

Специальные вопросы микро-и нанотехнологии

Стефанович Г.Б.



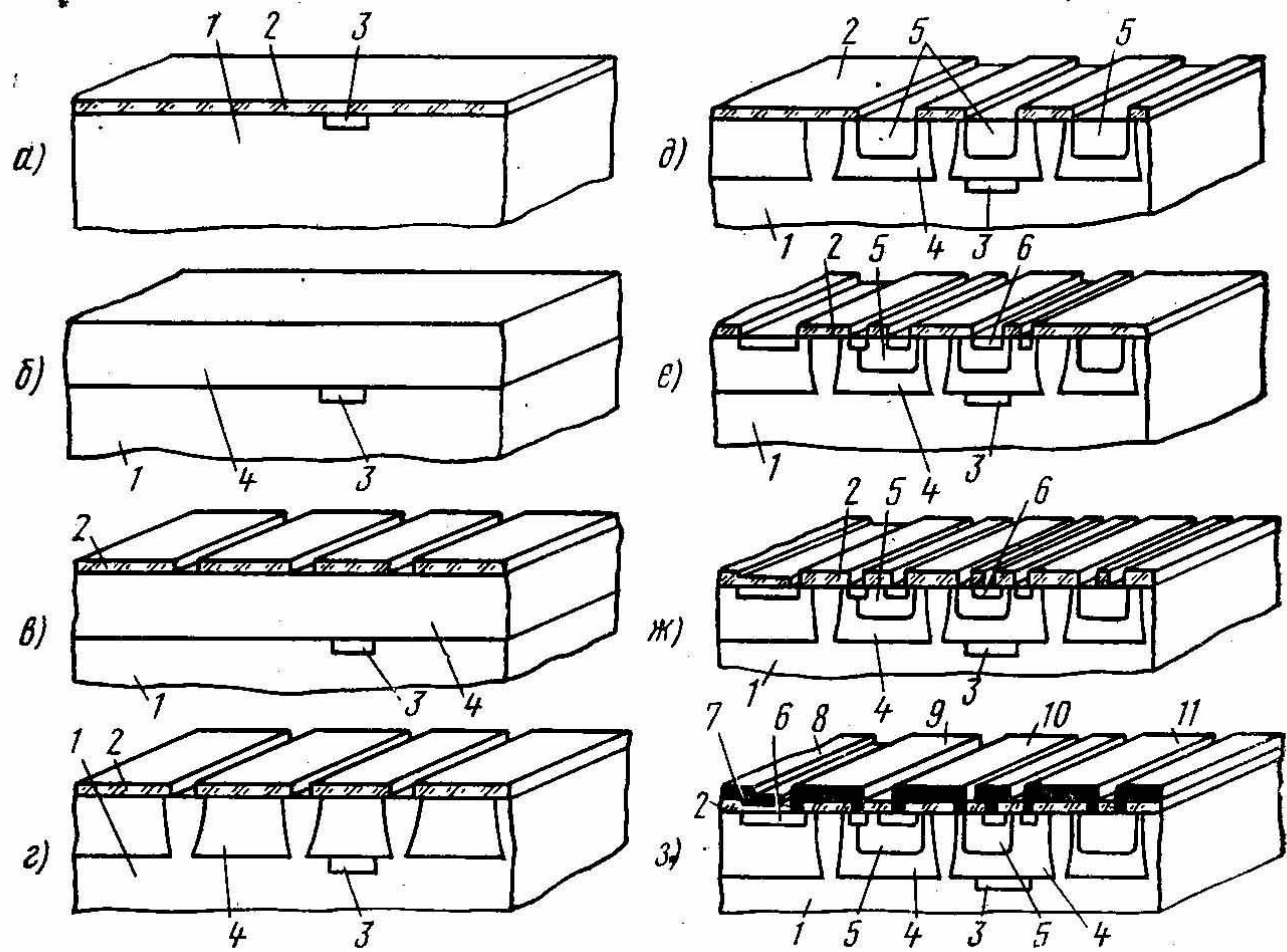


Рис. 8.2. Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по планарно-эпитаксиальной технологии:

1 — подложка p -типа; 2 — окисел кремния; 3 — скрытый слой n^+ -типа; 4 — эпитаксиальный слой n -типа (коллекторные области); 5 — базовая область p -типа; 6 — эмиттерная область n^+ -типа; 7 — металлизация; 8 — конденсатор на основе окиси кремния; 9 — диод ($U_{кб}=0$); 10 — биполярный транзистор; 11 — диффузионный резистор p -типа

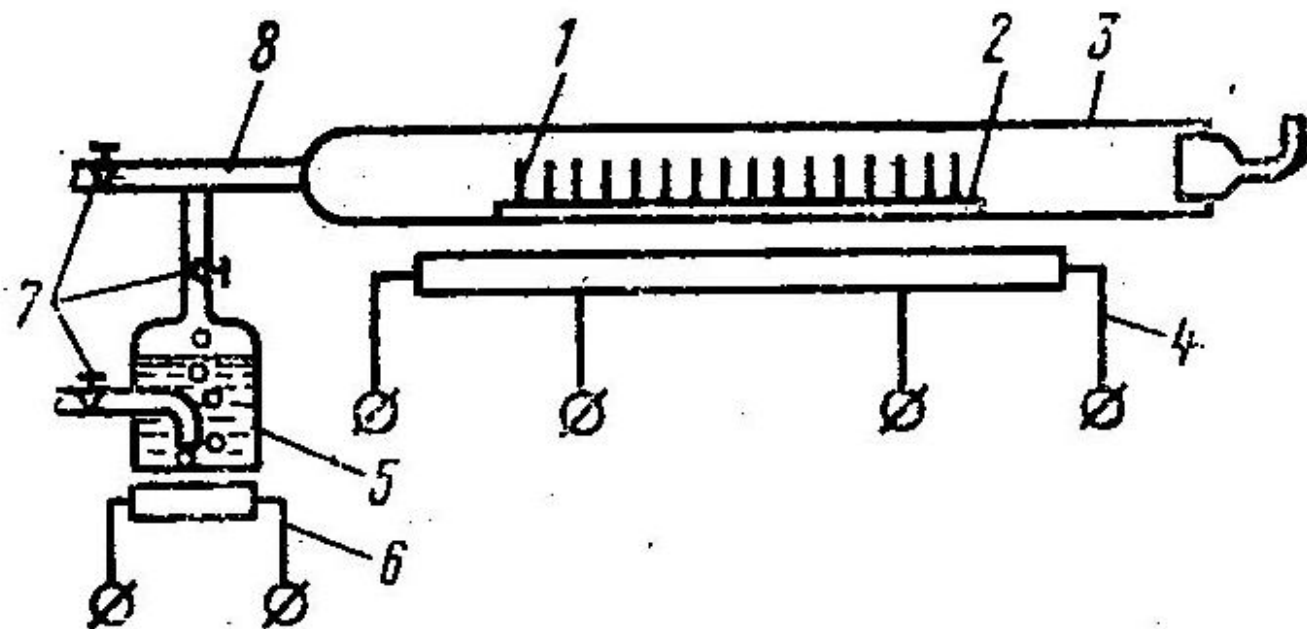


Схема установки термического окисления кремния

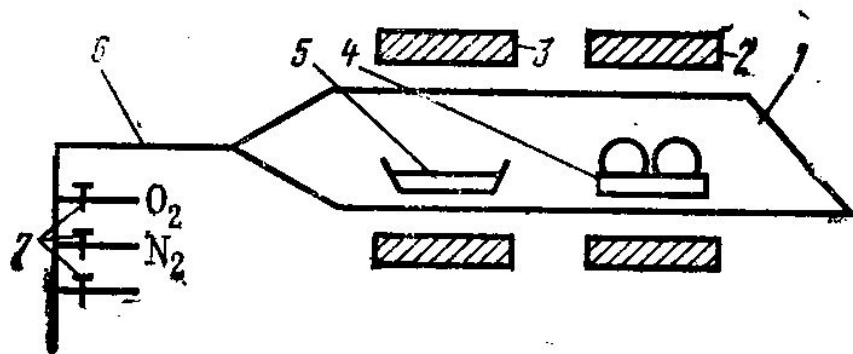


Схема двухзонной установки для диффузии методом открытой трубы

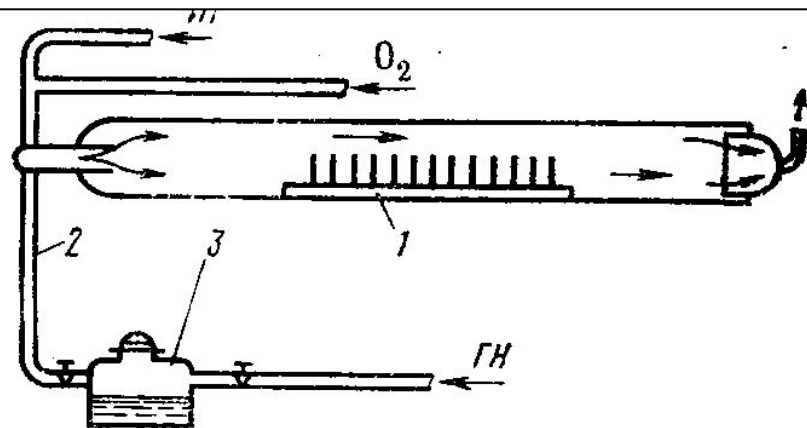


Схема однозонной установки для диффузии:

1 — кварцевая труба; 2 — магистраль для подачи газов; 3 — питатель для жидкого источника примеси; ИГ — инертный газ; ГН — газ-носитель

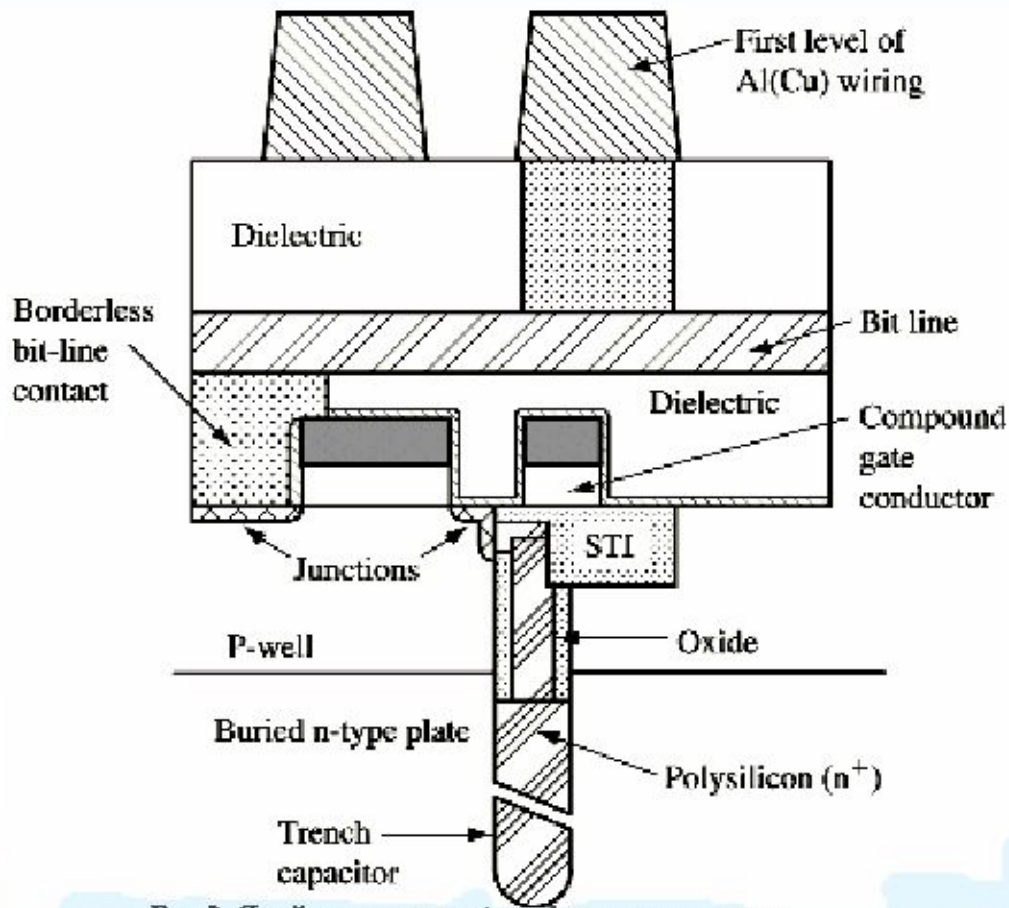
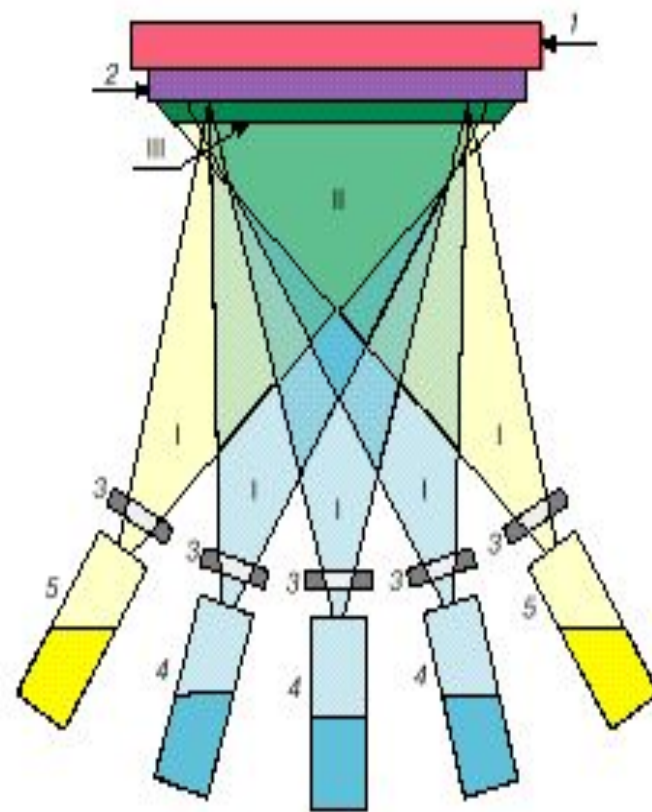


Рис.2. Ячейка памяти с trench конденсатором.

Основы технологии нанoeлектроники

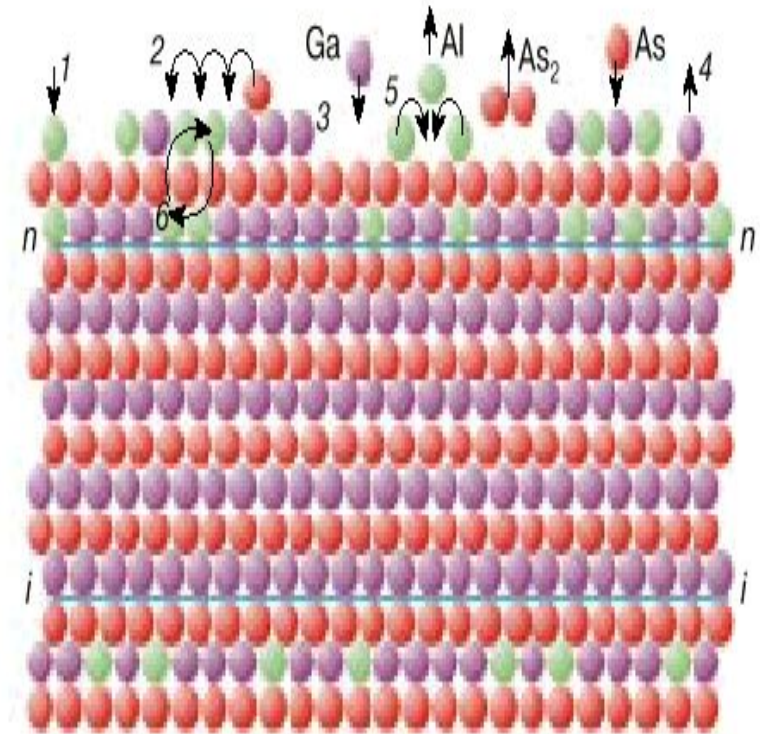
Молекулярно лучевая эпитаксия

- Схема установки МВЕ для получения легированных тройных соединений. Вся установка размещается в камере сверхвысокого вакуума:
- 1.Блок нагрева, 2. Подложка, 3 Заслонка отдельной ячейки, 4. Эффузионные ячейки основных компонентов, 5 Эффузионные ячейки легирующих примесей.



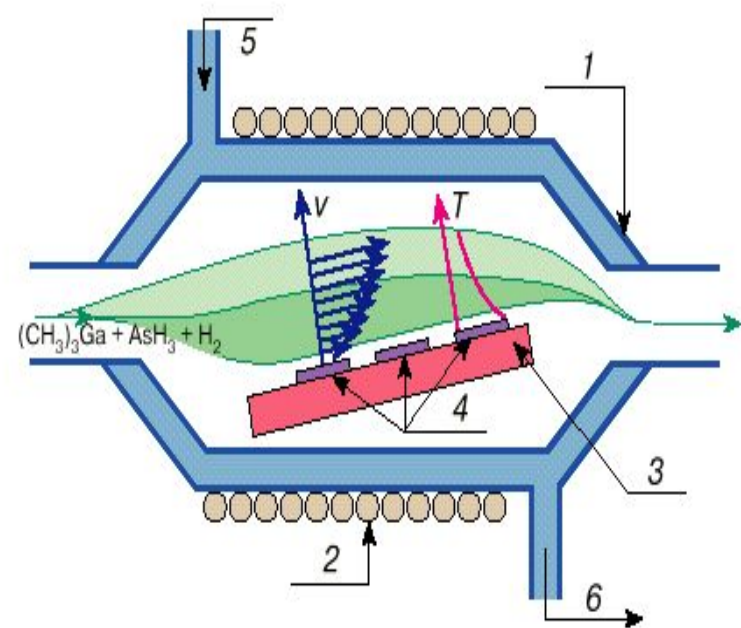
Основы технологии одноэлектроники

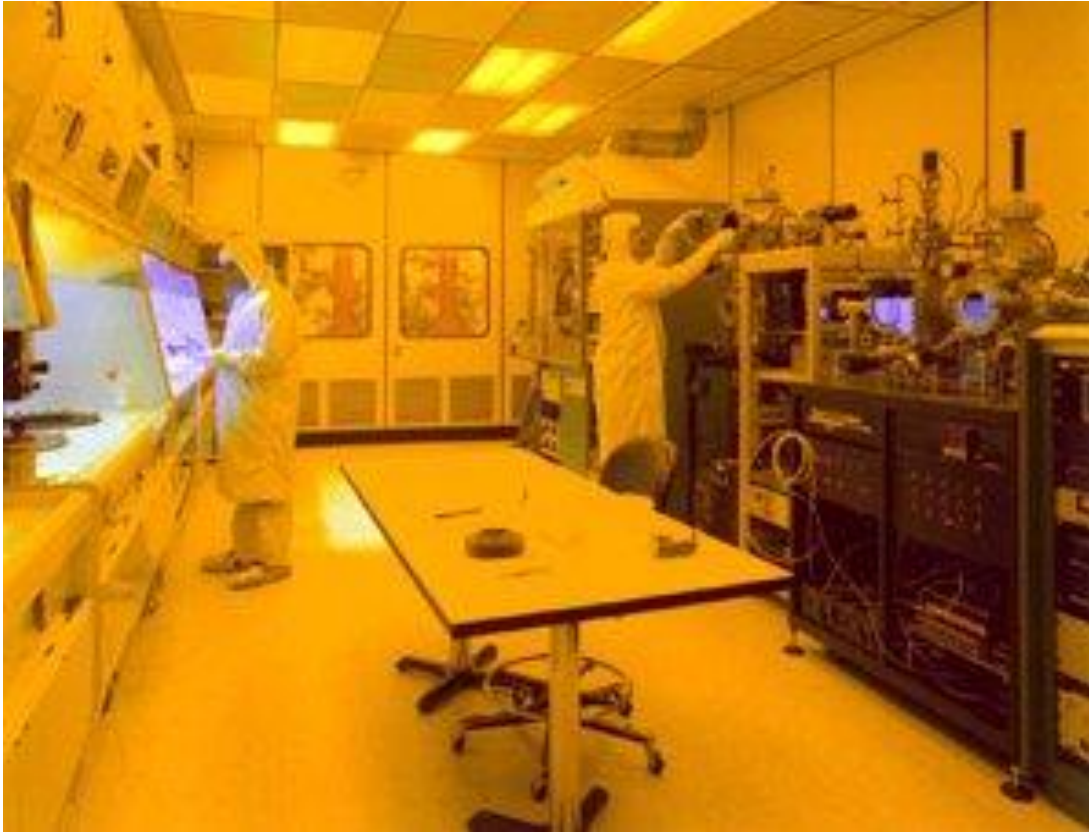
- Элементарные процессы в зоне роста:
- 1. Адсорбция атомов из зоны смешивания на поверхности,
- 2. Миграция (поверхностная диффузия) адсорбированных атомов по поверхности,
- 3. Встраивание адсорбированных атомов в кристаллическую решетку,
- 4. Термическая десорбция,
- 5. Образование поверхностных зародышей, 6. Взаимная диффузия.
- Над растущей поверхностью показаны атомы газовой смеси компонентов в приповерхностной области. Буквами n-n и i-i показаны нормальная и инвертированная поверхности раздела растущей ГС. Область между этими поверхностями представляет собой квантовую яму шириной L.



