффузия) вследствие хаотического теплового движения атомов осуществляется в направлении убывания градиента концентрации.

Теория диффузии (Я. Френкель, Р. Вагнер и В. Шоттки) предполагает три механизма:

- 1) взаимный обмен мест, как в идеальном кристалле;
- 2) диффузия по междоузлиям (междоузельный механизм)
- 3) диффузия по вакантным узлам (вакансионный механизм)

Диффузия элементов I (Li, K, Na, Cu, Au, Ag) и VIII (Fe, Co, Ni) групп с малыми ионными радиусами происходит по междоузельному механизму, а диффузия элементов III (B, Al, Ga, In) и V (P, Sb, As) групп – по вакансионному. Растворимость примесей в германии и кремнии уменьшается от III группы к I, поскольку в междоузельном пространстве может разместиться гораздо меньше атомов, чем в вакансиях.

ДИФФУЗИЯ: ЗАКОНЫ ФИКА

1855 г.

- **Первый закон Фика** определяет скорость проникновения → атомов одного вещества в другое при постоянной во времени величине потока этих атомов и неизменном градиенте концентрации. Представлено уравнение для плотности потока атомов примеси в одномерном случае.
- **Коэффициент диффузии** – это скорость, с которой система → способна при заданных условиях выравнять разность концентраций. Эта скорость определяется температурой и зависит от энергии связи примесных атомов в решетке, количества вакансий, постоянной решетки и частоты колебаний атомов решетки.
- **Второй закон Фика** определяет скорость накопления → растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной к направлению диффузии. Представлено уравнение для одномерного случая.
- Предполагается, что один вид примеси диффундирует независимо от любого другого и что скорость диффузии, т.е. коэффициент диффузии не зависит от концентрации.

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

D – коэффициент диффузии; dC/dx – градиент концентрации.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

D_0 – частотный фактор (постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре);
 ΔE – энергия активации примеси.

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C}{dx^2}$$

dC/dt – изменение концентрации диффундирующего вещества в зависимости от времени

ДИФФУЗИЯ: ЗАКОНЫ ФИКА

Существует два практически полезных варианта решения уравнений диффузии:

- **Диффузия из источника с постоянной поверхностной концентрацией.** Это возможно при условии равенства количества примеси, поступающей в поверхностный слой и уходящей в объем полупроводника. Такому требованию удовлетворяет источник диффузанта с бесконечно большим содержанием примесных атомов (диффузия из газовой фазы).
- **Диффузия из тонкого слоя с фиксированным количеством примеси.** Пусть на поверхность пластины полупроводника нанесен тонкий слой примеси. При нагреве количество атомов на поверхности будет постоянно уменьшаться вследствие их ухода в объем п/п. В соответствии с этим будет изменяться величина поверхностной концентрации и распределение диффузионного потока. Этот вид диффузии осуществляется из слоя примеси, предварительно нанесенного на поверхность полупроводника.

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad 1$$

здесь C_s – поверхностная концентрация;
 erfc - обратная функция ошибок

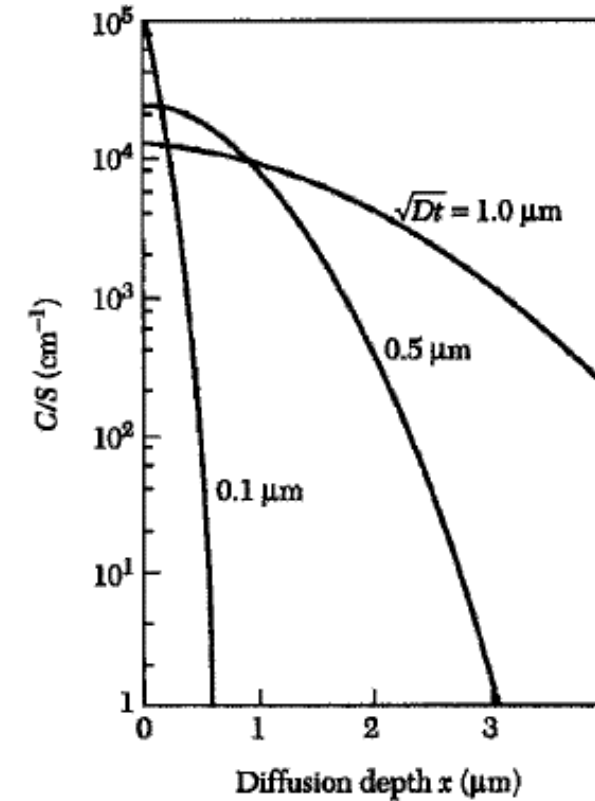
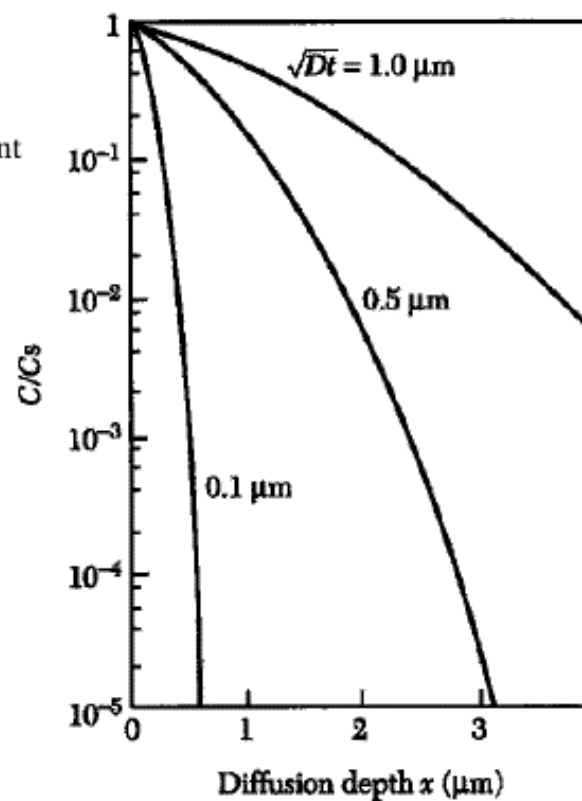
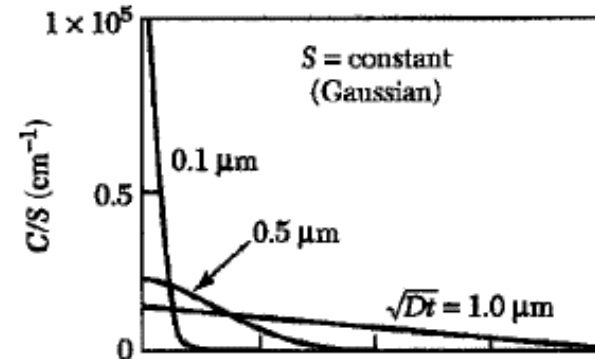
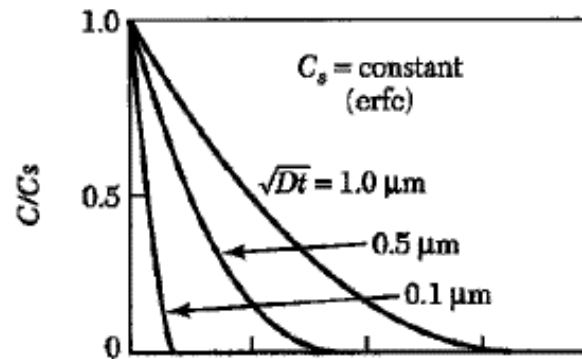
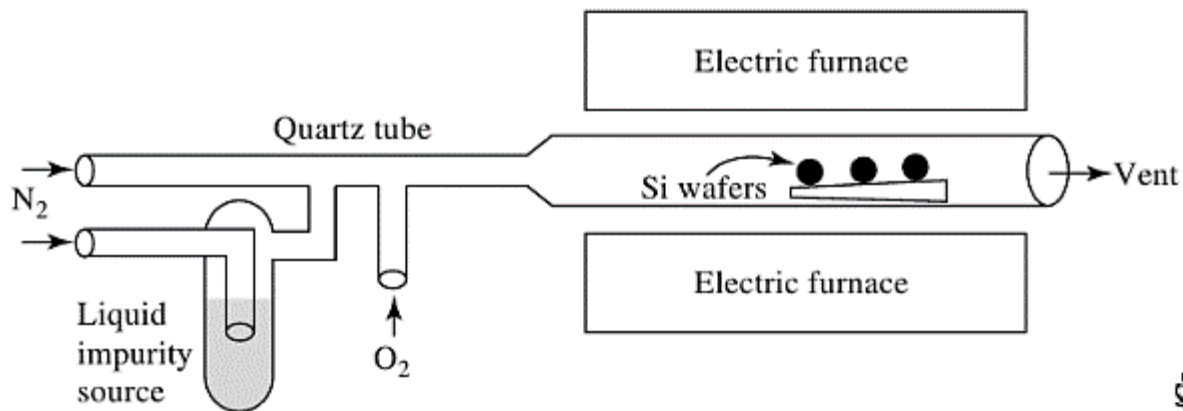
$$\operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^{\infty} \exp(-\alpha^2) d\alpha$$

$$C(x, t) = C_s \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) \quad 2$$