Основы технологии одноэлектроники

- **Схема горизонтального реактора открытого типа с охлаждаемыми стенками для МOCVD:**
 - **1. Кварцевый корпус,**
 - **2. Катушка ВЧгенератора**
 - **для нагревания подложки,**
 - **3. Блок нагрева подложки,**
 - **4. Подложки,**
 - **5. Водяное охлаждение (впуск),**
 - **6. Водяное охлаждение (выпуск).**
- Схематически показано распределение скоростей v и температуры T в газовом потоке в диффузионном слое вблизи подложки (масштаб не соблюден)







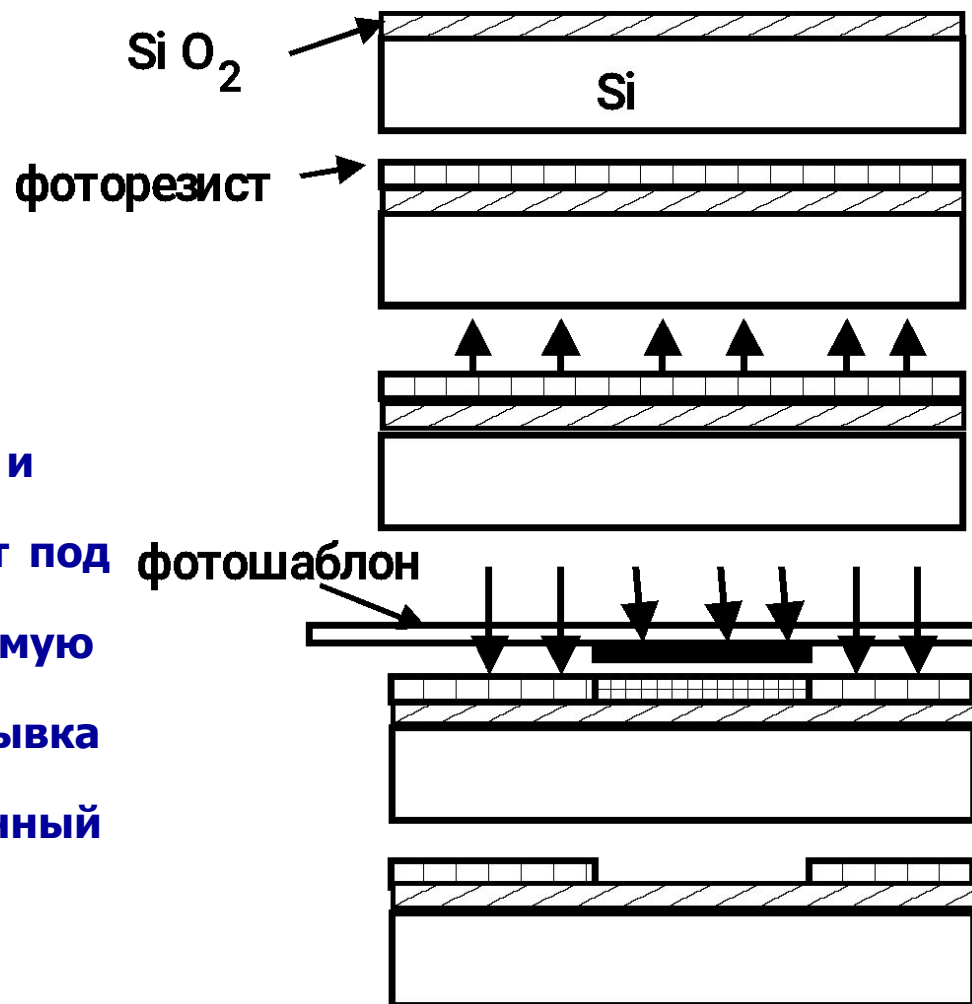


		Class Limits									
Class Name		0.1 μ m		0.2 μ m		0.3 μ m		0.5 μ m		5 μ m	
		Volume Units		Volume Units		Volume Units		Volume Units		Volume Units	
SI	English	(m ³)	(ft ³)	(m ³)	(ft ³)	(m ³)	(ft ³)	(m ³)	(ft ³)	(m ³)	(ft ³)
M 1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10.0	0.283	--	--
M 1.5	1	1 240	35.0	265	7.50	106	3.00	35.3	1.00	--	--
M 2		3 500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	--	--
M 2.5	10	12 400	350	2 650	75.0	1 060	30.0	353	10.0	--	--
M 3		35 000	991	7 570	214	3 090	87.5	1 000	28.3	--	--
M 3.5	100	--	--	26 500	750	10 600	300	3 530	100	--	--
M 4		--	--	75 700	2 140	30 900	875	10 000	283	--	--
M 4.5	1 000	--	--	--	--	--	--	35 300	1 000	247	7.00
M 5		--	--	--	--	--	--	100 000	2 830	618	17.5
M 5.5	10 000	--	--	--	--	--	--	353 000	10 000	2 470	70.0
M 6		--	--	--	--	--	--	1 000 000	28 300	6 180	175
M 6.5	100 000	--	--	--	--	--	--	3 350 000	100 000	24 700	700
M 7		--	--	--	--	--	--	10 000 000	283 000	61 800	1 750

- Одним из определяющих технологических процессов в микроэлектронике в течение более 40 лет продолжает оставаться литография. Литография или микролитография, а сейчас может быть уместно, говорить о нанолитографии, предназначена для создания топологического рисунка на поверхности монокристаллической кремниевой пластины. Основным литографическим процессом в современной микроэлектронике является фотолитография.

10 ступеней литографического процесса.

1. Подготовка поверхности (промывка и сушка)
2. Нанесение резиста (тонкая пленка полимера наносится центрифугированием)
3. Сушка (удаление растворителя и перевод резиста в твердую растворимую фазу)
4. Совмещение фотошаблона и экспонирование
(положительный резист под действием света переходит в нерастворимую фазу)
5. Проявление резиста (промывка в растворителе, удаляющем неэкспонированный резист)



6. Стабилизирующий отжиг
(удаление остатков
растворителя)

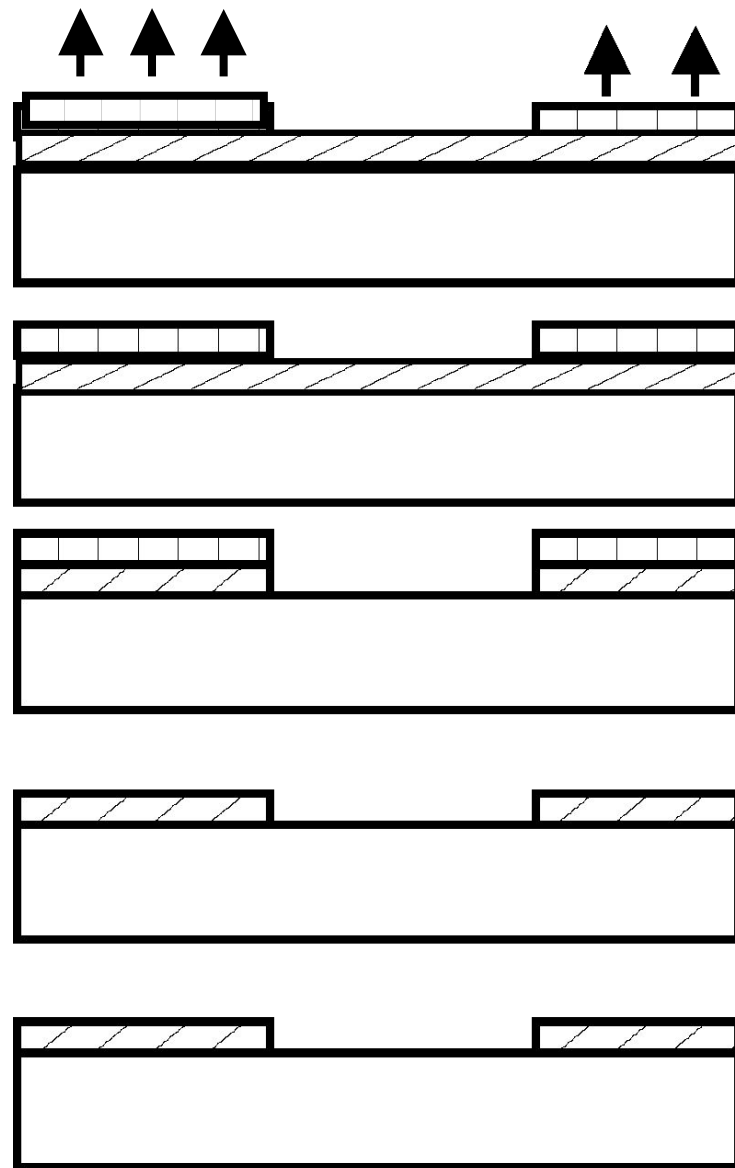
7. Контроль и исправление
дефектов.

8. Травление
(Непосредственный
перенос рисунка

маски на поверхность
полупроводниковой
структуры)

9. Удаление фоторезиста.

10. Финишный контроль.



ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУР НАНОРАЗМЕРНОГО МАСШТАБА.

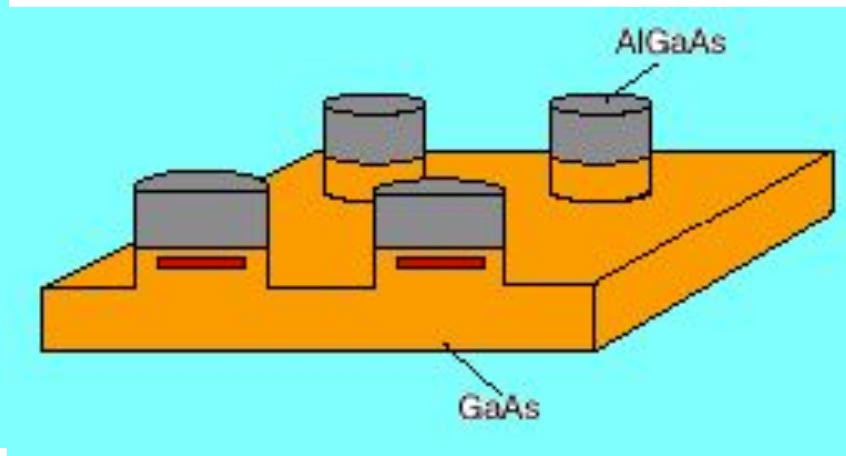
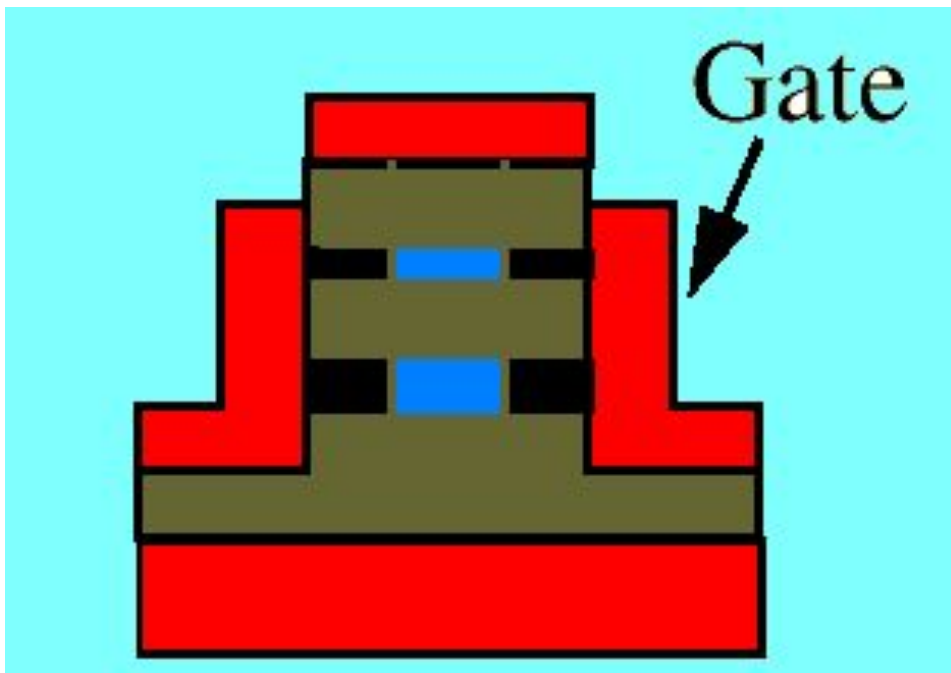
Минимальный размер рисунка, который может быть разрешен с помощью той или иной оптической системы может быть оценен с использованием известной формулы:

$$\sigma = \frac{k_1 \lambda}{NA} \quad DOF = \frac{k_1 \lambda}{(NA)^2}$$

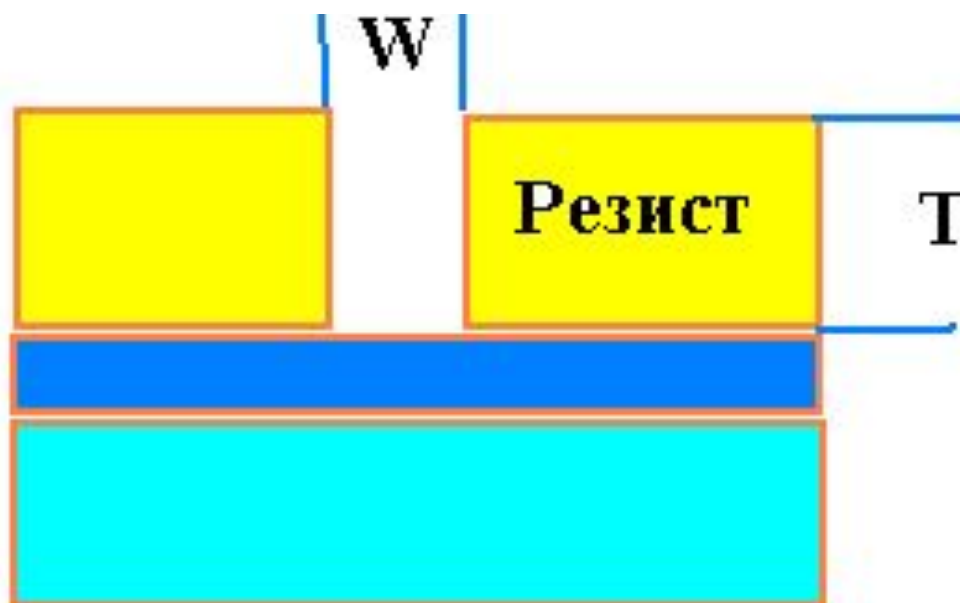
Для производства микросхем с 350 нм рисунками использовалась 360 нм дуговая ртутная лампа (i линия). Дальнейшее увеличение степени интеграции микросхем привело к переходу литографических систем в область так называемого глубокого ультрафиолета (deep UV). 250 нм транзисторы рисуются с использованием 248 нм KrF эксимерного лазера, 180 нм литография оперирует с излучением 198 нм ArF эксимерного лазера. Будущая 118 -120 нм литография ориентирована на использование 157 нм F2 лазера.

Конструкция туннельного резонансного транзистора и структура с набором квантовых точек.

точек.



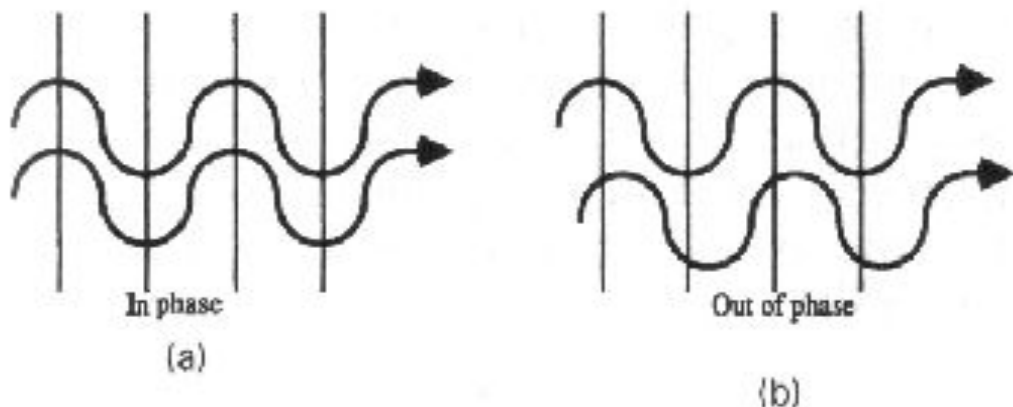
Определение аспектного отношения.



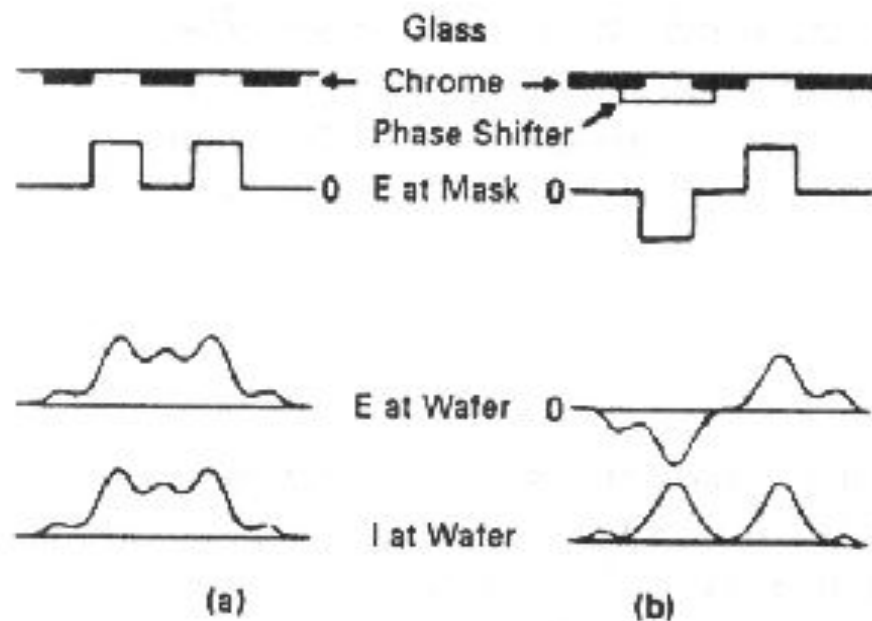
$$\text{Aspect ratio} = T/W$$

Aspect ratio $\gg 1$

Фазосдвигающее маски.

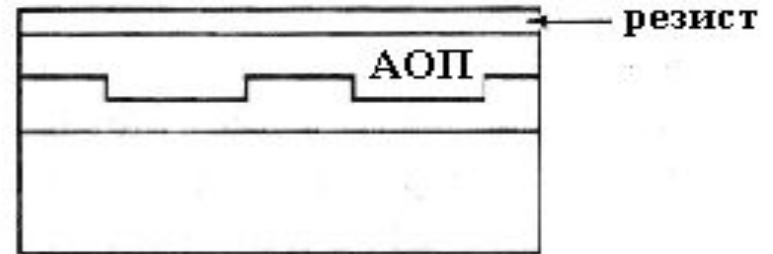


- а) Шаблон без сдвига фазы.
- б) Шаблон с фазовым сдвигом.



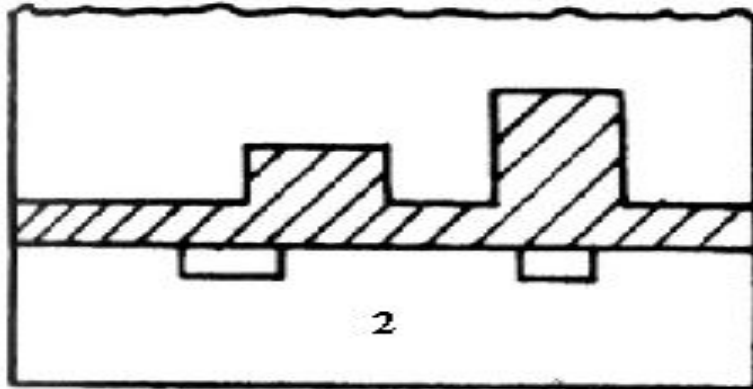
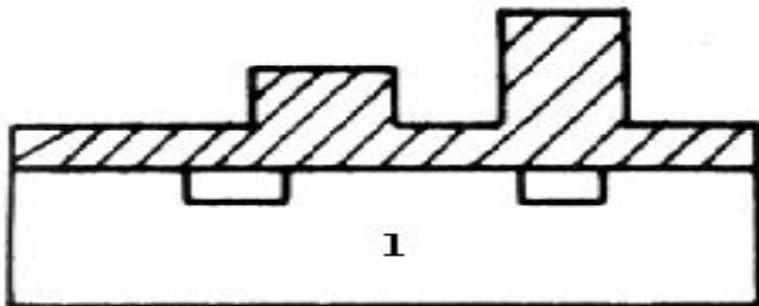
Многослойные резисты.

Применение двухслойного резиста с антиотражающим покрытием (АОП).

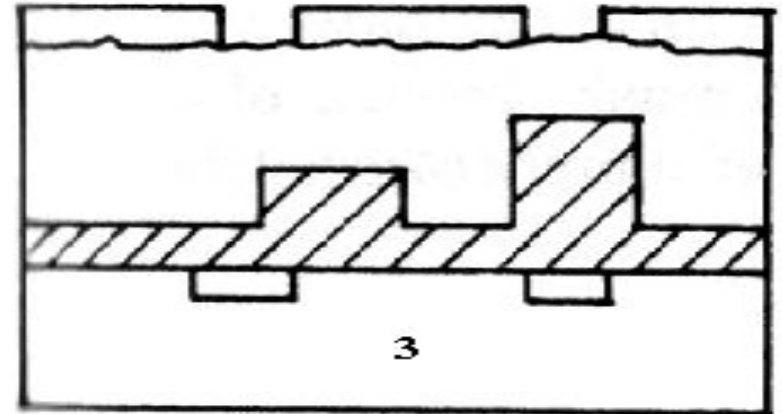


Литография с двухслойным резистом различной полярности.

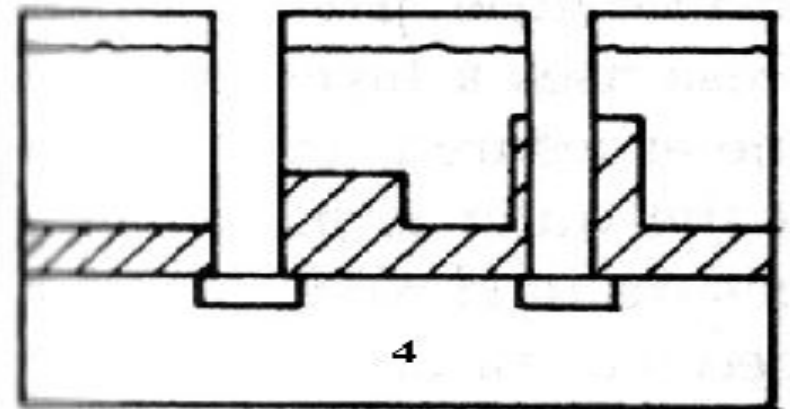
Исходная структура



Нанесение слоя первого резиста (положительный резист)



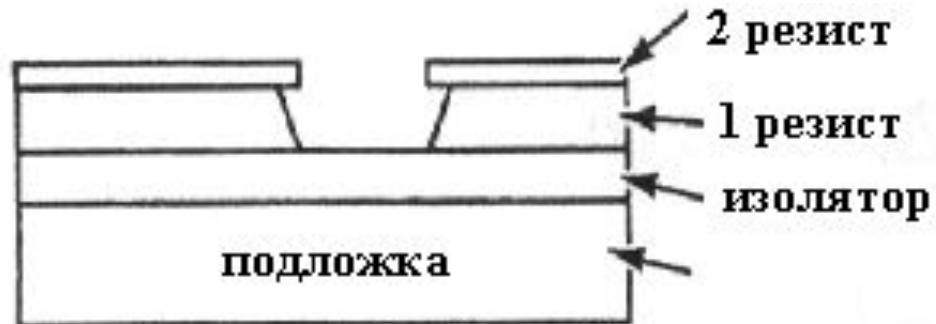
Нанесение второго резиста (отрицательный резист), его экспонирование и проявление



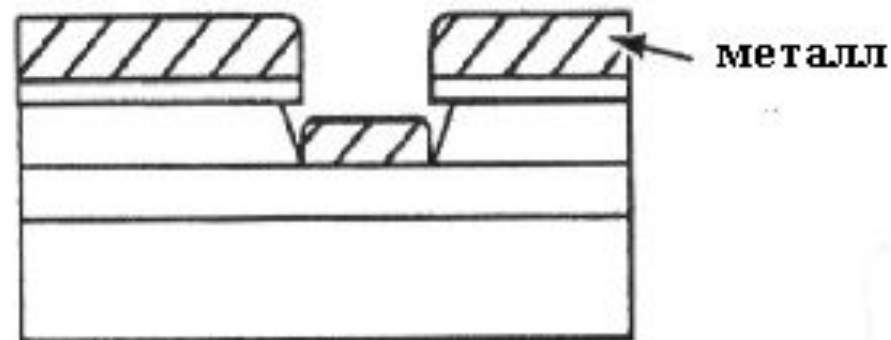
Экспонирование и проявление второго резиста

«Lift-off» процесс.

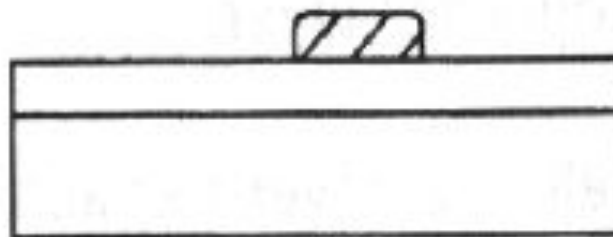
Проявление
двухслойного резиста



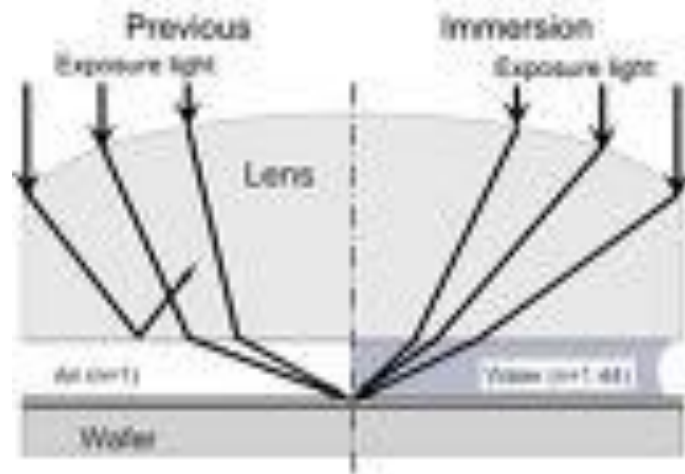
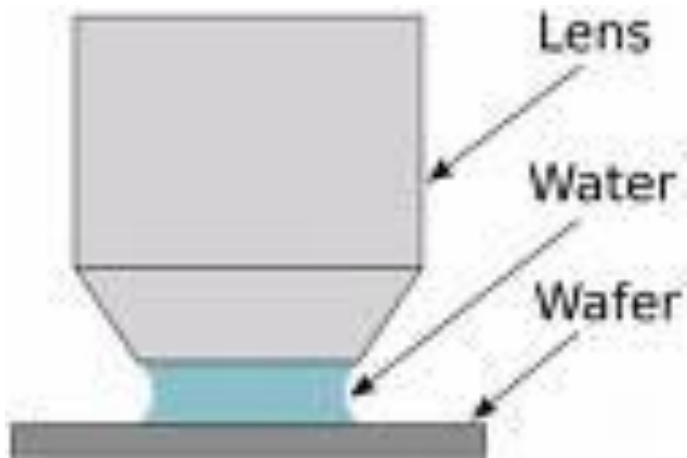
Осаждение металла

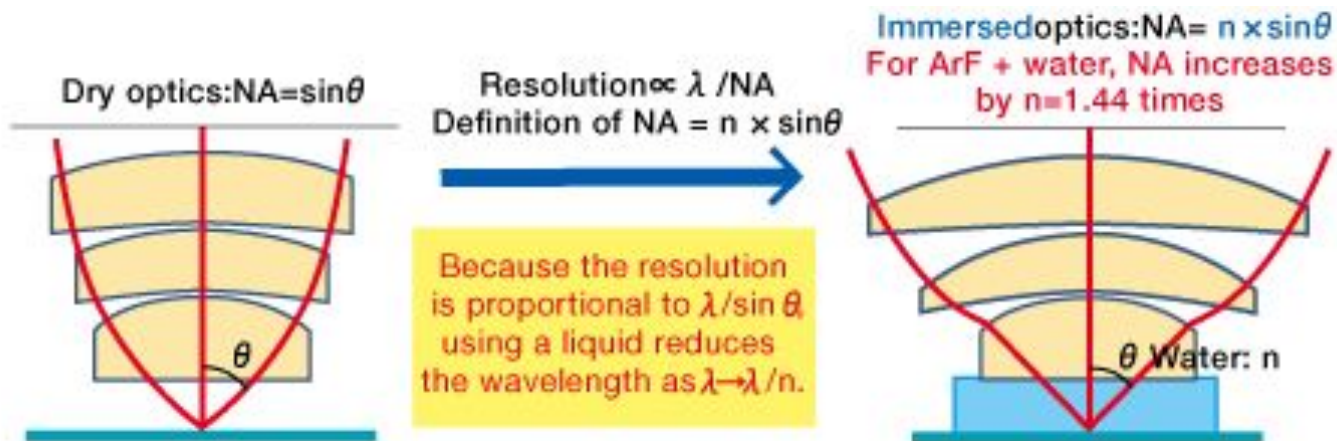


Удаление
резистивного слоя



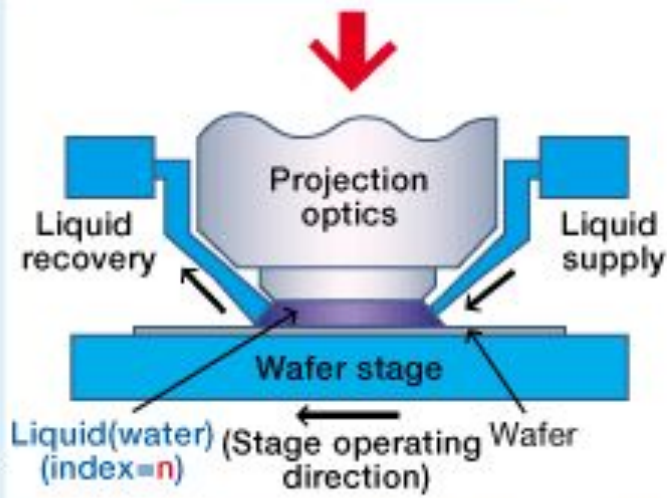
Иммерсионная литография





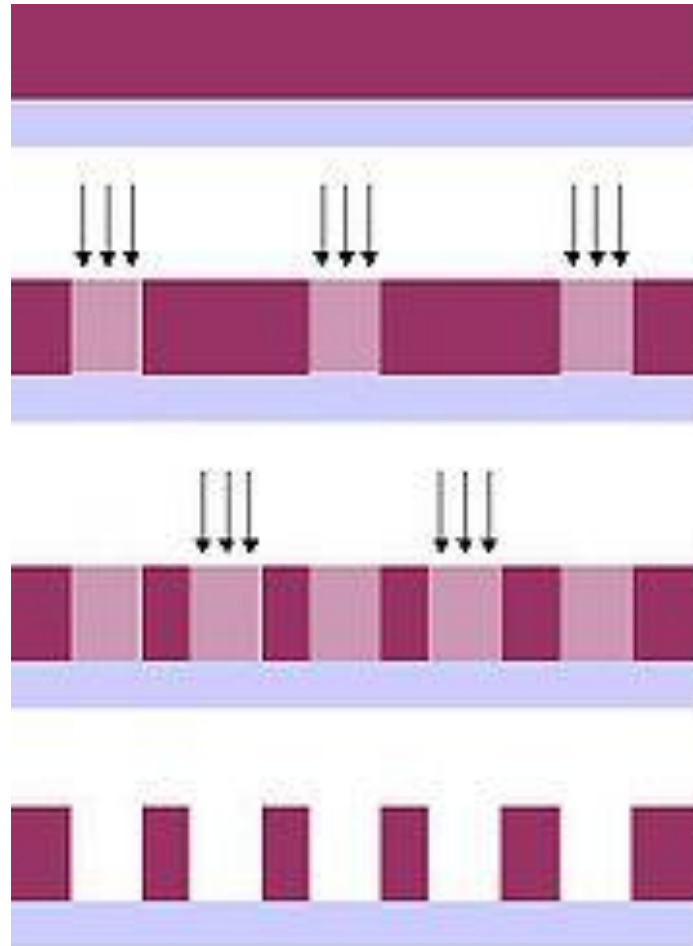
Issues

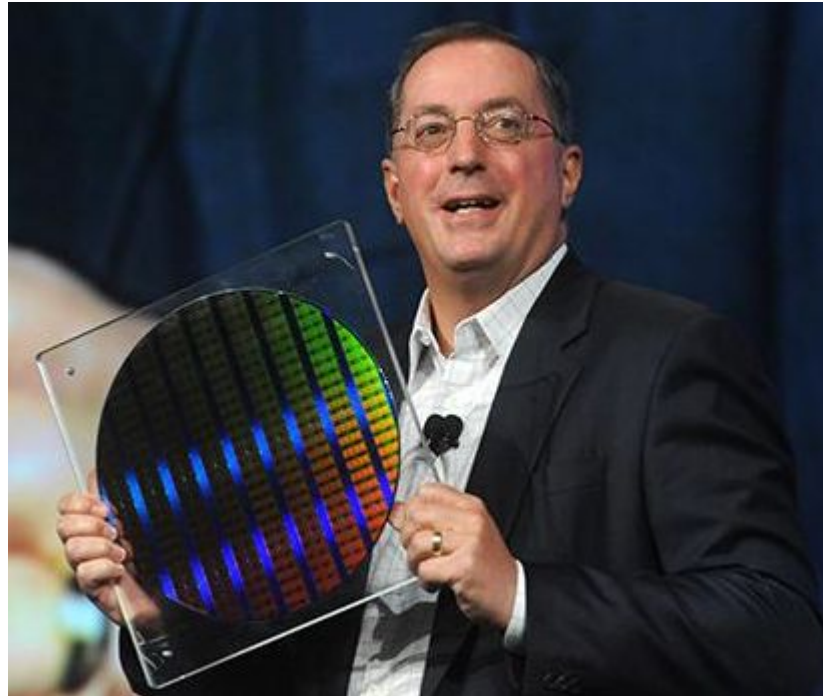
- Liquid
 - How liquid is inserted (Local fill)
 - Supply and recovery of water
 - Bubbles
 - Temperature control
- Optics
 - Development of a reduced projection lens with ultra-high NA
 - Polarizing effect and polarized illumination
 - Focus sensor
- Stage mechanism
 - Edge shot
 - Liquid supply nozzle and stage mechanism
- Process
 - Resist
 - Coater, developer



* Diagram supplied by Nikon Corporation

Double patterning





АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭКСПОНИРОВАНИЯ.

- Для получения структур с разрешением ниже 100 нм становится обоснованным использование принципиально новых способов экспонирования. Принимая во внимание необходимость разработки высокопроизводительных литографических систем можно выделить следующие 4 основные направления: предельный или экстремальный ультрафиолет (extreme UV lithography – EUVL), электронная проекционная литография (SCALPEL), рентгеновская литография (X-ray lithography), ионная литография (ion beam lithography).

ЛИТОГРАФИЯ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОМ.

- EUVL является обычной оптической литографией, но с использованием излучения с длиной волны 11 - 14 нм и отражательными оптикой и фотошаблонами. Источниками излучения в EUVL на первом этапе развития подобных систем служило синхротронное излучение. Однако позже был разработан малогабаритный источник предельного ультрафиолета, принцип работы которого основан на использовании излучения из лазерной плазмы. Излучение стандартного Nd:YAG лазера (1063 нм длина волны, 40 Вт мощность, 100 Гц частота, 5 нс длительность) фокусируется на импульсной газовой струе Хе кластеров.

Схема EUV литографии.