при этом $C_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$

Q – количество атомов примеси, первоначально приходящихся на единицу площади

ЛЕГИРОВАНИЕ ДИФФУЗИЕЙ



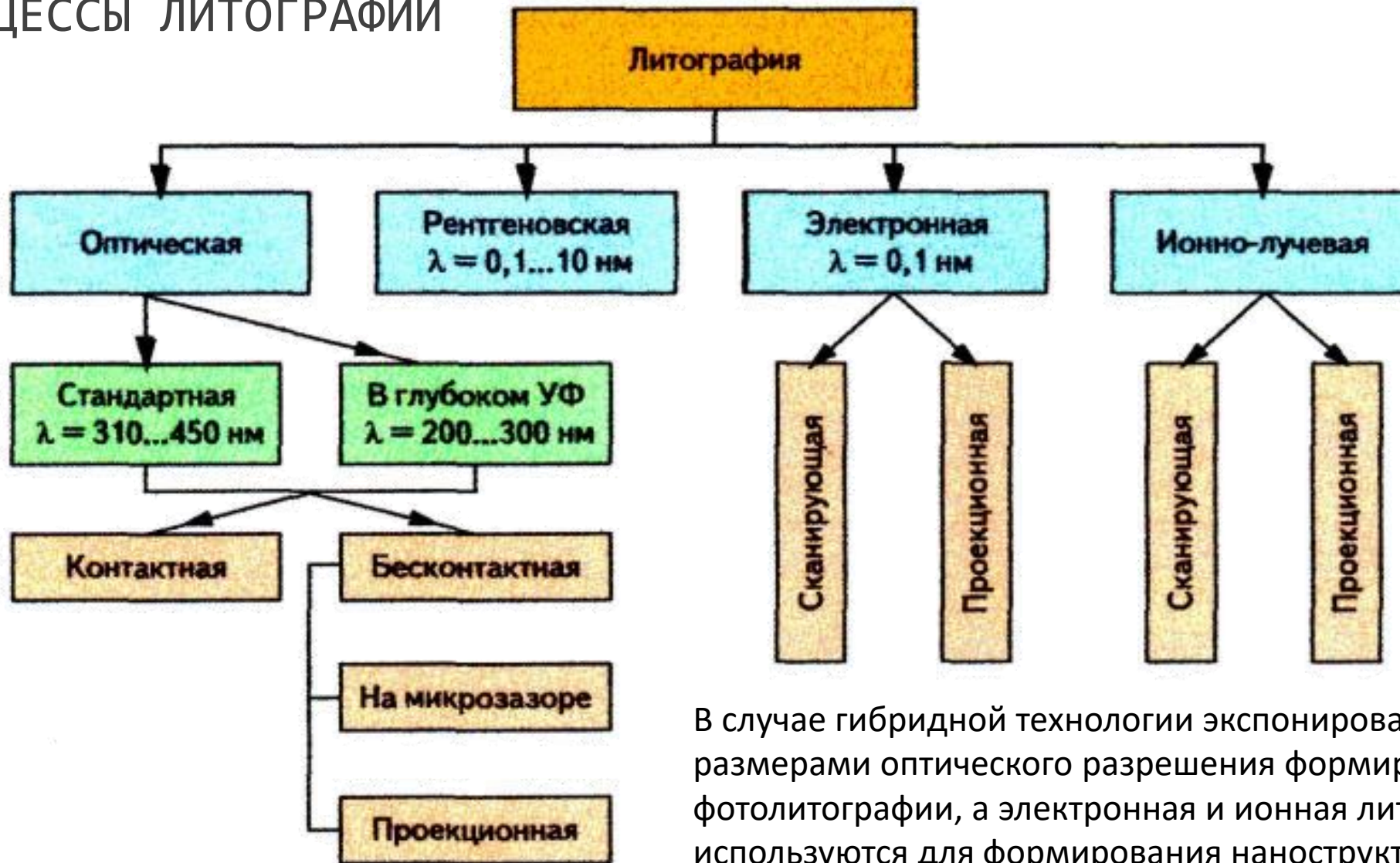
(a)

(b)

ЛЕГИРОВАНИЕ ДИФФУЗИЕЙ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

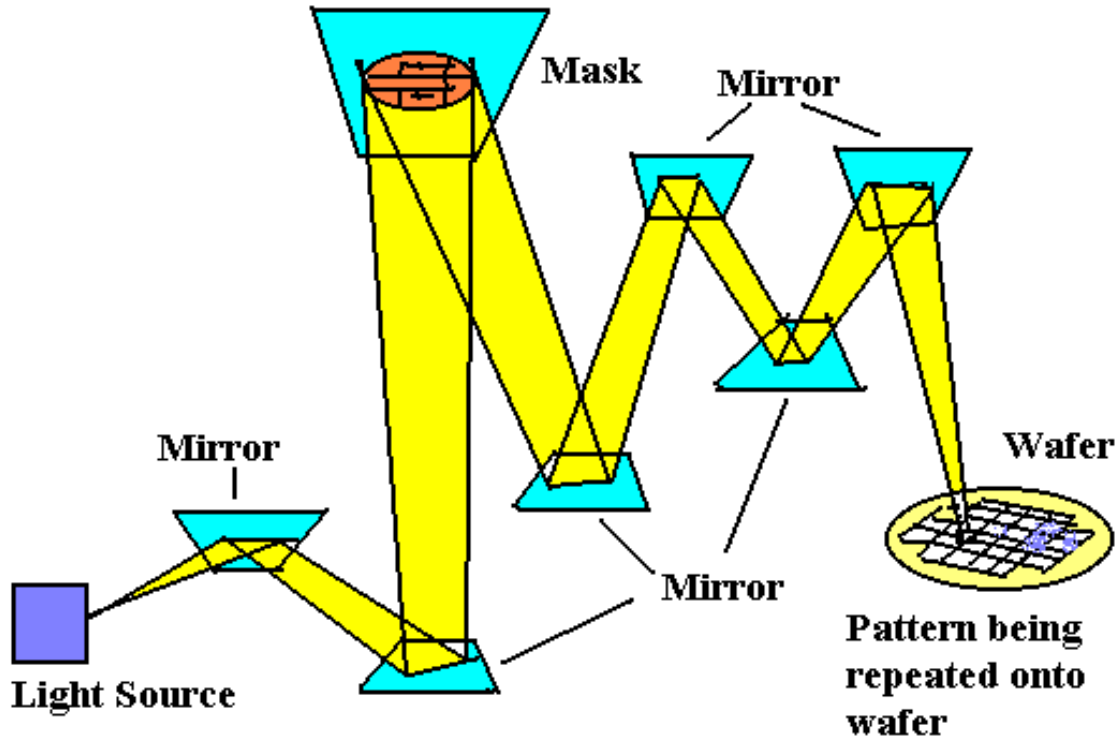
- Если приток новых молекул взамен ушедших в полупроводник осуществляется со скоростью, равной или большей скорости диффузии, то в поверхностном слое полупроводника устанавливается равновесная концентрация атомов, равная предельной растворимости при данной температуре.
- Если приток новых молекул меньше скорости диффузии или они равны, но концентрация атомов в паре мала, то поверхностная концентрация определяется только парциальным давлением примесного пара. В идеальном случае равновесная концентрация пропорциональна давлению пара и контролирование давления пара – удобное средство управления поверхностной концентрацией.
- Типичная установка для проведения диффузионных процессов на кремнии в диапазоне температур от 500 до 1250 °С состоит из нескольких камер нагрева. Каждая камера состоит из кварцевой или керамической цилиндрической трубы с нагревательным элементом и теплоизоляцией. Источник примеси может быть твердым, жидким или газообразным.