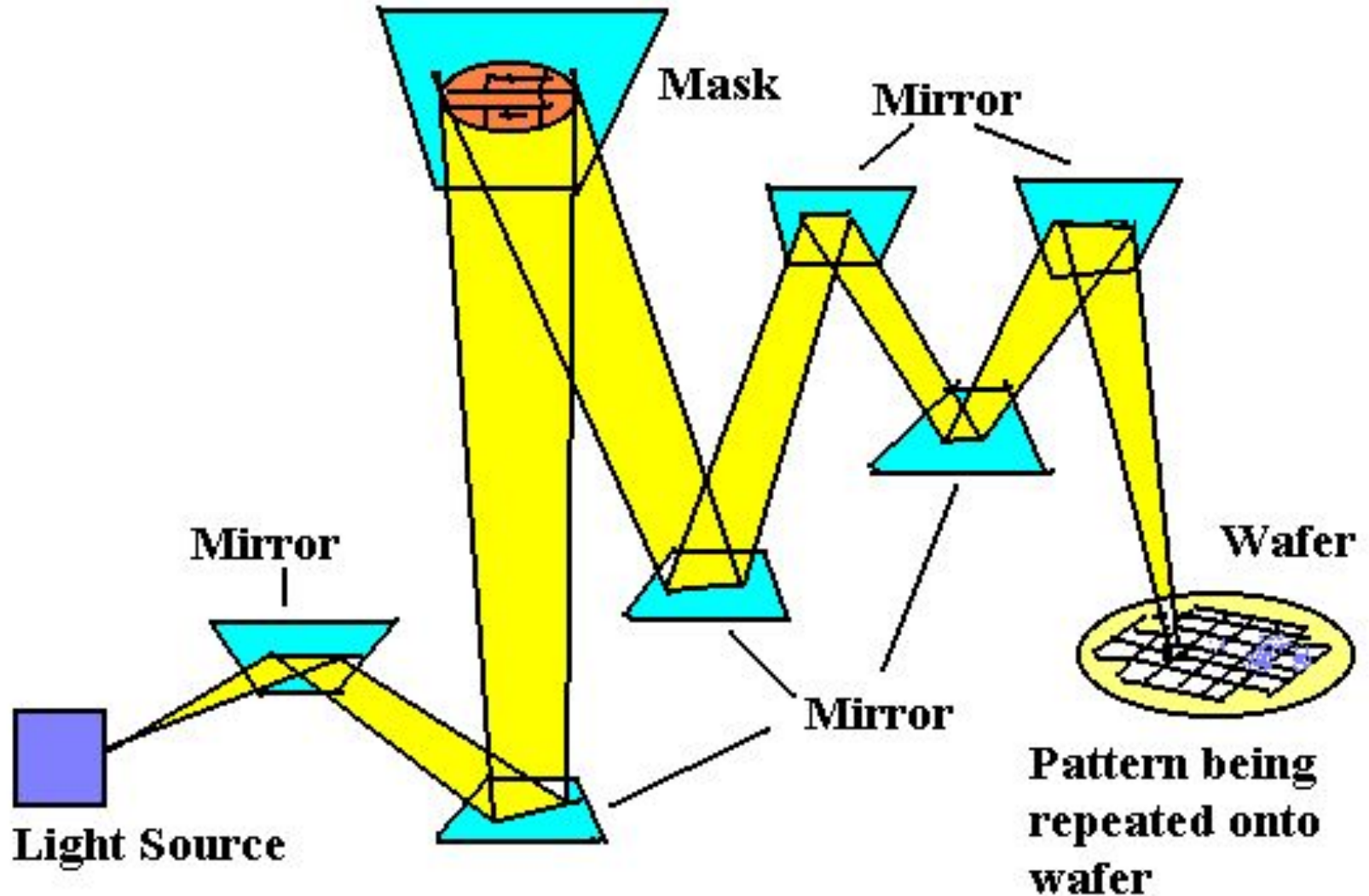
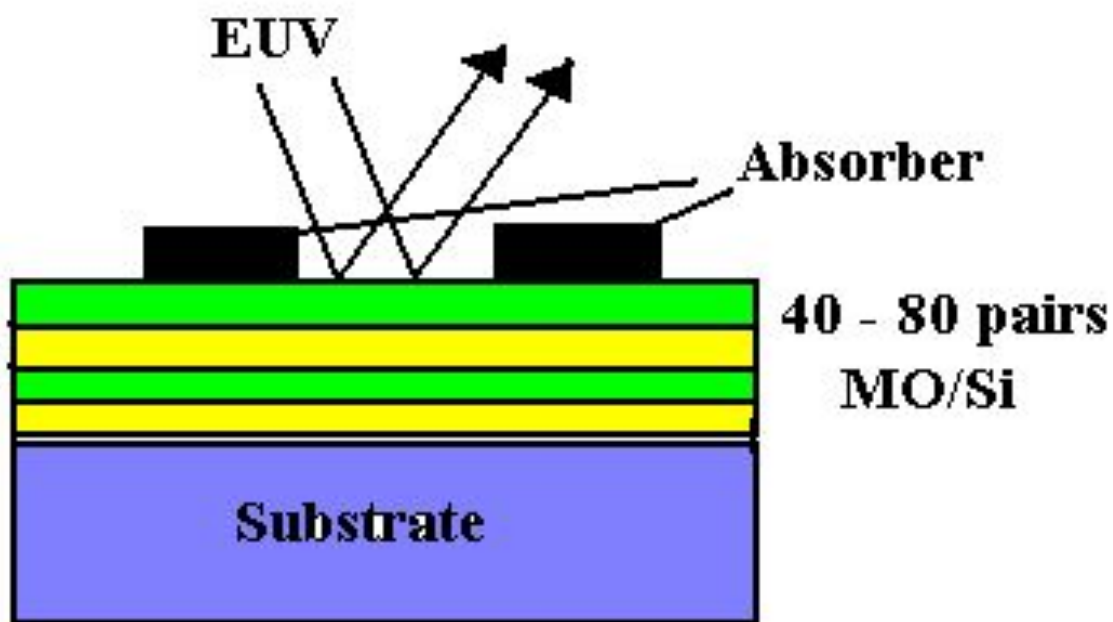


Схема маски для EUV литографии.

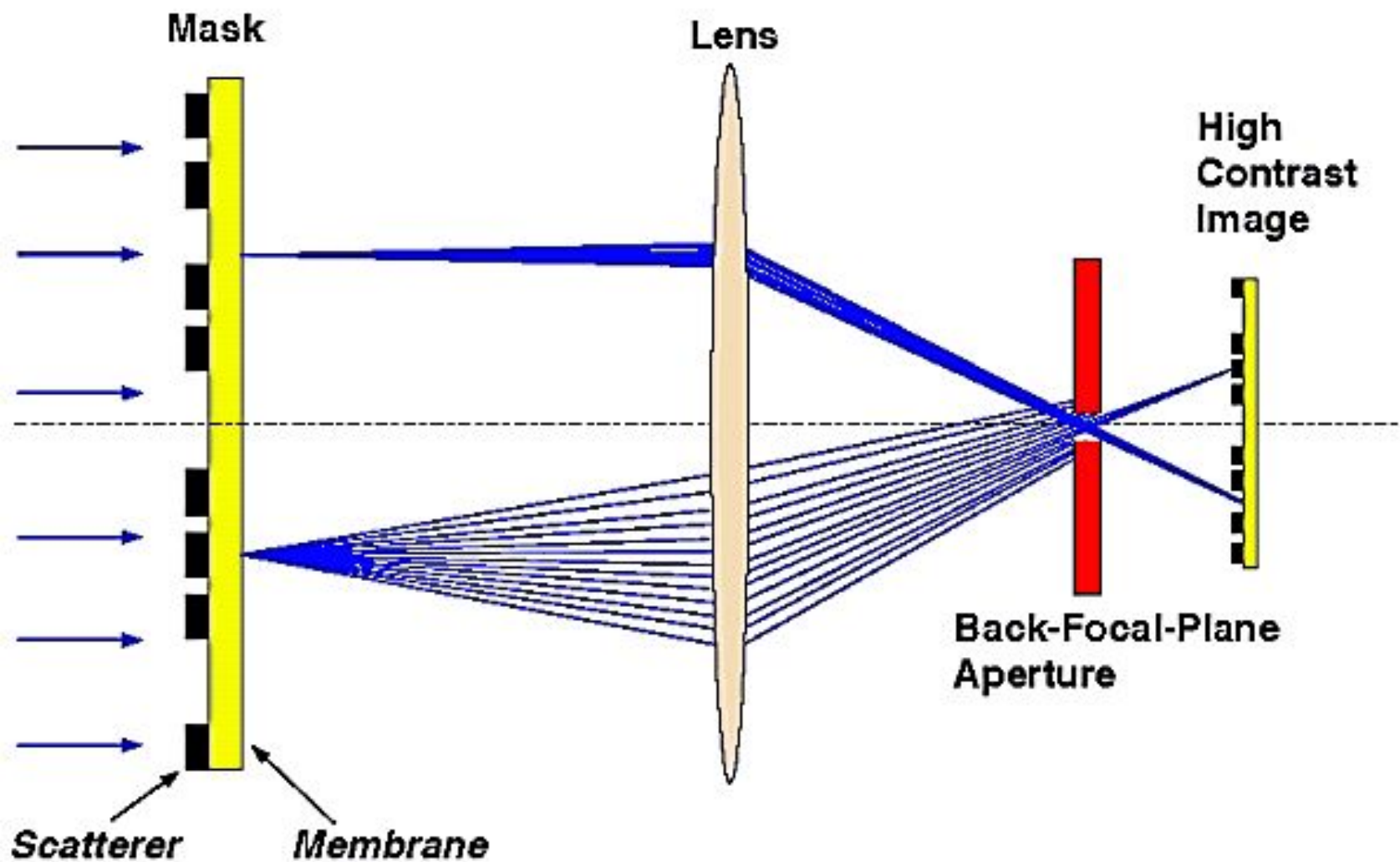


ПРОЕКЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ.

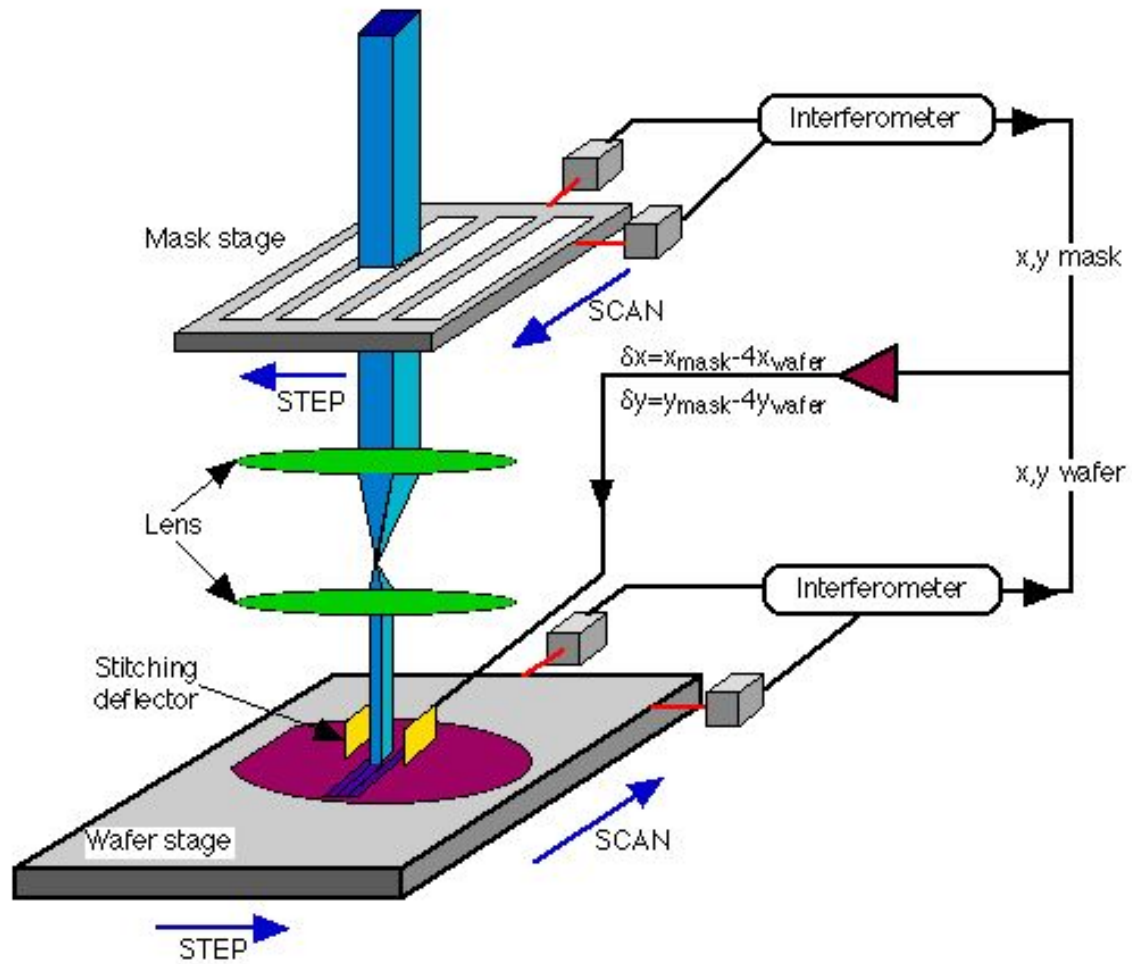
ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ЭЛЛ:

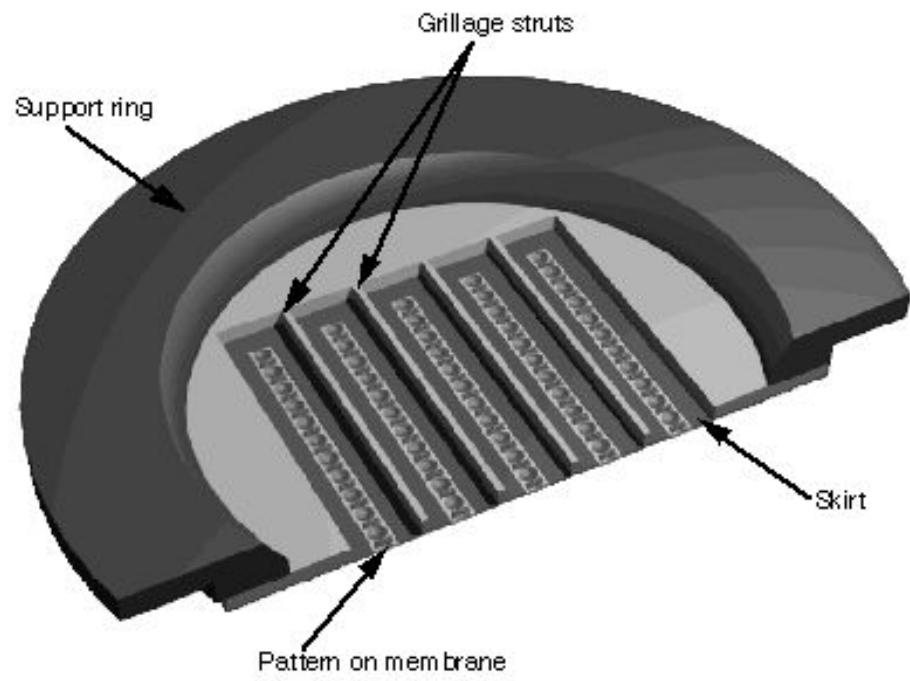
1. Термический нагрев маски.
 2. Большие числовые апертуры.
- Понимание ограничений адсорбционной ЭЛЛ привело к появлению новых проекционных ЭЛЛ систем, одна из которых получила название SCALPEL. Главное отличие новых систем от предыдущих заключается в использовании нового типа масок. Маска системы SCALPEL представляет собой набор мембран, изготовленных из легких элементов, с высокой проницаемостью для электронов. Рисунок создается пленками из тяжелых элементов с большой отражательной способностью.

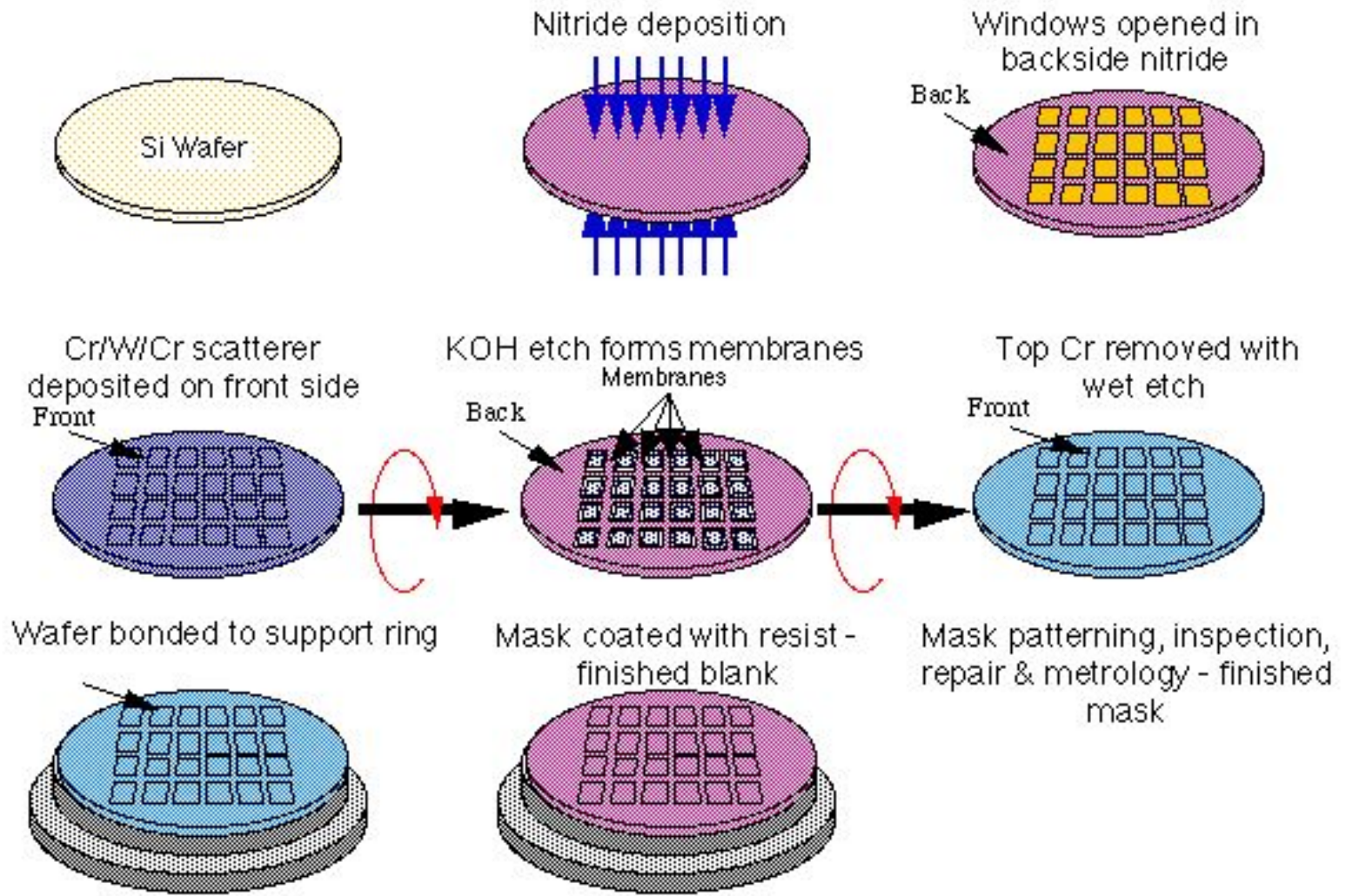
Принцип работы системы SCALPEL:



- Электроны проходящие через мембраны рассеиваются на малые углы, тогда как рисунок рассеивает электроны на большие углы. Апертура, расположенная в обратной фокальной плоскости полевой оптической системы пропускает электроны, рассеянные на малые углы и не пропускает электроны, рассеянные на большие углы, что приводит к формированию на подложке высококонтрастного изображения. При этом в маске не происходит значительного поглощения электронного потока, что минимизирует тепловую нестабильность маски.







Травление микроструктур

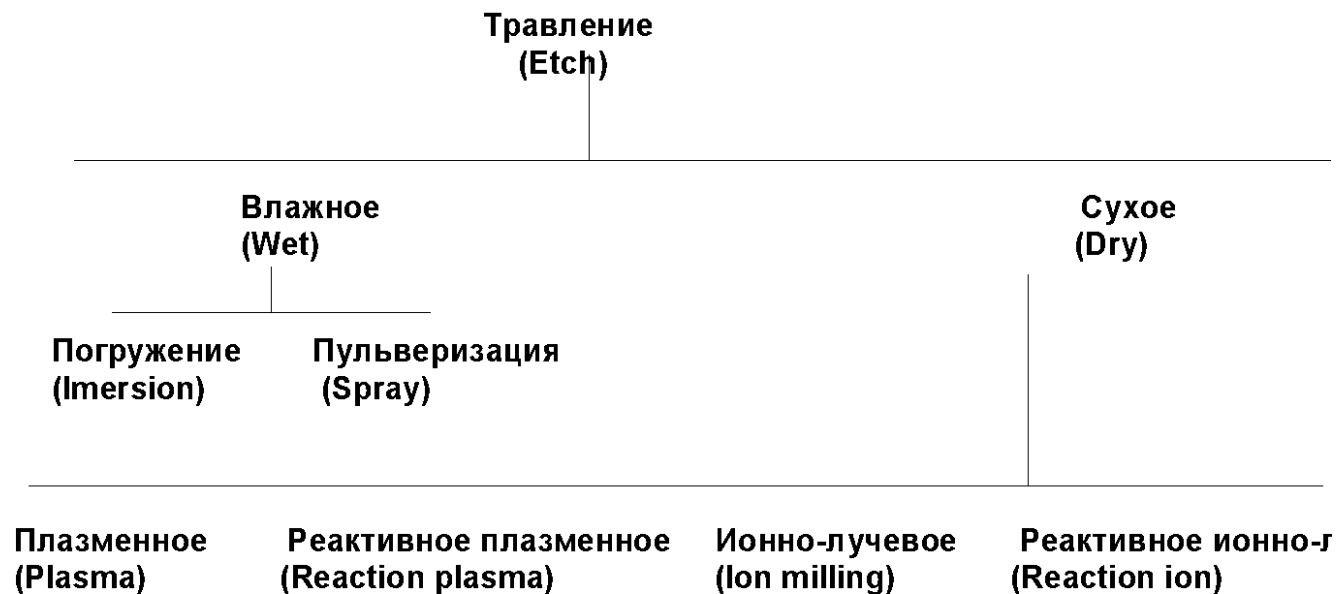
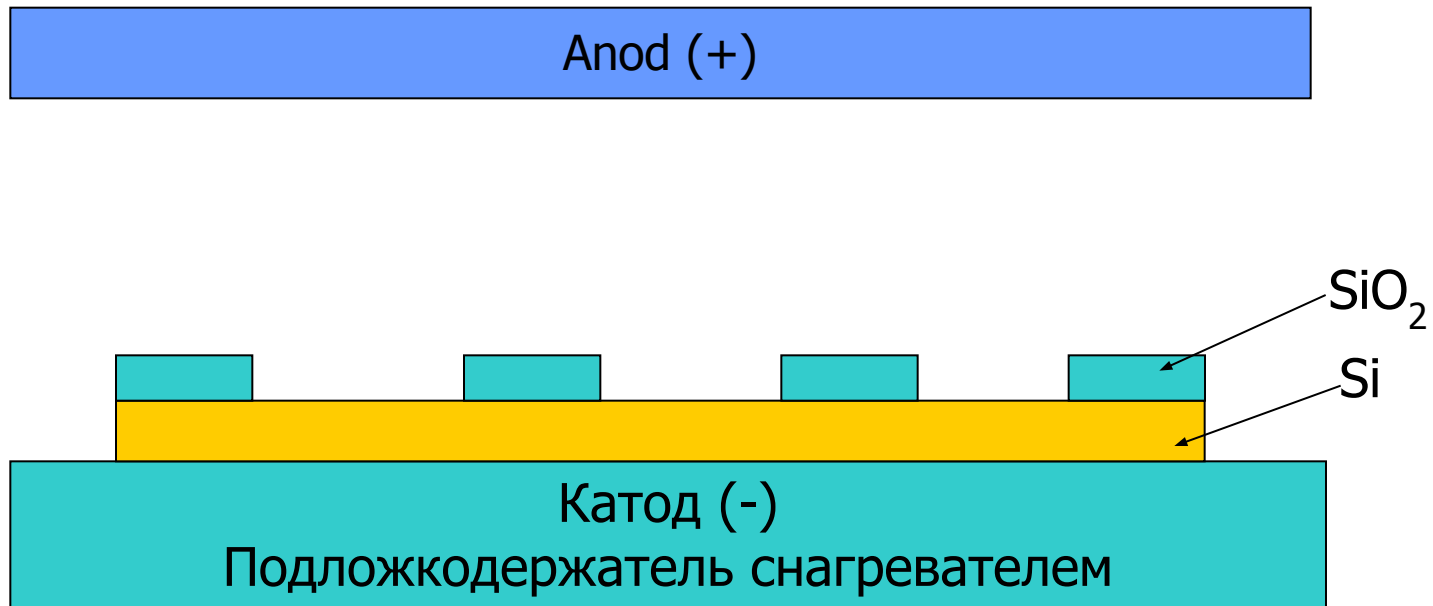


Рис. 2. Классификация процессов травления в литографии

Физическое травление

- Плазменное травление



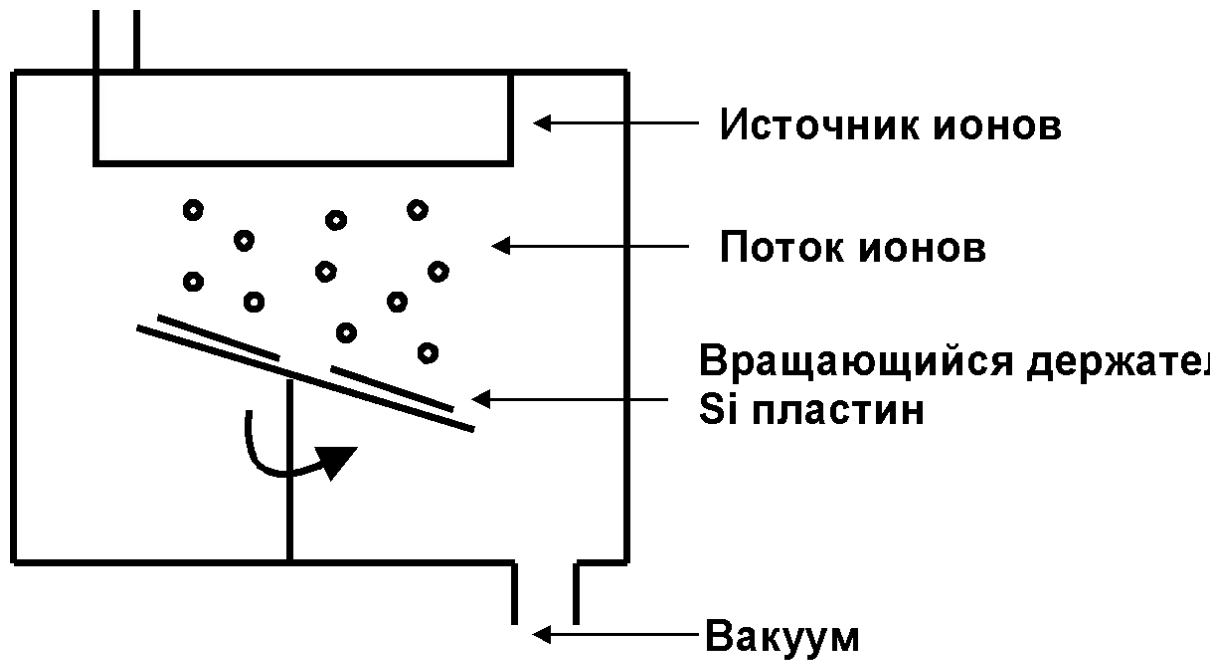
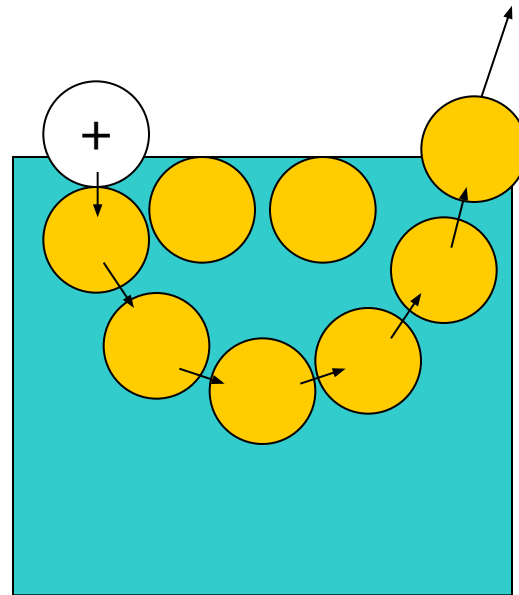
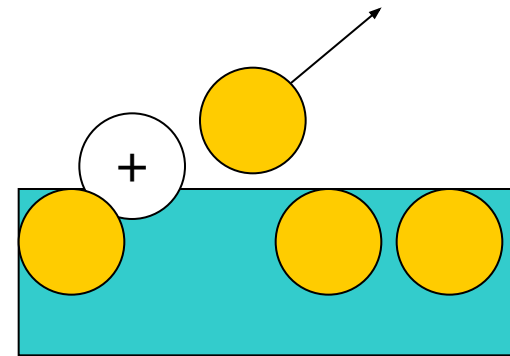
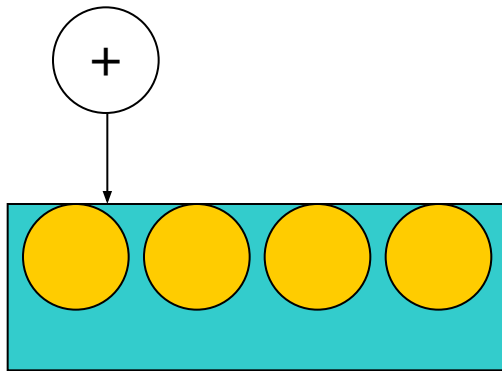


Рис. 7. Схема ионно-лучевого травления.

Катодное распыление



Катодное распыление

$E_i > E_{th}$; E_{th} - пороговая энергия распыления.

E_{th} слабо зависит от атомной массы ионов и мишени

$E_{th} \sim 10 - 30 \text{ eV}$

Среднее расстояние, d_t , проходимое ионом в тв. теле, зависит от энергии и атомного номера иона, атомного номера и структуры мишени.

Для Ar^+ с энергией 0,5-5eV

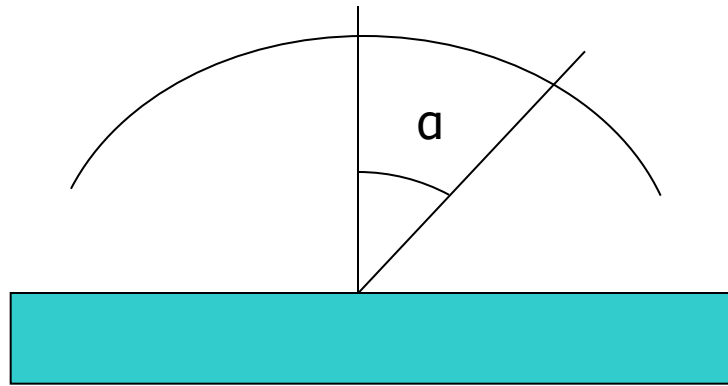
Si – 3,5 nm/keV; SiO_2 – 5,0 nm/keV; Au - 1,3 nm/keV; Al - 1,5 nm/keV;

Толщина поврежденного слоя обычно составляет $\frac{1}{2} d_t$.

Только 5% энергии иона затрачивается на распыление, 70-90 % идет на термический нагрев мишени, остальное на радиационные повреждения, вторичную электронную эмиссию и ЭМ излучение в широком спектре частот.

Катодное распыление

Угловое распределение распыленных атомов при энергии ионов 1-10 keV косинусному закону $N_a = N_0 \cos \alpha$

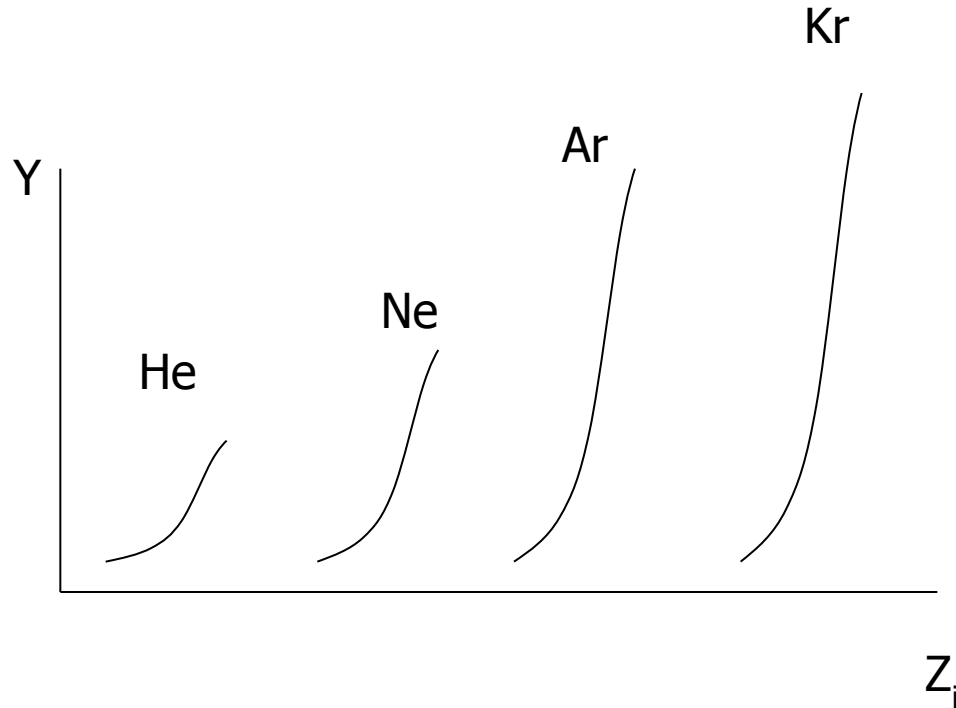


Для $E_i < 1$ keV наблюдается “подкосинусное” распределение распыленных атомов – большее число атомов распыляется параллельно поверхности.

Для $E_i > 10$ keV распределение приближается к гауссовому.

Катодное распыление

Коэффициент распыления $Y = N_a/N_i$



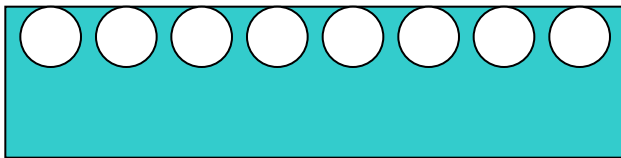
Y зависит от атомного номера мишени. Теория Зигмунда

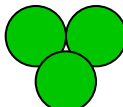
Для $E_{\text{суб}} < E_i < E_i^*$

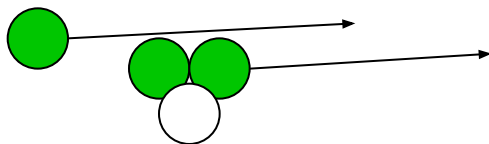
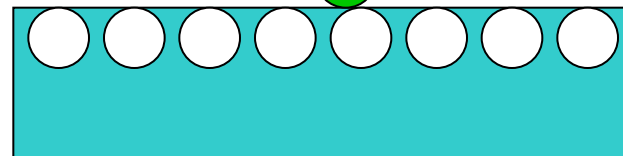
$$Y(E_i) = \frac{3\beta m_i m_a E_i}{\pi^2 (m_i + m_a)^2 2E_{\text{sub}}}$$

Схема реактивного ионного травления

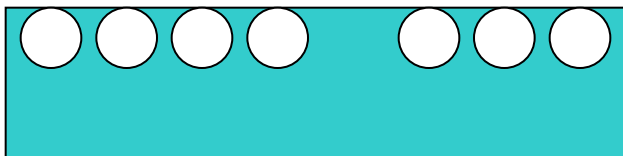
 **Ионизация**



Химическая реакция




**Продукты реакции удаляются
Вакуумной системой**



Реактивное ионное травление (RIE)

Материал	Используемые газы	Новые газы	Примечания
Si	$SF_6 + CHF_3$; $CF_4 + CHF_3$; $CF_4 + O_2$	C_2F_6 ; C_3F_8	CHF_3 – <u>пассивирующий газ</u>
SiO_2	CF_4 ; CCl_2F_2 ; $SF_6 + CHF_3$	C_2F_6 ; C_3F_8	
Поли Si	Cl_2 или $BCl_3 + CHF_3$ или CCl_4	$HBr + O_2$	CHF_3 или CCl_4 – <u>пассивирующие газы</u>
Al	Cl_2 ; BCl_3	$HBr + Cl_2$	Нет загрязнений C
Si_3N_4	CCl_2F_2 ; CHF_3	$CF_4 + H_2$	
W	$SF_6 + Cl_2 + CCl_4$	$NF_3 + Cl_2$	Не травит TiW, TiN
TiW	$SF_6 + Cl_2 + O_2$	SF_6	
GaAs	CCl_2F_2	$SiCl_4 + SF_6$	Не травит AlGaAs
InP	нет	$CH_4 + H_2$	