ПРОЦЕССЫ ЛИТОГРАФИИ



В случае гибридной технологии экспонирования элементы с размерами оптического разрешения формируются методом фотолитографии, а электронная и ионная литография используются для формирования наноструктур. Если доля элементов с малыми размерами невелика, использование гибридной технологии является выгодным вариантом.

ФОТОЛИТОГРАФИЯ



Оптическая схема и внешний вид
фотолитографической машины
экстремального ультрафиолета (EUV)

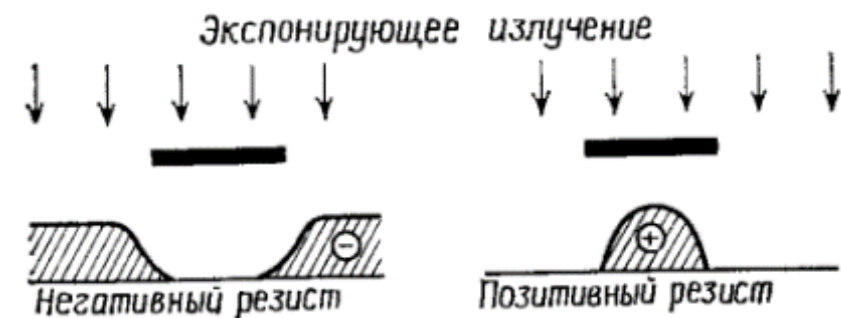
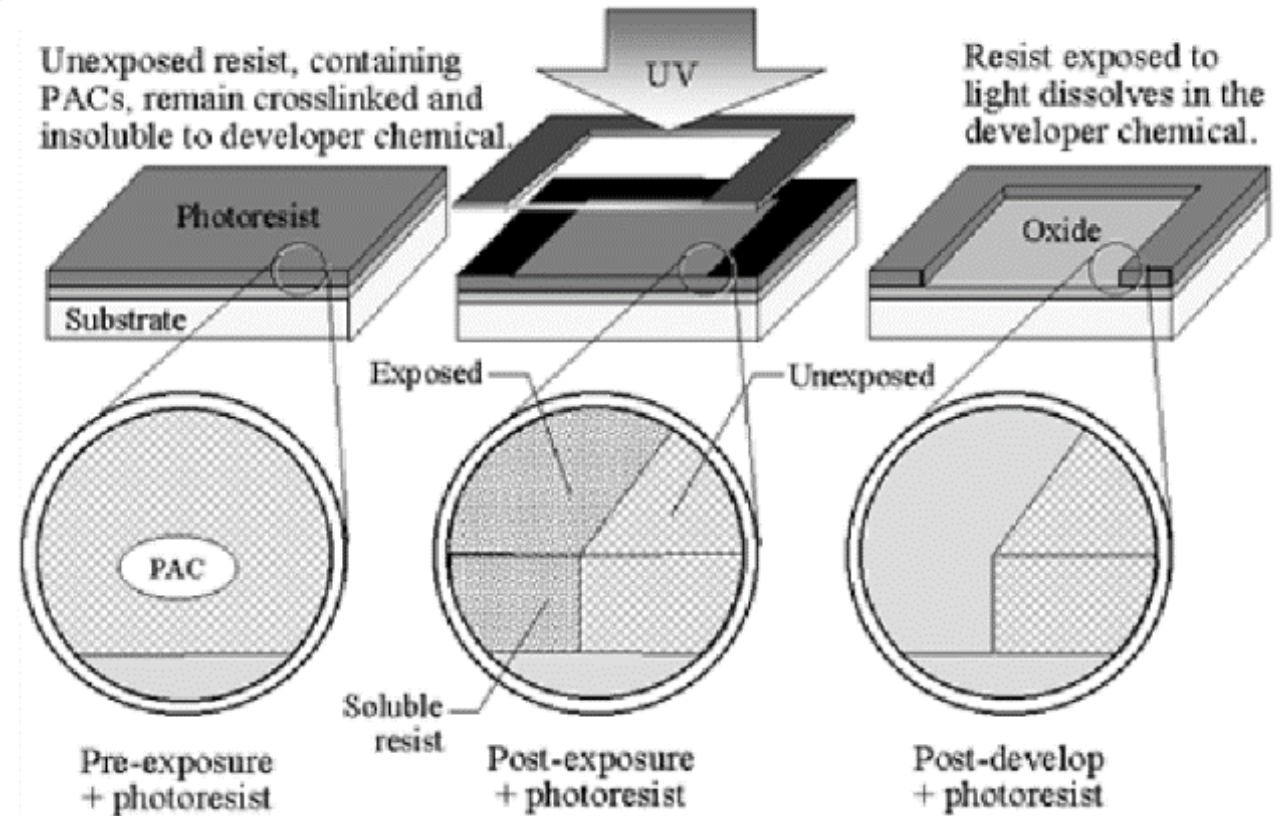
Затраты на фотолитографию составляют около 1/3
всех затрат на производство микроселектронных
изделий



Данный вид литографии имеет максимальную
производительность и удовлетворяет требованиям
массового производства. Однако минимальные
размеры элементов ограничены длиной волны
используемого излучения и соответствующей
оптикой.

ФОТОЛИТОГРАФИЯ: ЭТАПЫ ПРОЦЕССА

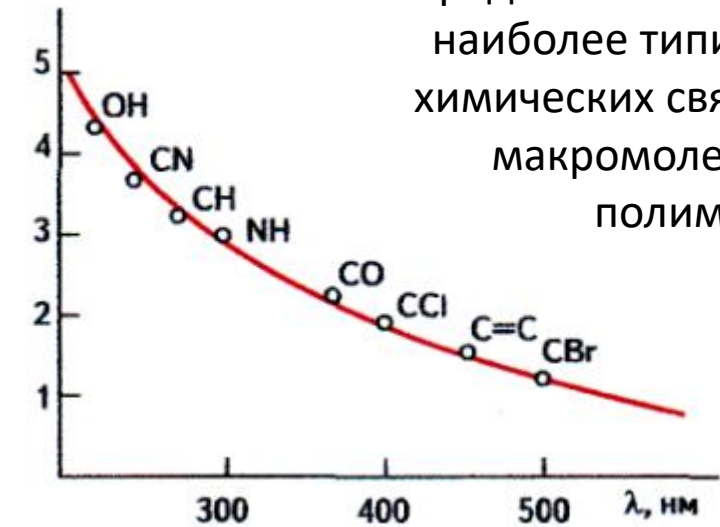
- Формирование сплошного равномерного слоя резиста на поверхности подложки:
 - подготовка поверхности подложки
 - нанесение слоя резиста
 - термическая сушка резиста
- Создание рельефной структуры (маски) резиста:
 - экспонирование резиста
 - проявление резиста
 - термическая сушка (задубливание) резиста
- Перенос рельефа резиста на технологический слой, имеющийся на подложке
 - травление технологического слоя
 - удаление резистивной маски
 - очистка поверхности подложки.



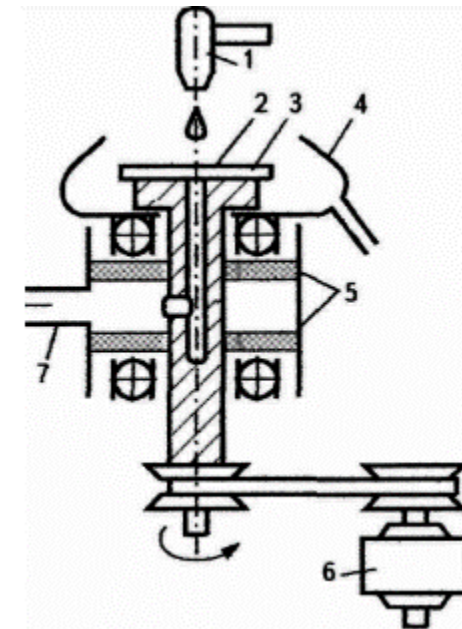
ФОТОРЕЗИСТЫ

- Фоторезисты - это сложные полимерные композиции, в составе которых имеются чувствительные к ультрафиолетовому излучению компоненты, растворители и специальные добавки. Последние вводят для улучшения условий пленкообразования (разбавители), изменения фоточувствительности (сенсibilизаторы), повышения адгезии фоторезистивного слоя к подложкам, улучшения стойкости к воздействиям кислот, щелочей, высоких температур и др. Растворители определяют стабильность свойств готовых фоторезистов, влияют на процессы нанесения и последующего высыхания фотослоя. В качестве полимерной основы большинства фоторезистивных материалов используются: поливиниловый спирт, полиэфиры, полиамиды, фенолформальдегидные и эпоксидные смолы, поливинилацетат, каучуки и др.
- Фоторезистивные пленки обычно наносятся центрифугированием (помещением капли фоторезиста на подложку, закрепленную на вращающемся с большой скоростью роторе центрифуги) в максимально чистой атмосфере. Погрешность толщины нанесённых плёнок обычно не более $\pm 5\%$. Максимальная разрешающая способность процесса фотолитографии достигается при минимальной толщине фоторезиста, а толщина определяется скоростью вращения пластины.