Таблица 2. Реактивные плазмообразующие газы

Цилиндрические реакторы

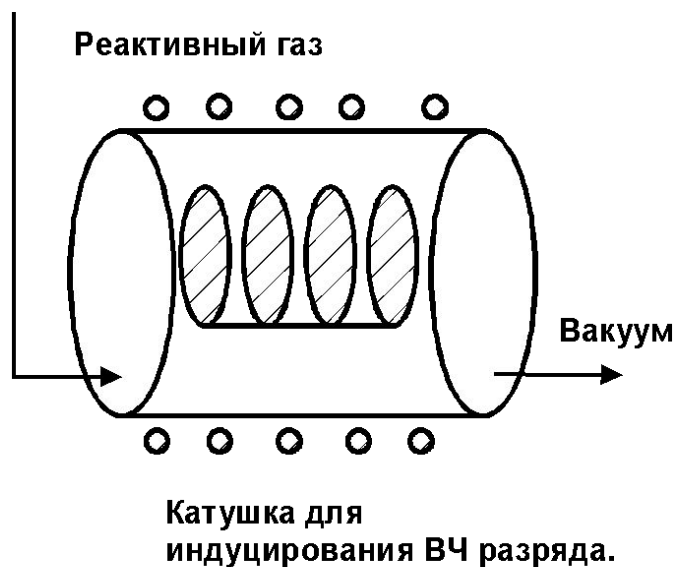


Рис. 3. Цилиндрический плазменный реактор

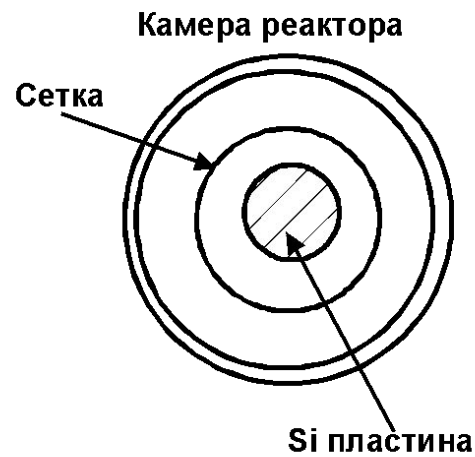
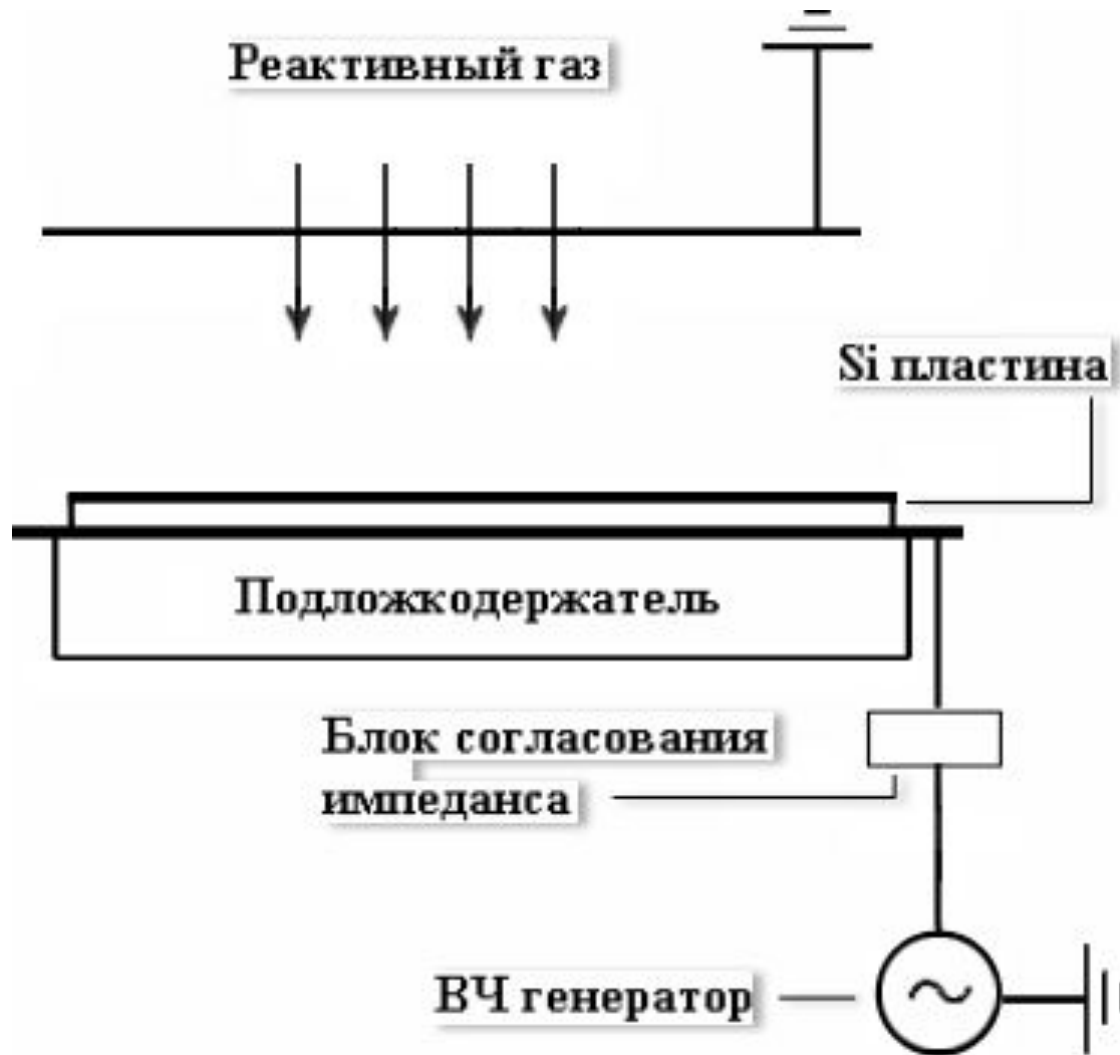


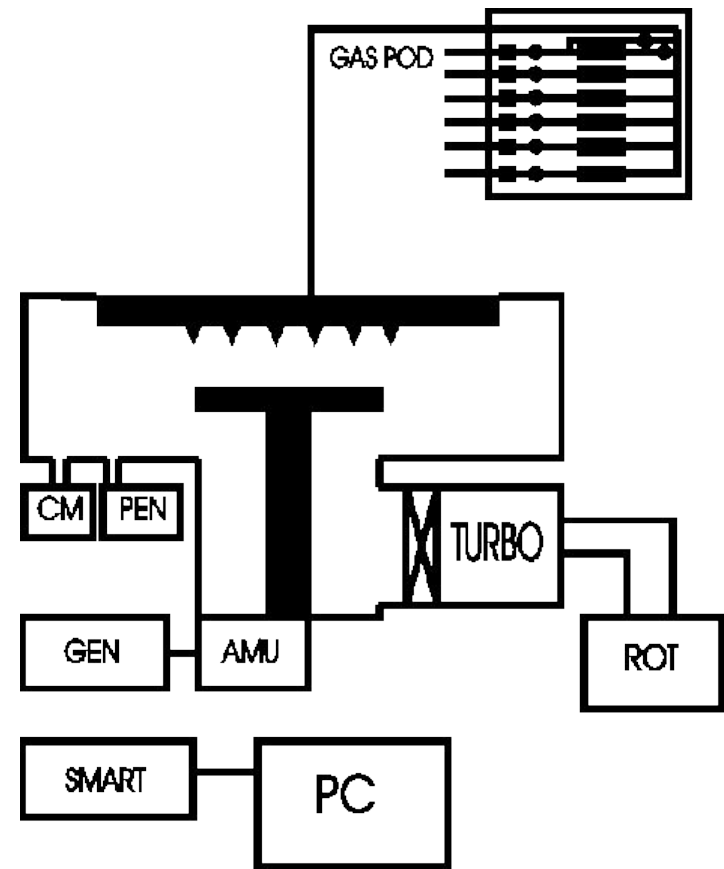
Рис. 4. Плазменный цилиндрический реактор с защитной сеткой.

ТРАВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУР



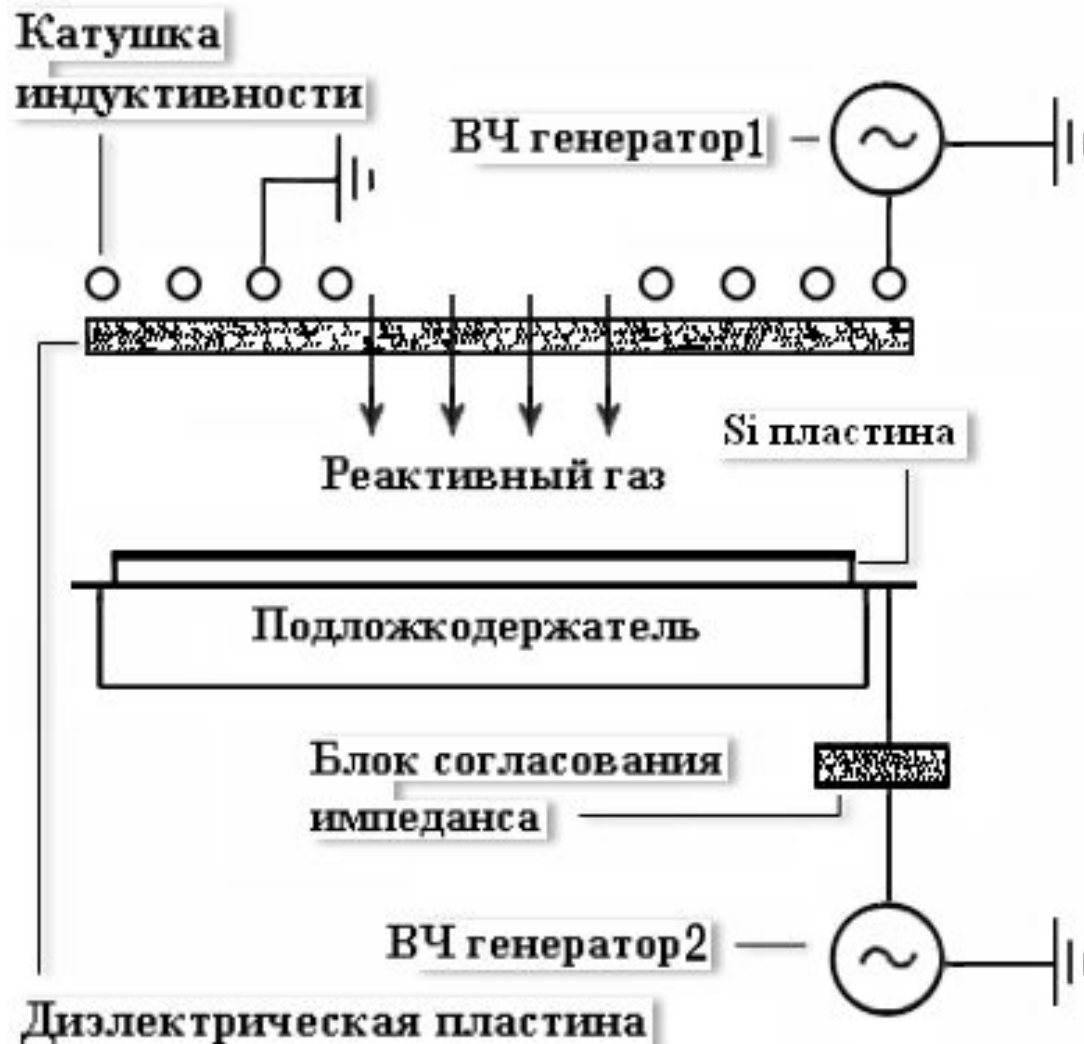
Типовая установка (Oxford instruments)

- **RIE technology**
- **top electrode with shower head gas inlet**
- **substrate electrode with 13 MHz Generator and Automatch (AMU)**
- **substrate electrode water cooled**
- **System control: PLC (programmable logic controller) and PC 2000**
- **Turbo or Roots pump with dual stage rotary as backing pump**
- **gate valve and APC (automatic pressure) control valve**
- **pressure reading: CM gauge for process (Capacitance Manometer)**
- **additional Penning for base pressure**
- **gas pod with 6/ 12 MFC controlled gas lines (Mass Flow Controller)**



- **typical process pressure: 5 - 150 mtorr**
- **plasma density: ca $1 - 5 \times 10^9 / \text{cm}^2$**
- **standard method for most applications**
- **RF ("self") bias forms at the substrate electrode**
- **Ion Energy (\sim RF bias) dependent on the RF power and process pressure**
- **energy range process dependent:
30 eV - 1.000 eV**
- **end point detection: optical emission end point
detection: optical emission, laser interferometry**

ТРАВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУР



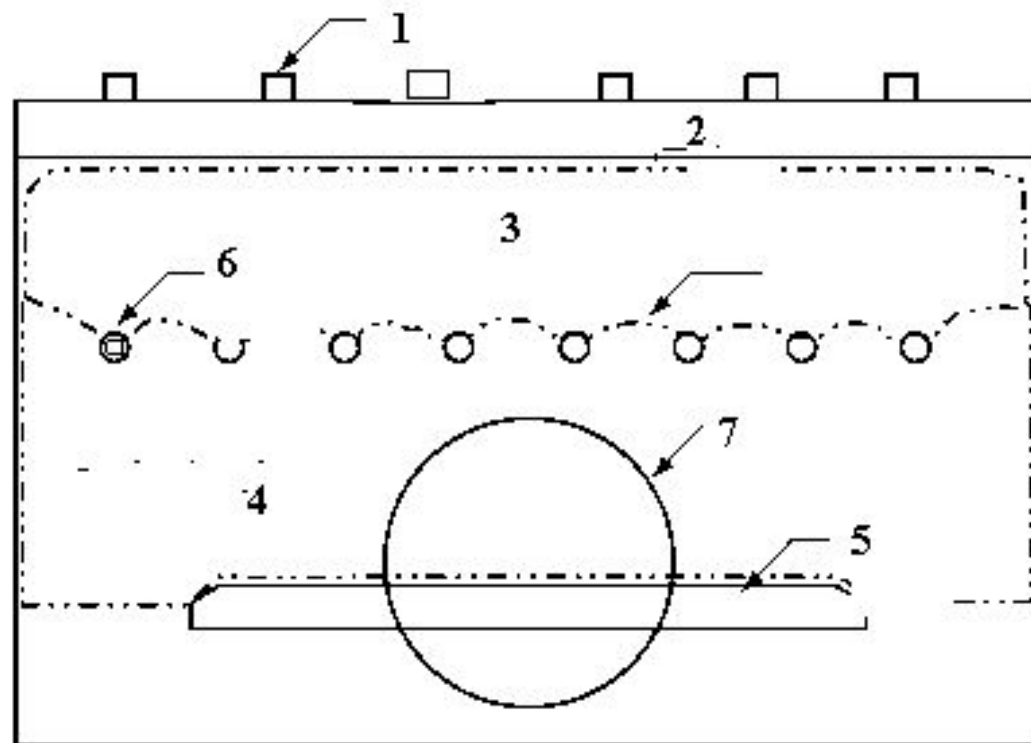


Рис.9. ICP реактор с магнитной ловушкой горячих электронов. 1. ВЧ катушка. 2. Кварцевое окно. 3. Люминисцирующая плазма с горячими электронами. 4. Плазма с холодными электронами (без люминесценции). 5.Обрабатываемая пластина. 6. Магнитный фильтр (магниты в кварцевых трубках) 7. Окно.

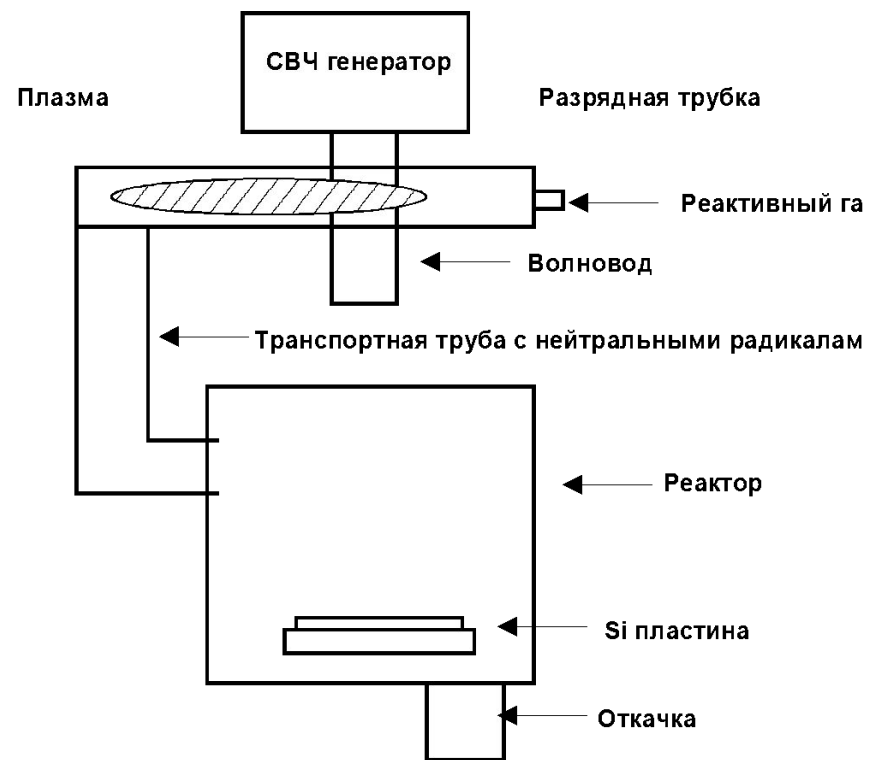


Рис.10. Схема реактора для химического (радикального) травления:

КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗИСТА

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

ОПТИКА

$\lambda = 1060 \text{ nm}$ 1 mJ/sm²

$\lambda = 560 \text{ nm}$ 0,5 mJ/sm²

$\lambda = 118 \text{ nm}$ 16 mJ/sm²

ЭЛ ЭКСПОНИРОВАНИЕ

$U = 50 \text{ kV}$ 15 $\mu\text{C}/\text{sm}^2$

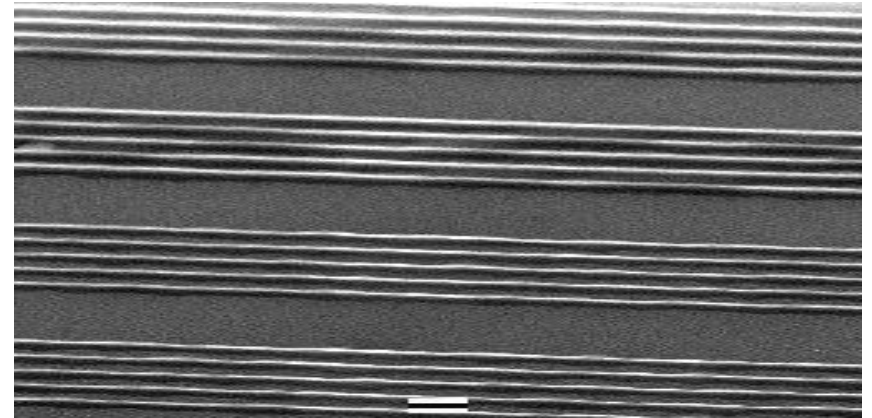
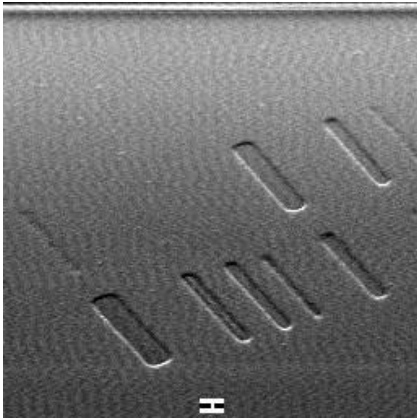
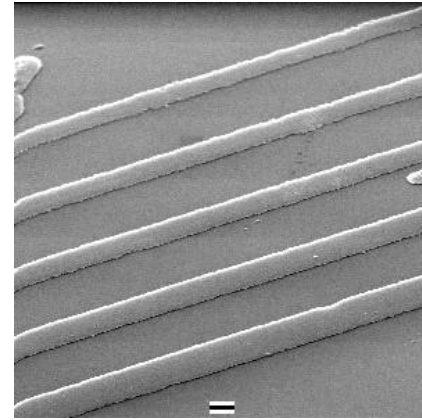
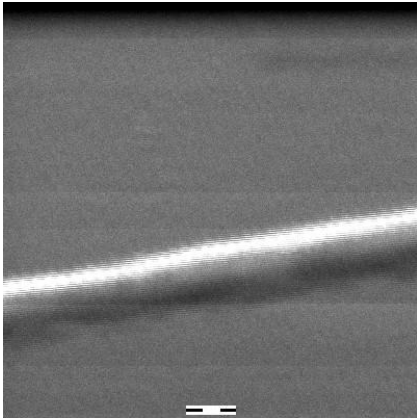
$U = 5 \text{ kV}$ 10 $\mu\text{Кл}/\text{sm}^2$

РАЗРЕШЕНИЕ

Меньше 100 nm для ЭЛ.