$W \cdot 10^5, \text{ Дж/моль}$



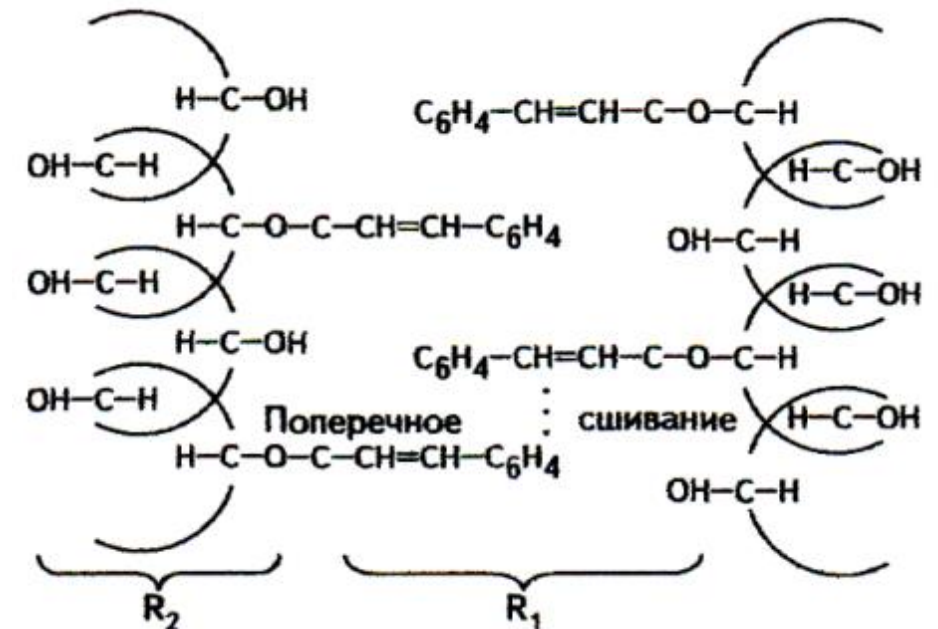
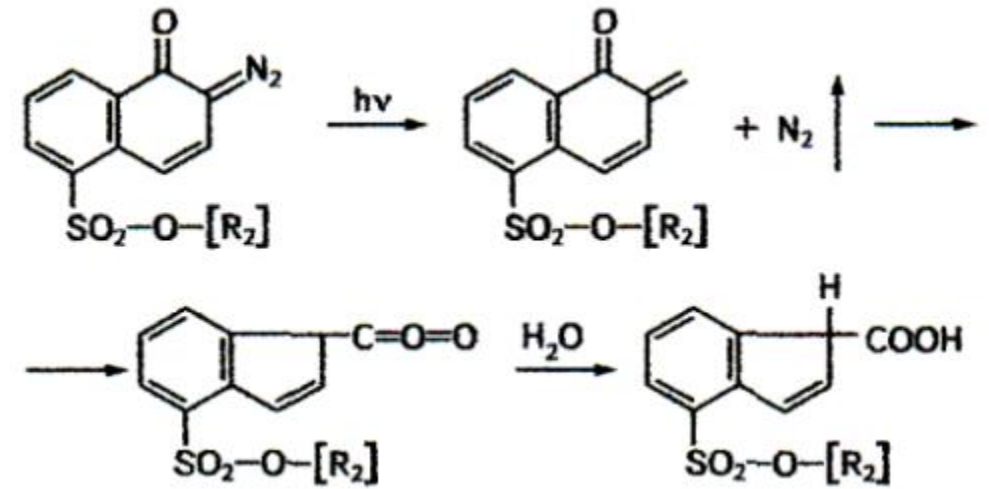
Распределение энергий наиболее типичных химических связей в макромолекулах полимеров.



1 – дозатор (капельница);
2 – подложка.

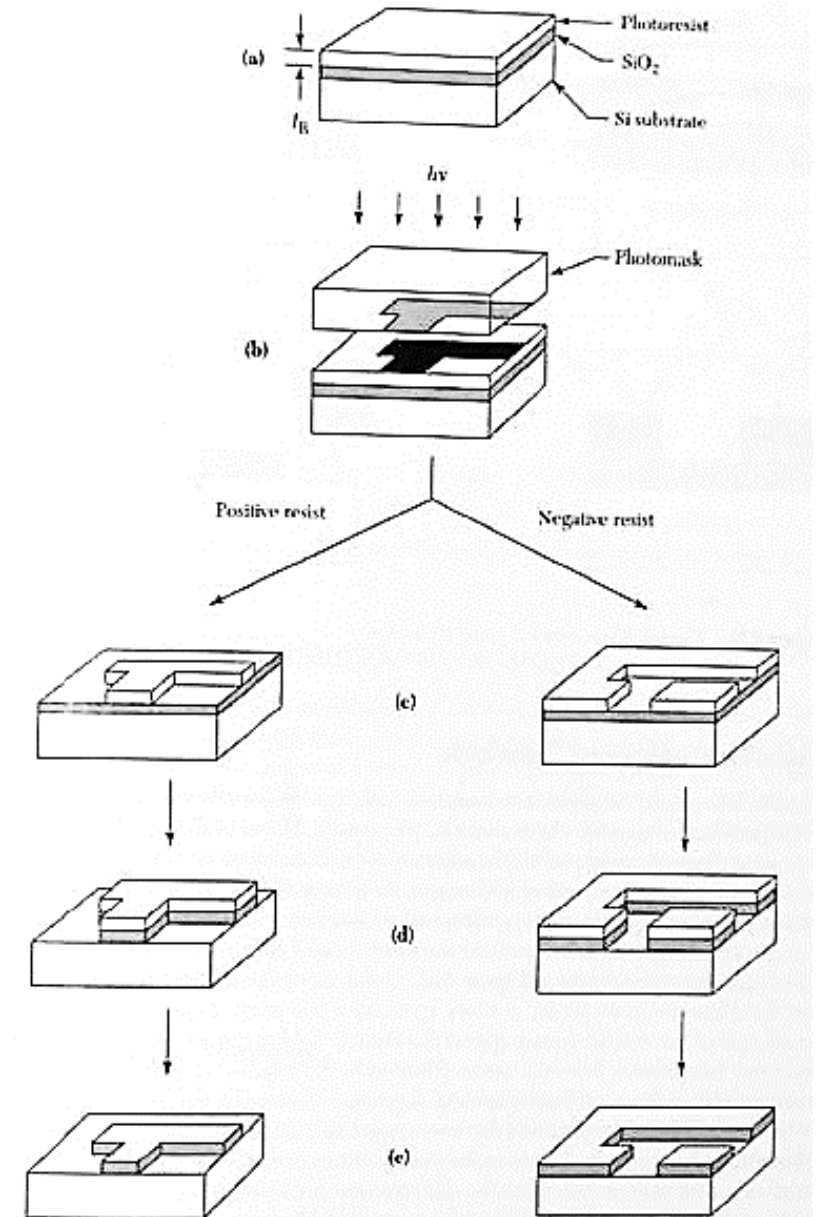
ФОТОРЕЗИСТЫ

- Позитивные фоторезисты** изготавливают на основе фоточувствительных нафтохинондиазидов (НХД, DNQ) и фенолформальдегидных смол. Молекула позитивного фоторезиста имеет строение R1-O-R2, где R1 и R2 — светочувствительная и полимерная части, O — соединяющий их атом кислорода. При поглощении квантов света молекула НХД распадается на азот и неустойчивый радикал, который превращается в инденкарбен; последний присоединяет всегда имеющуюся в фоторезисте влагу, образуя инденкарбоновую кислоту. Облученные участки фотослоя, в отличие от необлученных, становятся гидрофильными, хорошо смачиваются и удаляются щелочными проявителями.
- Негативные фоторезисты** изготавливают на основе поливинилциннамата (ПВЦ) или на основе каучуков. При поглощении квантов излучения наиболее слабые в светочувствительных частях молекул химические связи $\text{C}=\text{C}$ разрываются. За счет освободившихся связей происходит фотоструктурирование, т. е. поперечное сшивание молекул ПВЦ в трехмерную сетку.



ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОРЕЗИСТОВ

- *Светочувствительность* – величина, обратная количеству поглощенной световой энергии, необходимой для получения в слое фоторезиста эффекта потери (в негативном фоторезисте) или приобретения (в позитивном фоторезисте) растворимости облученных участков.
- *Разрешающая способность* – максимально возможное число отдельно передаваемых одинаковых линий рельефа на 1 мм поверхности подложки. Нередко разрешающую способность определяют наименьшей шириной линии или наименьшим расстоянием между ними. На эту величину влияют дифракция света, диффузионное рассеяние и отражение света от подложки. Разрешающая способность всего процесса фотолитографии обычно в 1,5 – 2 раза хуже разрешающей способности используемых фоторезистов.
- *Устойчивость к химическим воздействиям.* Фоторезист в течение нескольких минут контактирует с сильными кислотами или щелочами в процессе травления нижележащего слоя. Дефекты слоя фоторезиста значительно снижают его химическую устойчивость.
- *Однородность покрытия* - определяется такими физико-химическими свойствами фоторезиста, как вязкость, плотность, смачиваемость им подложки.



МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ И СУШКИ ФОТОРЕЗИСТА

- Центрифугирование
- Распыление (пультверизация)
- Электростатическое нанесение
- Окунание
- Полив
- Накатка (нанесение сухих плёнок)

Сушка является операцией, завершающей формирование слоя фоторезиста, и выполняется после его нанесения. Она проходит в два этапа:

- 1) низкотемпературная выдержка нанесенного слоя;
- 2) высокотемпературная выдержка нанесенного слоя (предельная температура 140 - 150 °C).

В процессе сушки удаляется растворитель, и в пленке фоторезиста происходит релаксационный процесс плотной упаковки молекул, уменьшающий внутренние напряжения и увеличивающий адгезию фотослоя к подложке. Растворитель при сушке необходимо удалять полностью, так как он экранирует фоточувствительные части молекул при экспонировании.

Сушка инфракрасным излучением является основным промышленным методом, применяемым в линиях фотолитографии. Она выполняется непосредственно после нанесения резиста под источниками ИК-излучения при непрерывном продуве азотом.

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОРЕЗИСТЫ (ХАЛЬКОГЕНИДНЫЕ СТЁКЛА)

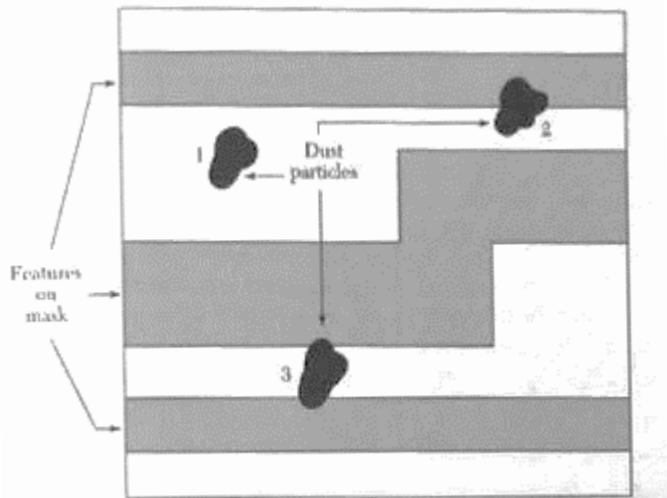
- Неорганические фоторезисты состоят из нижнего слоя, изготовленного из халькогенидных стекол, таких как As_2S_3 , As_2Se_3 , Ge-Se и др., а тонкий верхний слой представляет собой серебро или его галогенид ($AgCl$).
- УФ свет высвобождает атомы серебра и делает возможной их диффузию вглубь слоя халькогенида на глубину до 10 нм, образуя слои, стойкие к последующему травлению в специальных растворах или в газовой плазме ("фотохимическое допирование"). Поглощение УФ света ограничено лишь тонким слоем, что способствует получению резистных масок с высоким разрешением.
- При экспонировании УФ светом в результате фотохимически инициированной диффузии и последующей реакции образуется Ag_2Se . После удаления избыточного количества серебра скрытое изображение можно проявить травлением в плазме гексафторида серы или фреона.
- Преимущества неорганических фоторезистов:
 - обладают очень высоким контрастом (до 8)
 - обладают очень сильным поглощением
 - обладают очень высокой стойкостью к кислородной плазме

ЭКСПОНИРОВАНИЕ И ПРОЯВЛЕНИЕ

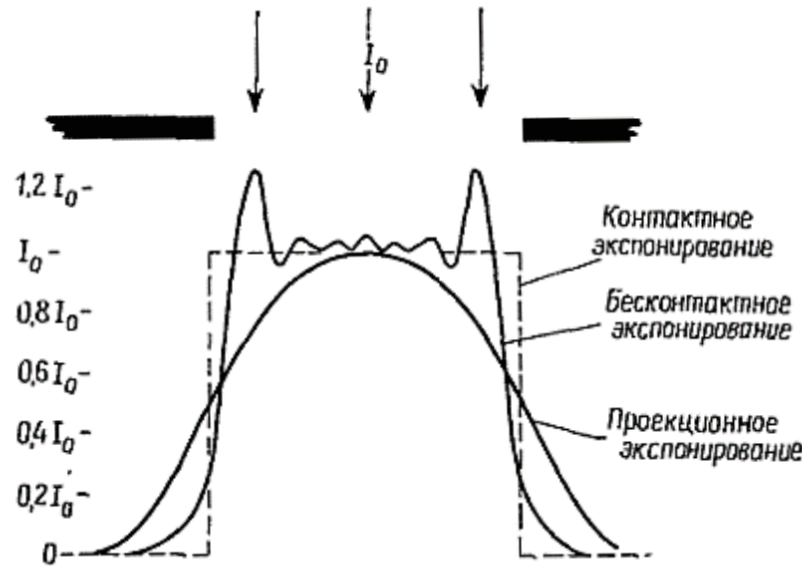
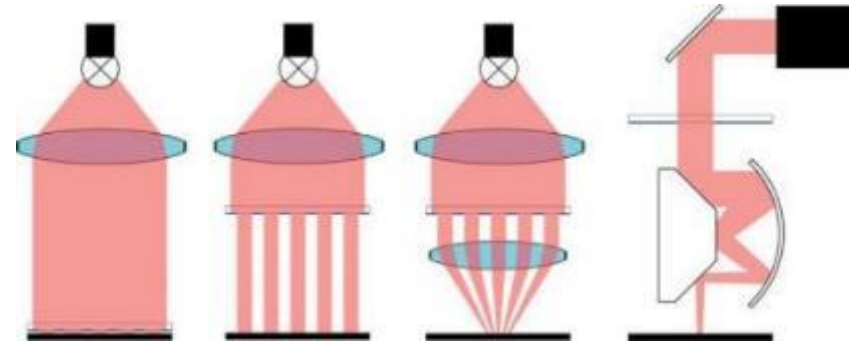
- Перед экспонированием фоторезиста необходимо совместить элементы схемы на фотошаблоне с соответствующими элементами схемы на подложке, покрытой фоторезистом. Для этого предусмотрены специальные метки. Знаки совмещения визуальны различимы благодаря ступеньке в оксиде, нитриде кремния или металле и прозрачности слоя фоторезиста.
- Проявление негативных фоторезистов производят в органических растворителях – трихлорэтилене, толуоле, хлорбензоле, ксилоле, а позитивных – в неорганических соединениях со щелочными свойствами (слабых водных и водно-глицериновых растворах KOH, NaOH, Na₃PO₄·12H₂O). Распространенными способами проявления являются: погружение в раствор проявителя, выдержка в парах органического соединения, пульверизация.
- С ростом времени экспозиции увеличиваются размеры элементов для позитивного фоторезиста и уменьшаются для негативного. При этом для негативного фоторезиста режимы проявления слабо влияют на точность передачи изображения и перепроявление для них неопасно. Для позитивных фоторезистов режимы проявления являются определяющими для качества изображения и должны быть согласованы с режимами экспонирования.

ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Полный литографический процесс не должен приводить к появлению дефектных изделий. Если 10% будущих чипов будут дефектными на каждой стадии переноса изображения, то после 10 литографических операций окажутся годными только ~35% чипов.

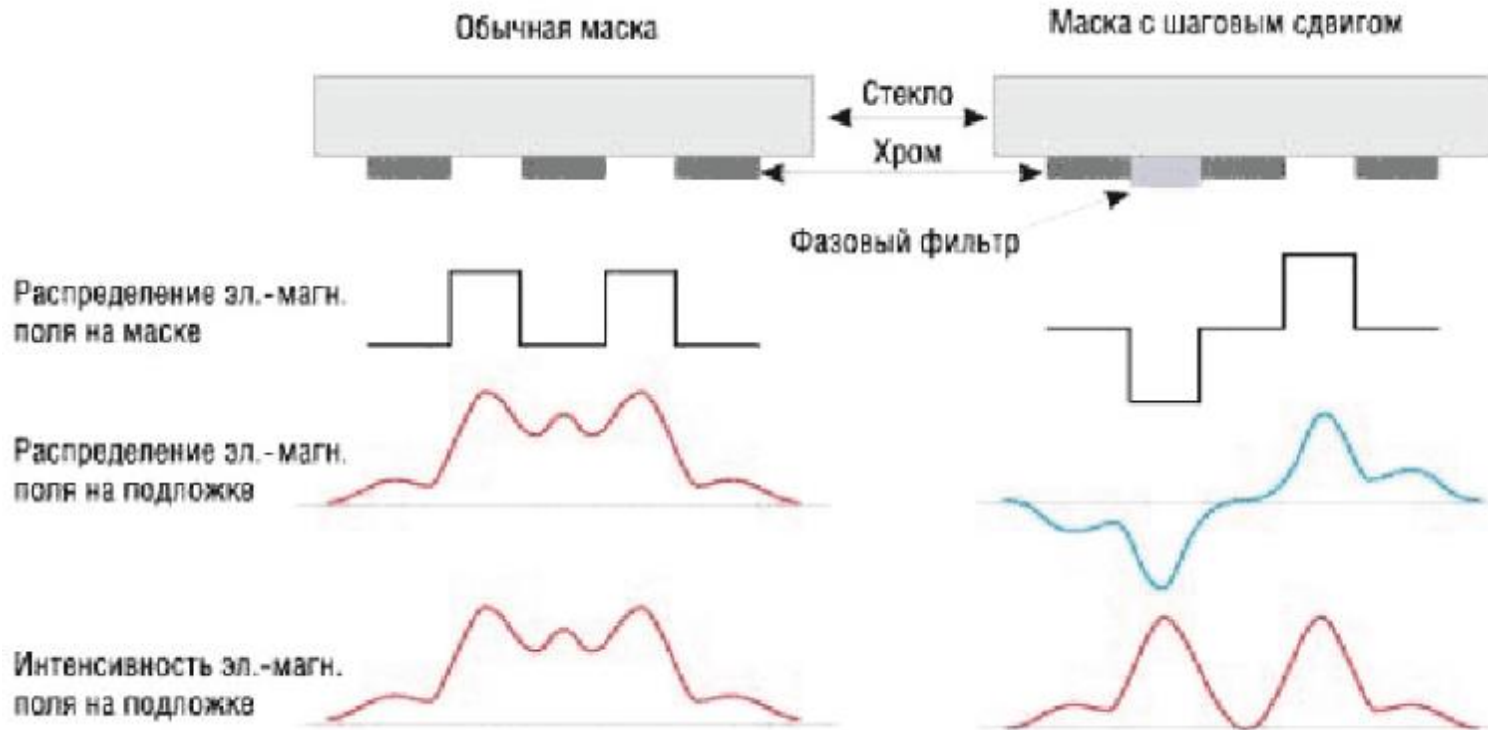


Основными методами оптического экспонирования являются контактный, бесконтактный и проекционный



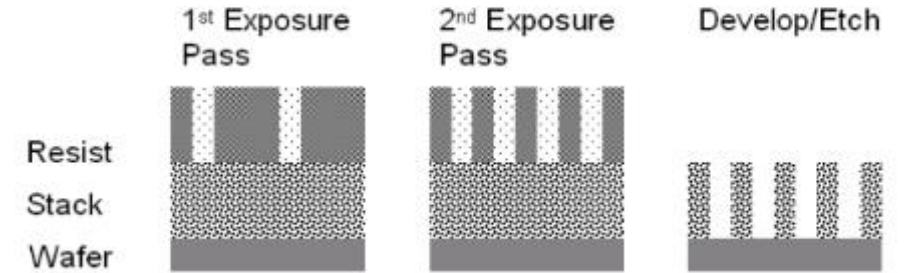
Достоинства контактной литографии: высокая производительность, низкая стоимость оборудования, малые габаритные размеры. Недостатки: неравномерность засветки, быстрый износ фотошаблонов, важность абсолютной планарности пластины, разрешающая способность в целом хуже, чем для проекционной литографии. Современные проекционные методы используют последовательный мультиплицированный перенос изображения на отдельные участки пластины. Иммерсионная литография предполагает покрытие пластины слоем жидкости с высоким показателем преломления n , что, согласно критерию Аббе, в n раз повышает разрешающую способность.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЁМЫ ЭКСПОНИРОВАНИЯ