$U = 50 \text{ kV}$ and doses 15 - 25 $\mu\text{C}/\text{sm}^2$

Линии ванадиево-оксидного резиста на кремнии.



Definition of ALD

- ALD is a method of applying thin films to various substrates with atomic scale precision.
- Similar in chemistry to chemical vapor deposition (CVD), except that the ALD reaction breaks the CVD reaction into two half-reactions, keeping the precursor materials separate during the reaction.
- ALD film growth is self-limited and based on surface reactions, which makes achieving atomic scale deposition control possible.
- By keeping the precursors separate throughout the coating process, atomic layer thickness control of film grown can be obtained as fine as atomic/molecular scale per monolayer.

Brief History of ALD

- Introduced in 1974 by Dr. Tuomo Suntola and co-workers in Finland to improve the quality of ZnS films used in electroluminescent displays.
- Recently, it turned out that ALD also produces outstanding dielectric layers and attracts semiconductor industries for making High-K dielectric materials.

ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time on the substrate.
- The precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. A second precursor of gas is then introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.
Two fundamental mechanisms:
 - *Chemisorption saturation process*
 - *Sequential surface chemical reaction process*
- Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition
- Since each pair of gas pulses (one cycle) produces exactly one monolayer of film, the thickness of the resulting film may be precisely controlled by the number of deposition cycles.

Ref: A. Knop–Gericke, "Preparation of Model Systems by Physical Methods," a lecture given at Modern Methods in Heterogeneous Catalysis Research Lecture Series, Fritz Haber Institute of the Max Planck Society. 24 April 06.
<<http://w3.rz-berlin.mpg.de/%7Ejentoft/lehre/catalysis0405.html>>.

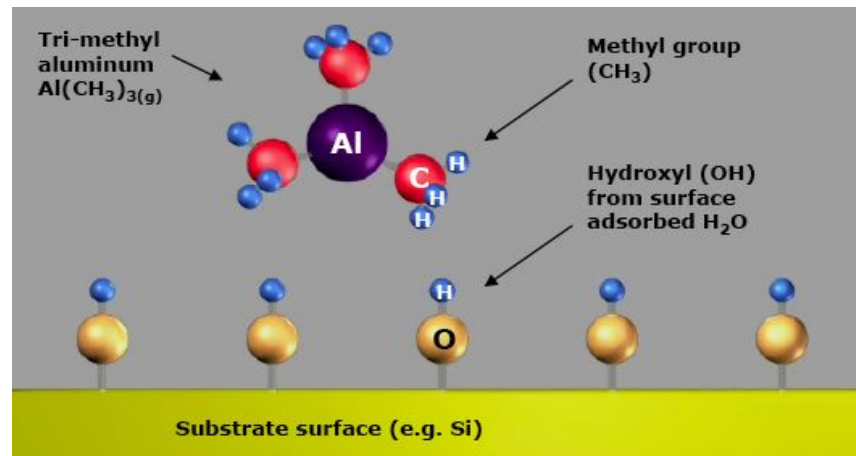
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

● Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (Step 1a)



In air H_2O vapor is adsorbed on most surfaces, forming a hydroxyl group.
With silicon this forms: $\text{Si-O-H}_{(s)}$

After placing the substrate in the reactor, Trimethyl Aluminum (TMA) is pulsed into the reaction chamber.

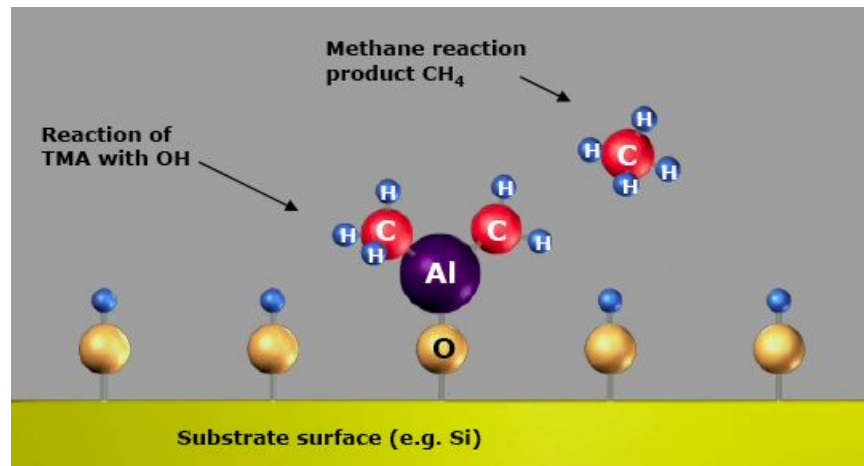
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

● Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (Step 1b)



Trimethyl Aluminum (TMA) reacts with the adsorbed hydroxyl groups, producing methane as the reaction product



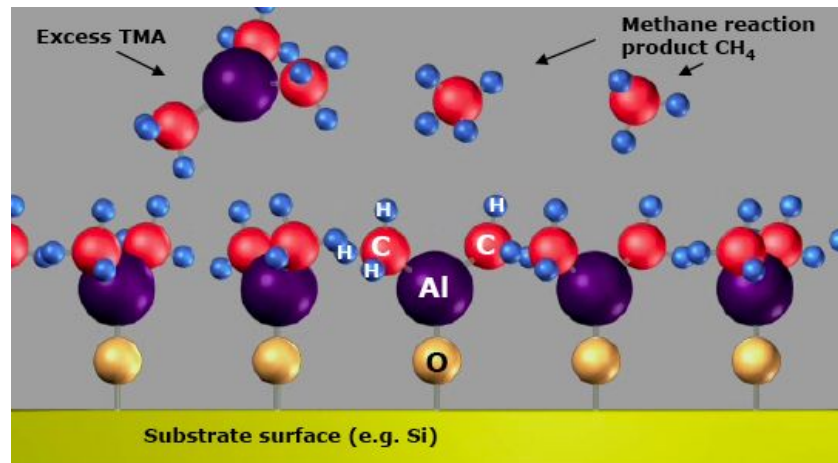
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

- **Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (Step 1c)**



Trimethyl Aluminum (TMA) reacts with the adsorbed hydroxyl groups, until the surface is passivated. TMA does not react with itself, terminating the reaction to one layer. This causes the perfect uniformity of ALD. The excess TMA is pumped away with the methane reaction product.

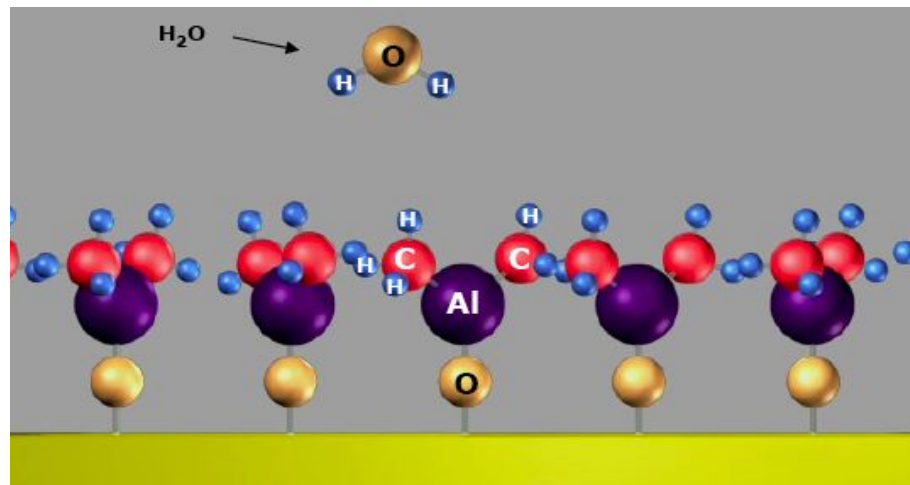
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

- **Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (Step 2a)**



After the TMA and methane reaction product is pumped away, water vapor (H_2O) is pulsed into the reaction chamber.

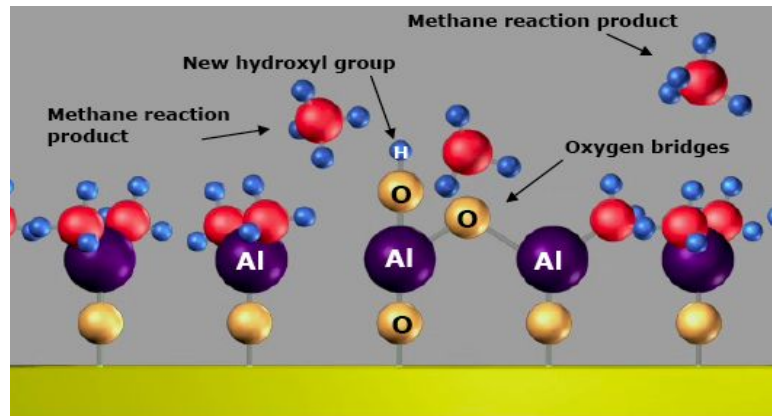
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

● Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (Step 2b)



H_2O reacts with the dangling methyl groups on the new surface forming aluminum-oxygen (Al-O) bridges and hydroxyl surface groups, waiting for a new TMA pulse. Again methane is the reaction product.



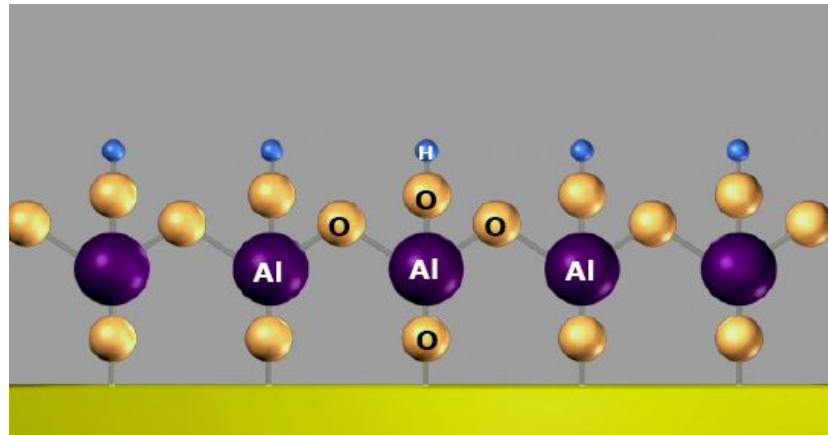
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

- **Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (Step 2c)**



The reaction product methane is pumped away. Excess H_2O vapor does not react with the hydroxyl surface groups, again causing perfect passivation to one atomic layer.

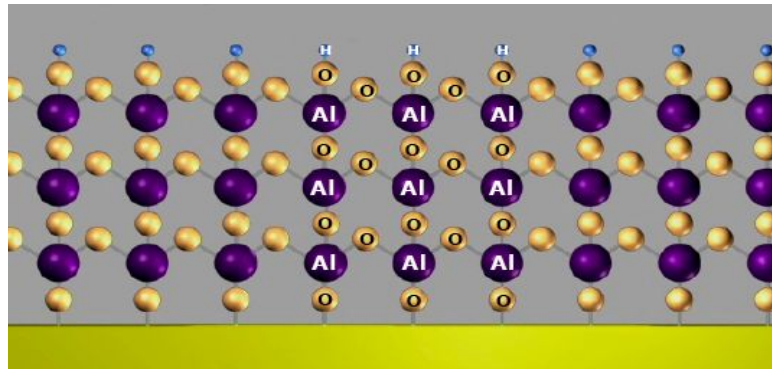
ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.

Two fundamental mechanisms:

- *Chemisorption saturation process*
- *Sequential surface chemical reaction process*

- **Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition (after 3 cycles)**



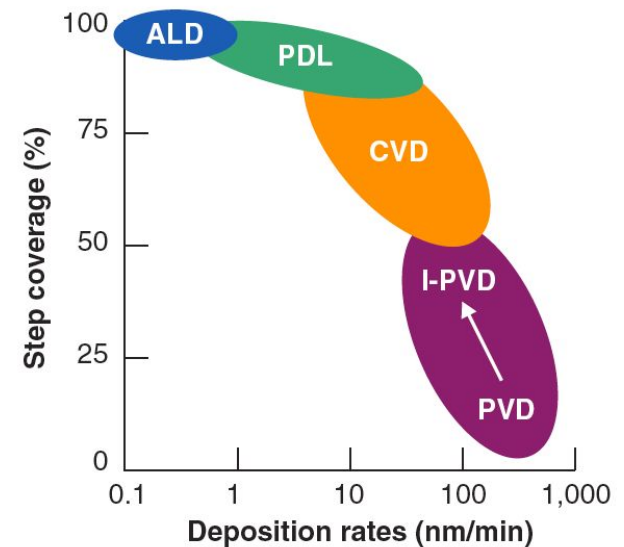
One TMA and one H_2O vapor pulse form one cycle. Here three cycles are shown, with approximately 1 Angstrom per cycle. Each cycle including pulsing and pumping takes e.g. 3 sec.

Two reaction steps in each cycle:



ALD Process and Equipments

- Releases sequential precursor gas pulses to deposit a film one layer at a time.
- A first precursor gas is introduced into the process chamber and produces a monolayer of gas on the wafer surface. Then a second precursor of gas is introduced into the chamber reacting with the first precursor to produce a monolayer of film on the wafer surface.
Two fundamental mechanisms:
 - *Chemisorption saturation process*
 - *Sequential surface chemical reaction process*
- Example: ALD cycle for Al_2O_3 deposition
- Since each pair of gas pulses (one cycle) produces exactly one monolayer of film, the thickness of the resulting film may be precisely controlled by the number of deposition cycles.



Step coverage and deposition rate Vs. deposition technique.

ALD Process and Equipments

Four main types of ALD reactors

- Closed system chambers
- Open system chambers
- Semi-closed system chambers
- Semi-open system chambers

ALD Process and Equipments

Four main types of ALD reactors

- Closed system chambers (most common)
- Open system chambers
- Semi-closed system chambers
- Semi-open system chambers

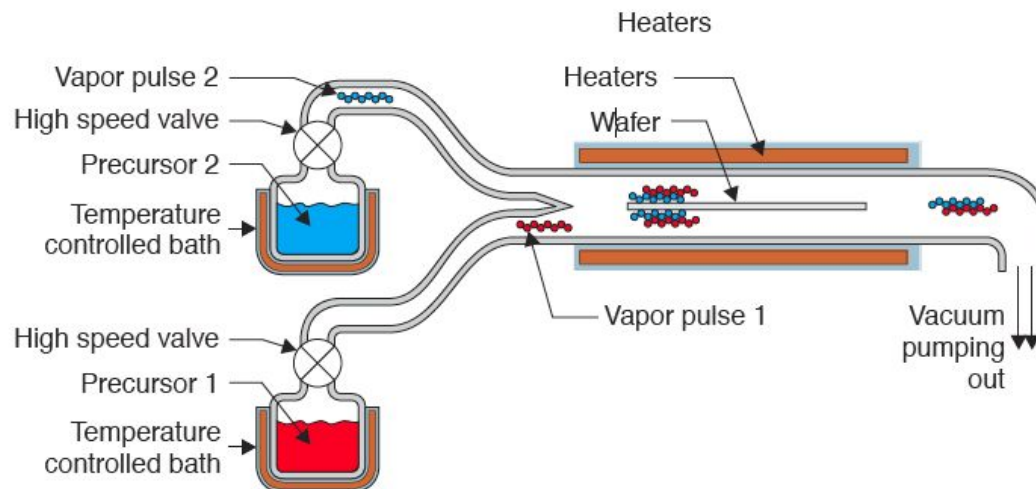


ALD Process and Equipments

Four main types of ALD reactors

- **Closed system chambers** (most common)

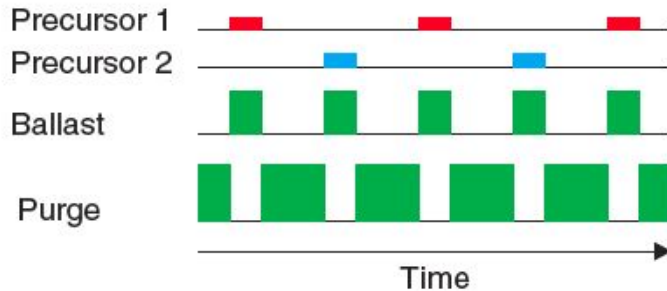
- The reaction chamber walls are designed to effect the transport of the precursors.



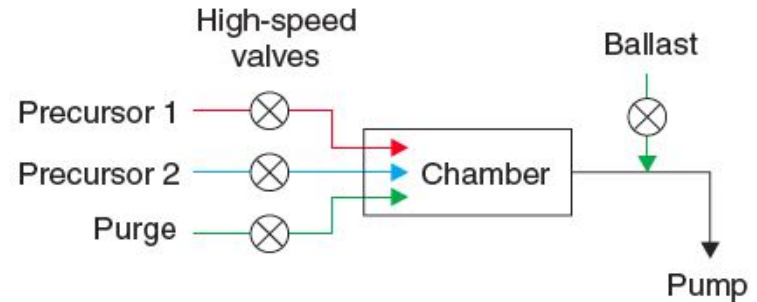
Schematic of a closed ALD system

- Open system chambers
- Semi-closed system chambers
- Semi-open system chambers

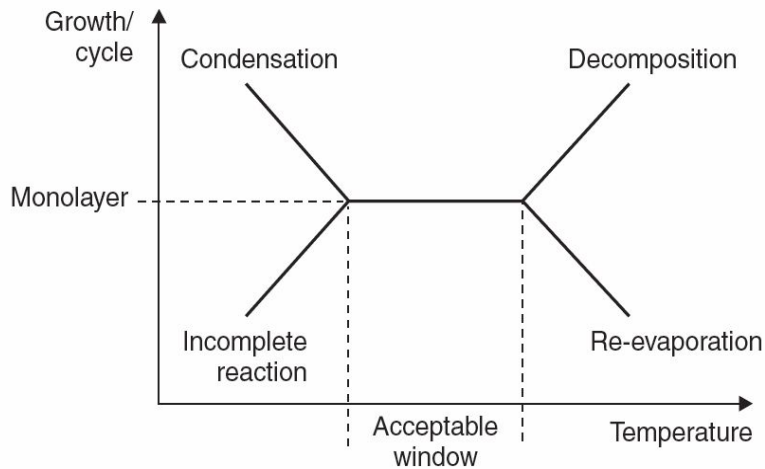
ALD Process and Equipments



Gas flows [1]



System schematic [1]



Process Temperature [1]

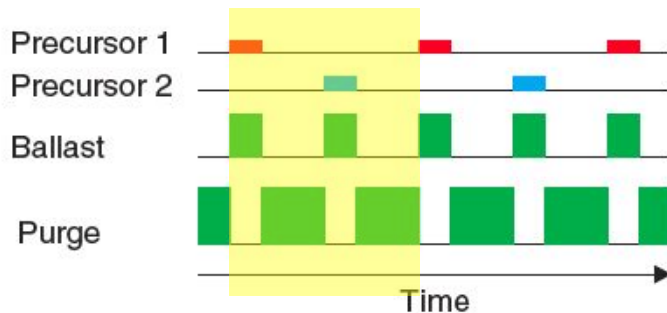
The Verano 5500™
 A 300-mm ALD system by Aviza Technology, Inc [2].