Использование шаблона с фазовым сдвигом

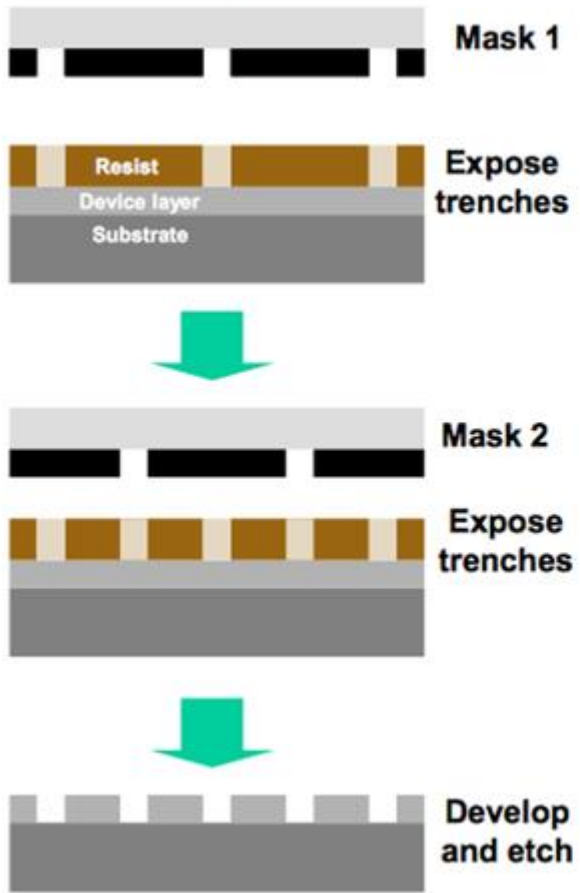
Double Exposure



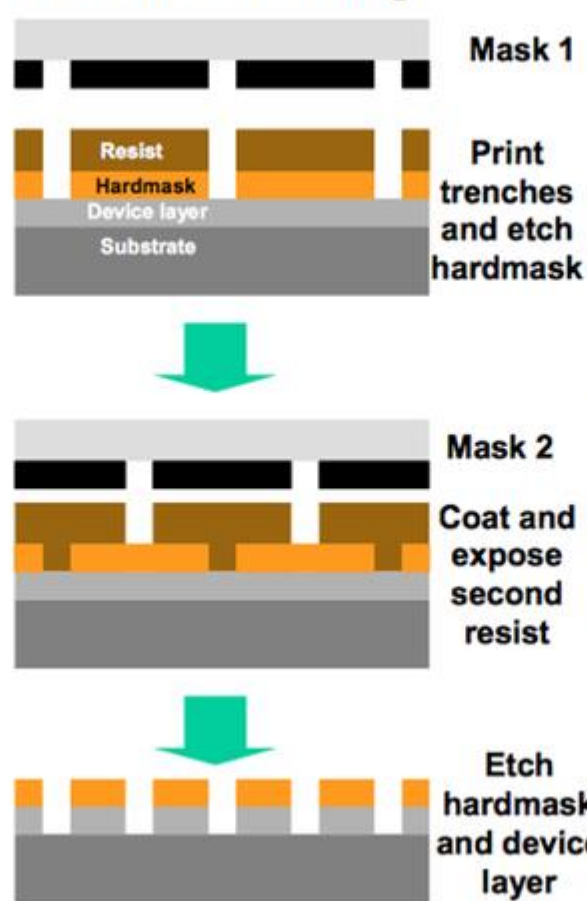
В технологии двойной экспозиции вместо одной литографической маски-шаблона применяются две маски, содержащие части топологии, и соответственно два акта экспозиции фоторезиста. Двойная экспозиция позволяет повысить разрешающую способность в два раза.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЁМЫ ЭКСПОНИРОВАНИЯ

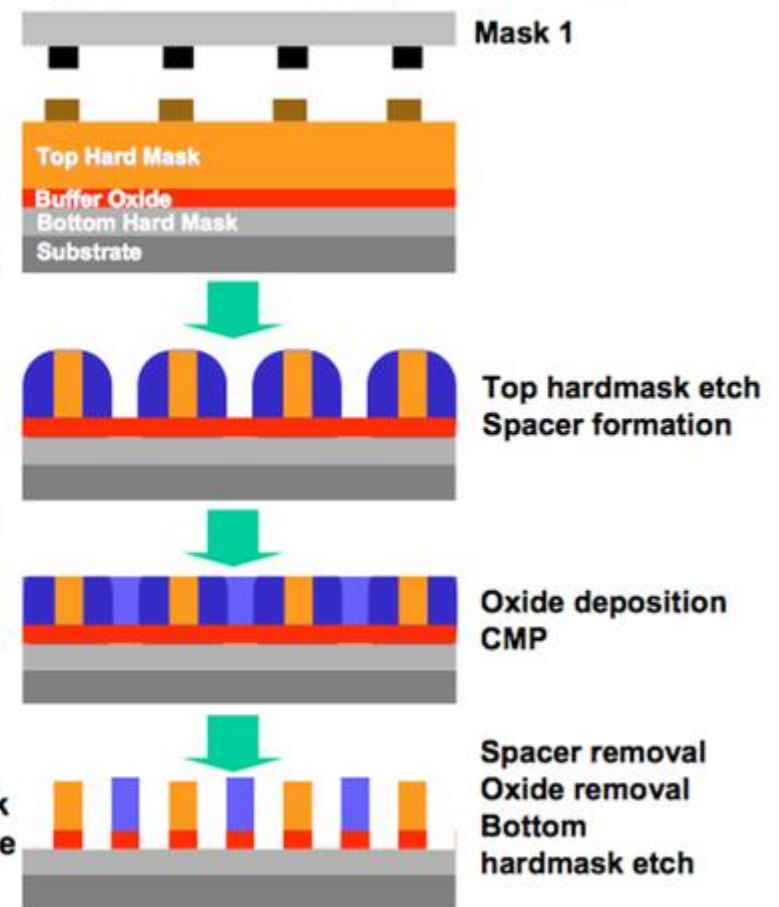
Double Exposure



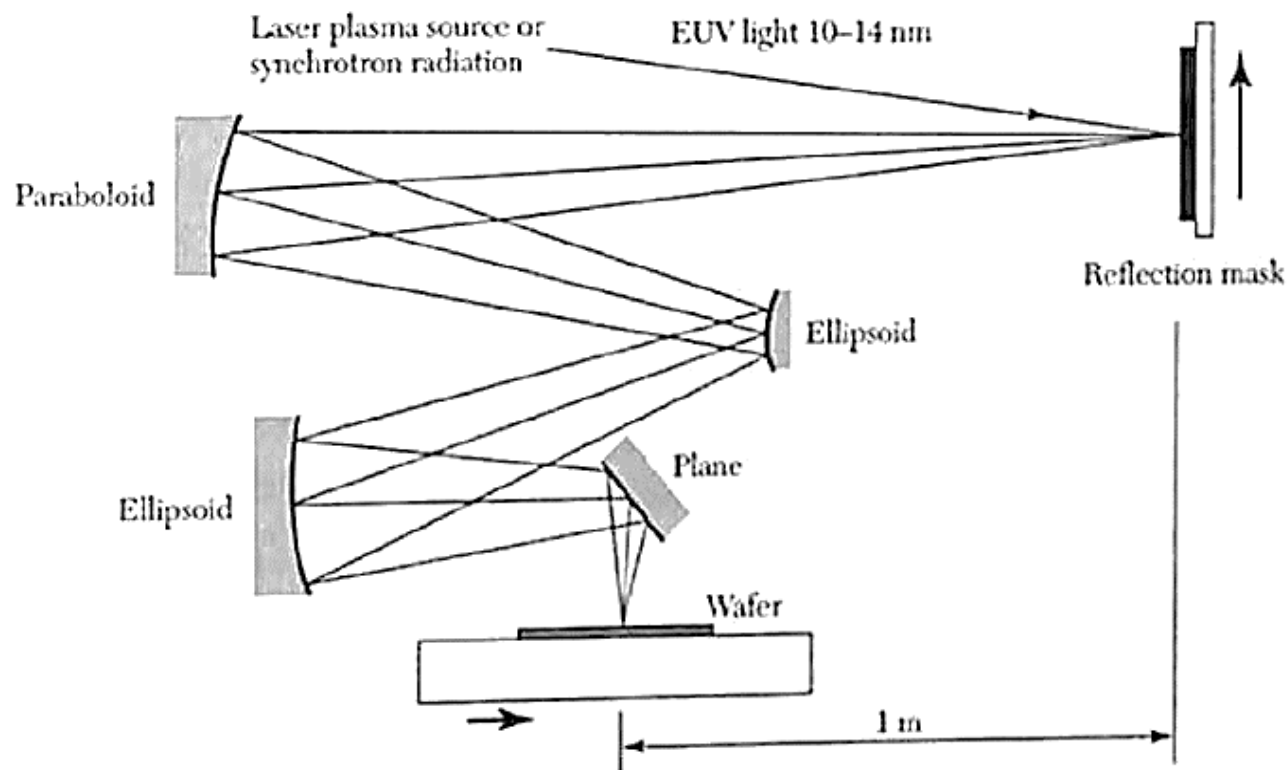
Double Patterning



Spacer double patterning

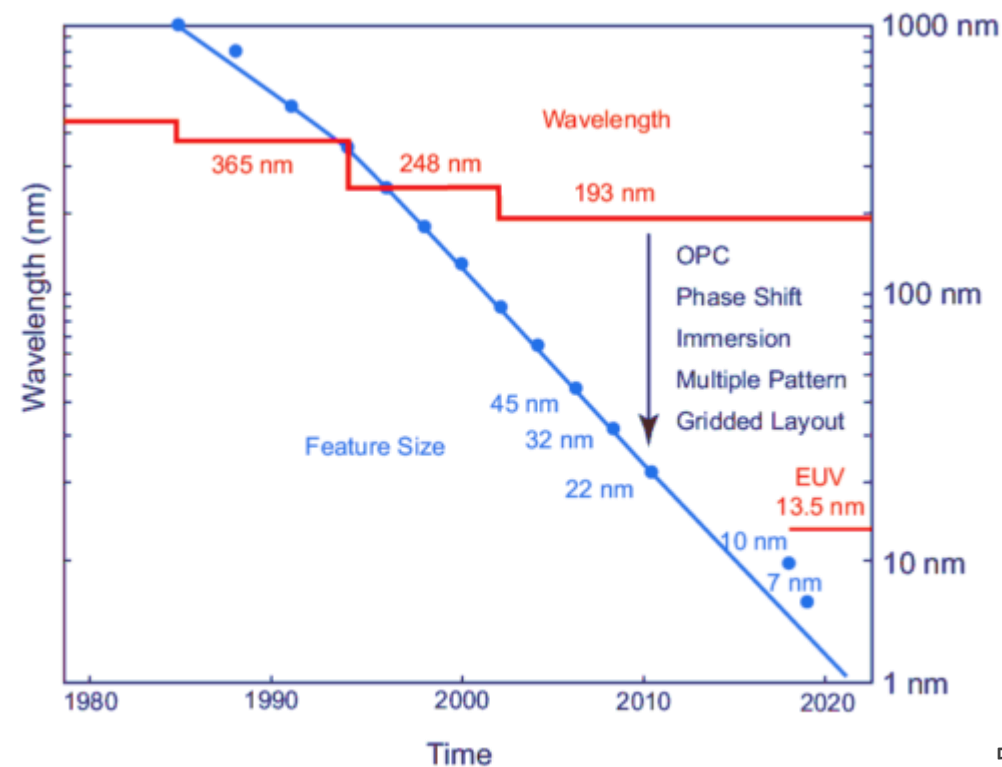


ФОТОЛИТОГРАФИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА (EUV)



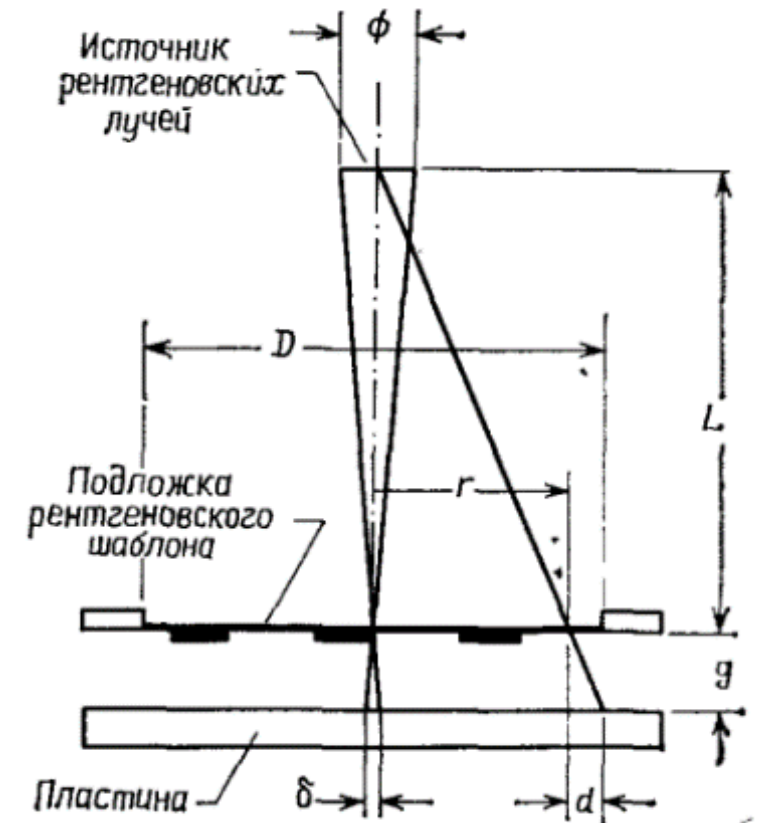
Для EUV-фотолитографии (длина волны 13.5 нм) используется полностью отражающая оптика в вакууме (поскольку свет и вещество поглощают ультрафиолет в этом диапазоне), зеркала многослойные, шаблоны также являются отражающими.

Источниками излучения в EUV на первом этапе развития подобных систем служило синхротронное излучение. Позже излучение импульсного ИК-лазера фокусируется на капле олова, создавая плазму.



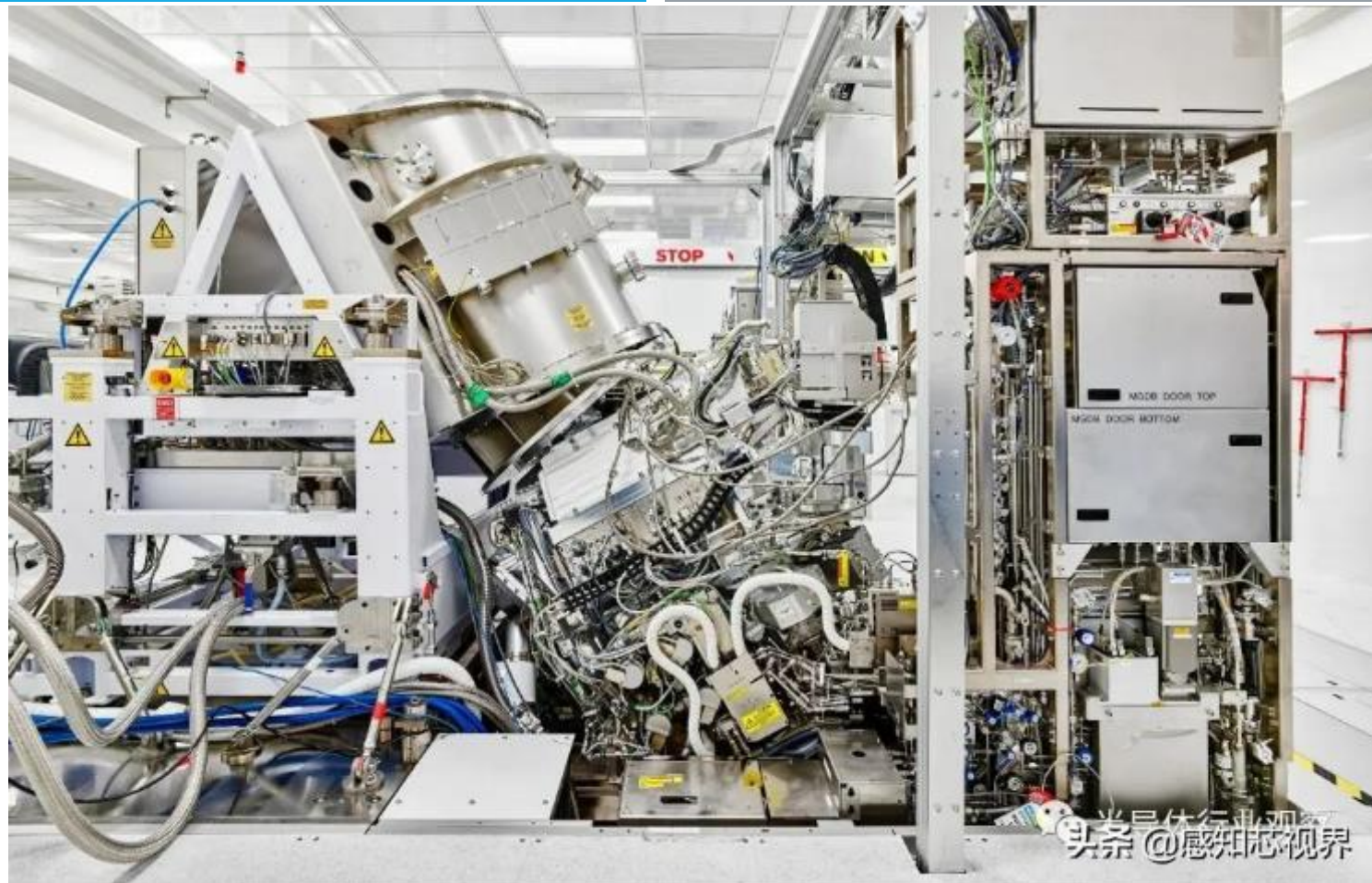
ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

- В технологии рентгенолитографии (длина волны 0.4 – 5 нм) экспонирование пластины производится расходящимся пучком рентгеновского излучения, поскольку для него вообще нельзя сделать систему линз и зеркал. К достоинствам технологии относятся: высокая разрешающая способность, отсутствие контакта с шаблоном; нечувствительность к типичным загрязнениям шаблона; отсутствие отражения и рассеяния излучения в резисте. В качестве резиста пытаются использовать полимерные плёнки (эмиссия вторичных электронов), в качестве маски для шаблона используется золото, обладающее высоким коэффициентом поглощения рентгеновских квантов. Существенными недостатками рентгенолитографии является большое время экспонирования (несколько минут) и высокая стоимость проекционного оборудования.



геометрические искажения в рентгеновской литографии

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Виталий Пикулев, 2021
scilink.ru