¹ "Technology Backgrounder: Atomic Layer Deposition," IC Knowledge LLC, 24 April 06.
 <www.icknowledge.com/misc_technology/Atomic%20Layer%20Deposition%20Briefing.pdf>

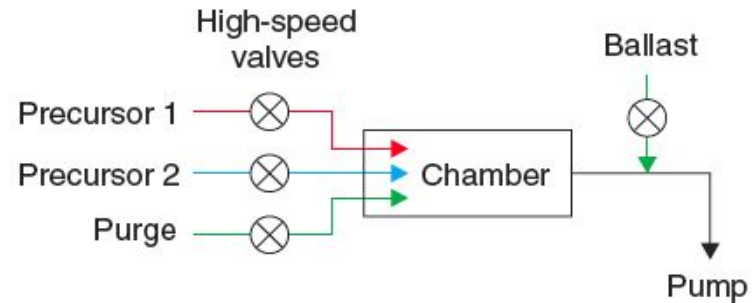
² "Atomic Layer Deposition," Aviza Technology, 26 April 06.
 <<http://www.avizatechnology.com/products/verano.shtml>>.

ALD Process and Equipments

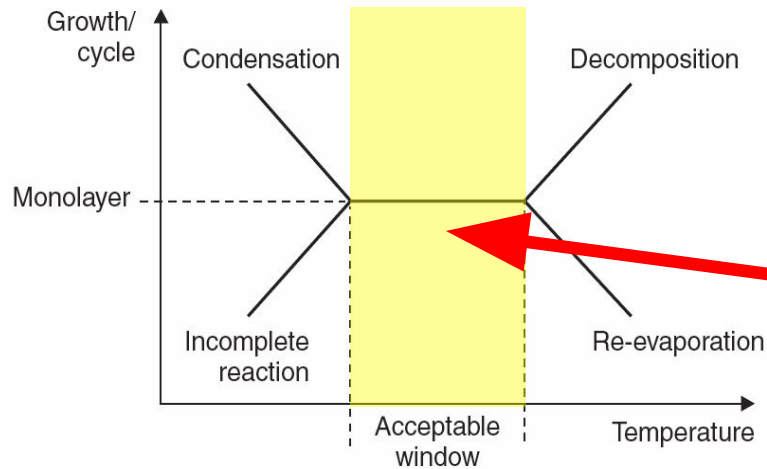


One cycle

Gas flows [1]



System schematic [1]



Process Temperature [1]

The Verano 5500™
A 300-mm ALD system by Aviza Technology, Inc [2].

Acceptable temperature range for deposition.



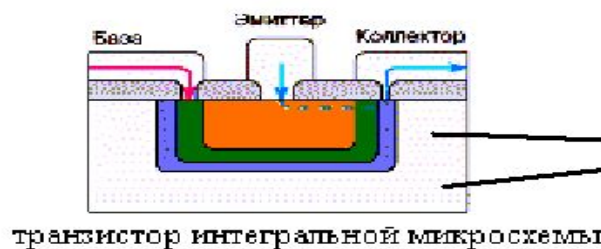
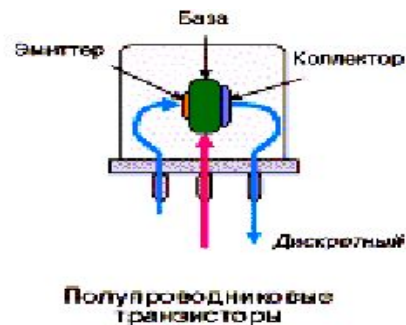
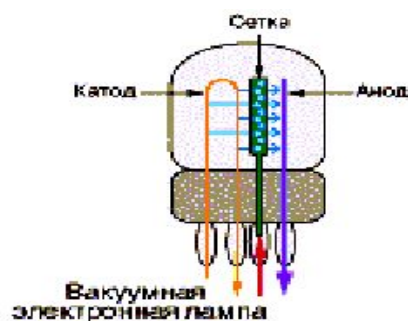
¹ "Technology Backgrounder: Atomic Layer Deposition," IC Knowledge LLC, 24 April 06.
<www.icknowledge.com/misc_technology/Atomic%20Layer%20Deposition%20Briefing.pdf>.

² "Atomic Layer Deposition," Aviza Technology, 26 April 06.
<<http://www.avizatechnology.com/products/verano.shtml>>.

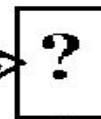
ALD Applications

- High-K dielectrics for CMOS
- Semiconductor memory (DRAM)
- Cu interconnect barrier
- Deposition in porous structures

Элементы электронных систем.



базовый элемент наноэлектроники



Физические основы наноэлектроники

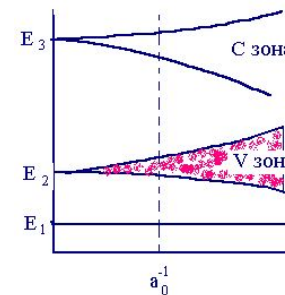
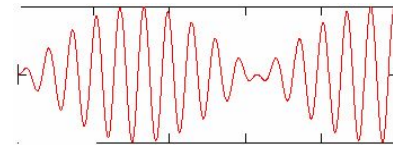
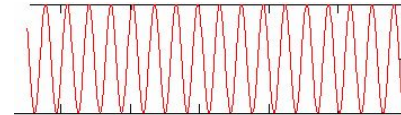
$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + V(x) \varphi = E \varphi$$

$$V(x) = V(x + a)$$

$$\varphi(x) = U(x) e^{ikx}$$

$$U(x) = U(x + a)$$

$$\varphi(x) = A e^{ikx}$$



Квантовые основы наноэлектроники

- **квантовое размерное ограничение**
- **интерференция**
- **туннелирование через
потенциальные барьеры.**

Квантовое размерное ограничение

Уравнение Шредингера



Erwin Schrödinger (1887–1961)
Established quantum mechanical wave equation

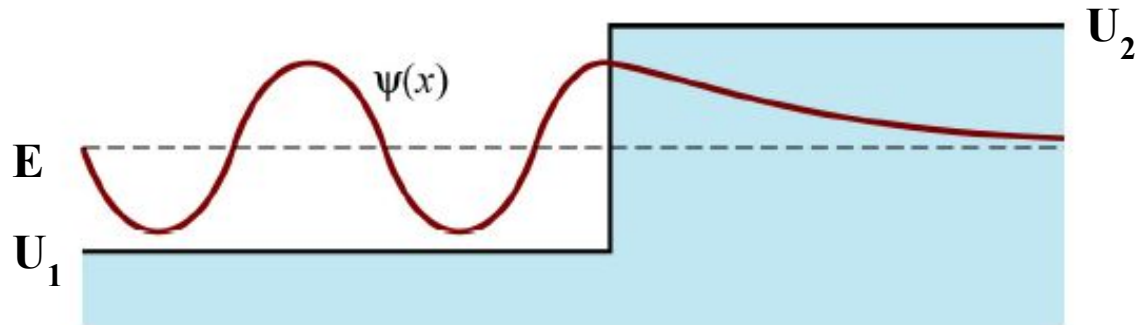
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + U(x) \psi(x) = E \psi(x)$$

Решения уравнения Шредингера в непериодическом потенциале

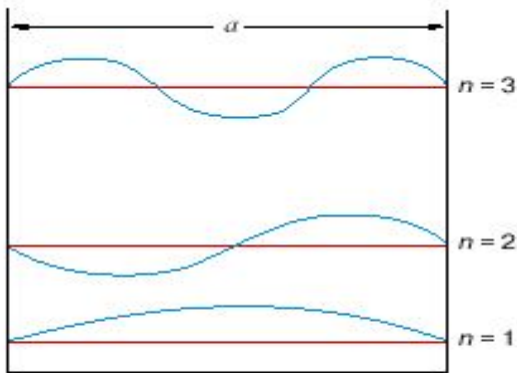
Решение уравнения Шредингера для $U(x) = \text{const}$

Для области, где $E > U_1$, решение уравнения Шредингера
 $\psi(x) = A \exp(ikx)$, где $k = [2m(E - U_1)/\hbar^2]^{1/2}$

Для $E < U_2$, $\psi(x) = A \exp(-kx)$, где $k = [2m(U_2 - E)/\hbar^2]^{1/2}$



Квантовое размерное ограничение.



$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi x}{a} n\right)$$

$$\frac{\lambda_n}{2} = \frac{a}{n}$$

$$p_n a = \pi \hbar n$$

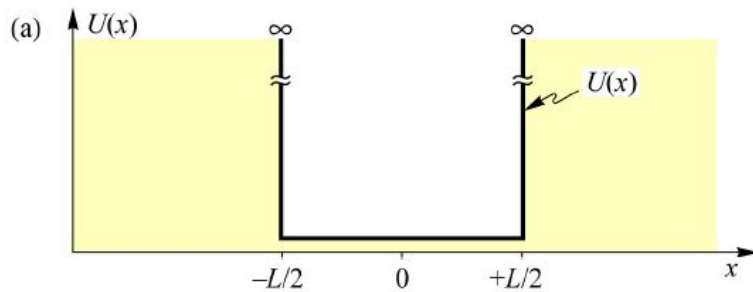
$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2$$

$$E_0 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}$$

$\Delta E = 0.02 \text{ эВ}$ для $a=50 \text{ нм}$ и $m=10^{-27} \text{ г}$

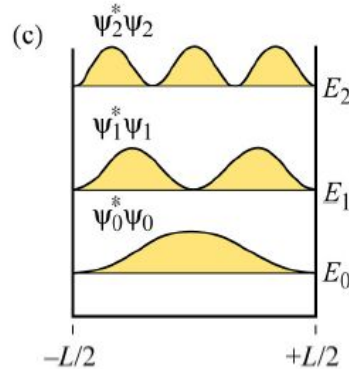
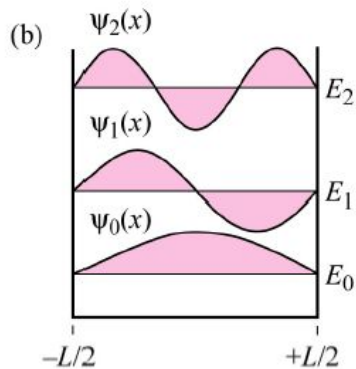
$\Delta E = 0.2 \text{ эВ}$ для $a=5 \text{ нм}$ и $m=10^{-27} \text{ г}$

Квантовое размерное ограничение.



$$\psi_n(x) = A \cos \frac{(n+1)\pi x}{L}$$

$$\left(n = 0, 2, 4 \dots \text{ and } |x| \leq \frac{L}{2} \right)$$



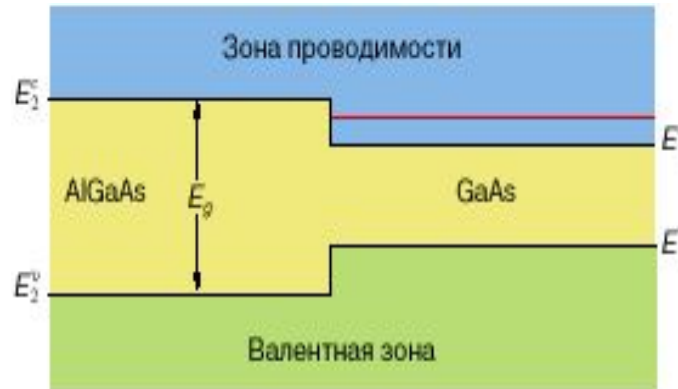
$$\psi_n(x) = A \sin \frac{(n+1)\pi x}{L}$$

$$\left(n = 1, 3, 5 \dots \text{ and } |x| \leq \frac{L}{2} \right)$$

$\Delta E = 0.02 \text{ эВ}$ для $a=50 \text{ нм}$ и $m=10^{-27} \text{ г}$

$\Delta E = 0.2 \text{ эВ}$ для $a=5 \text{ нм}$

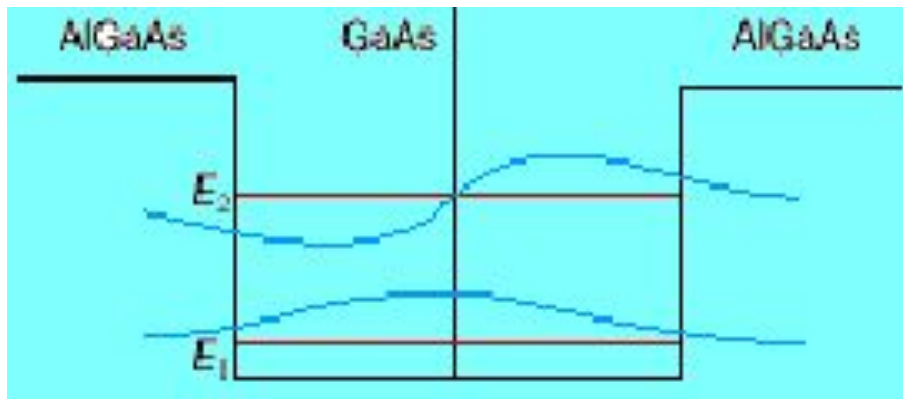
Двумерный электронный газ



Энергетические зоны на границе двух полупроводников. E_1^c и E_1^v – границы зон проводимости и валентной. Электрон с энергией меньшей E_2^c (уровень показан красным цветом) может находиться только справа от границы

Квантовые ямы

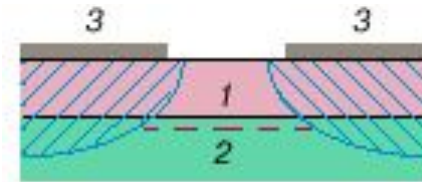
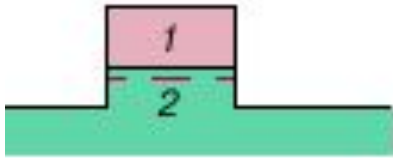
Одномерный электронный газ



Квантовая яма сформированная в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, заключенном между двумя полупроводниками, обладающими более широкой запрещенной зоной.

Квантовые нити.

Одномерный электронный газ

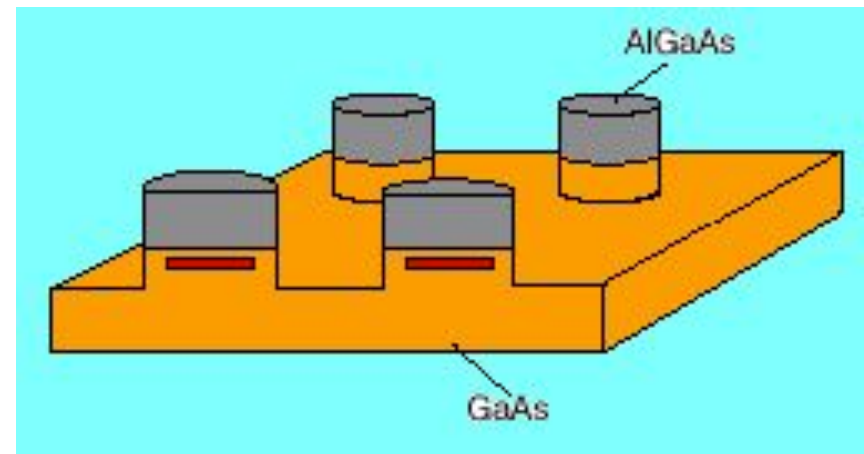


- Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми нитями, полученные с помощью субмикронной литографии за счет вытравливания узкой полоски из самой структуры (а) или щели в затворе Шоттки (б):
- 1 – полупроводник с широкой запрещенной зоной (AlGaAs); 2 – полупроводник с узкой запрещенной зоной (GaAs); 3 – металлический затвор.

Квантовые точки.

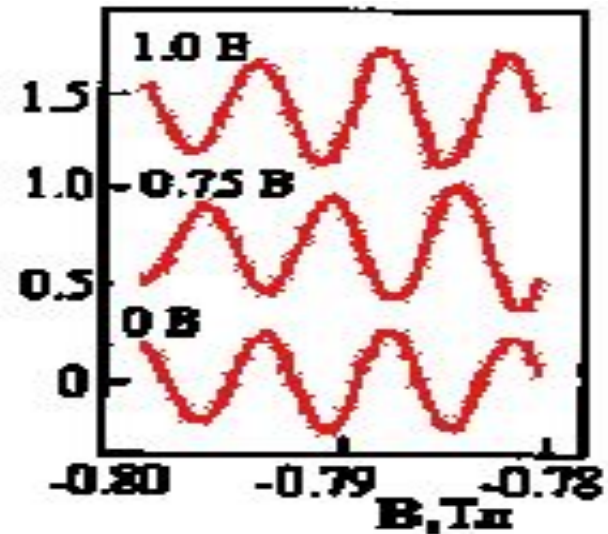
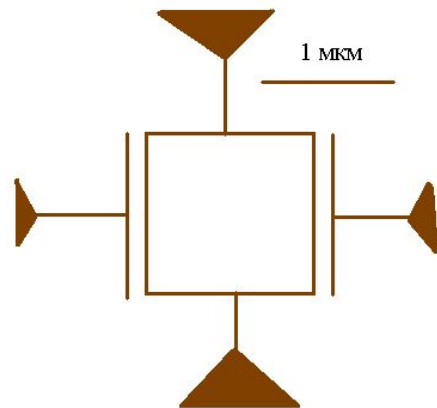
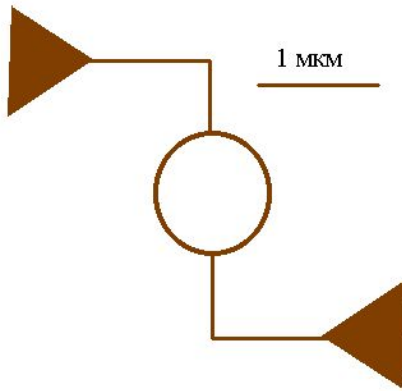
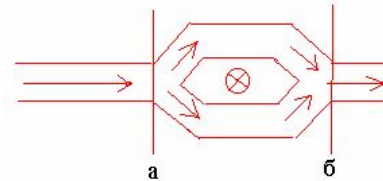
Нульмерный электронный газ

- В квантовой точке движение ограничено в трех направлениях и энергетический спектр полностью дискретный, как в атоме. Поэтому квантовые точки называют еще искусственными атомами, хотя каждая такая точка состоит из тысяч или даже сотен тысяч настоящих атомов. Размеры квантовых точек порядка нескольких нанометров. Подобно настоящему атому, квантовая точка может содержать один или несколько свободных электронов. Если один электрон, то это как бы искусственный атом водорода, если два – атом гелия и т.д.



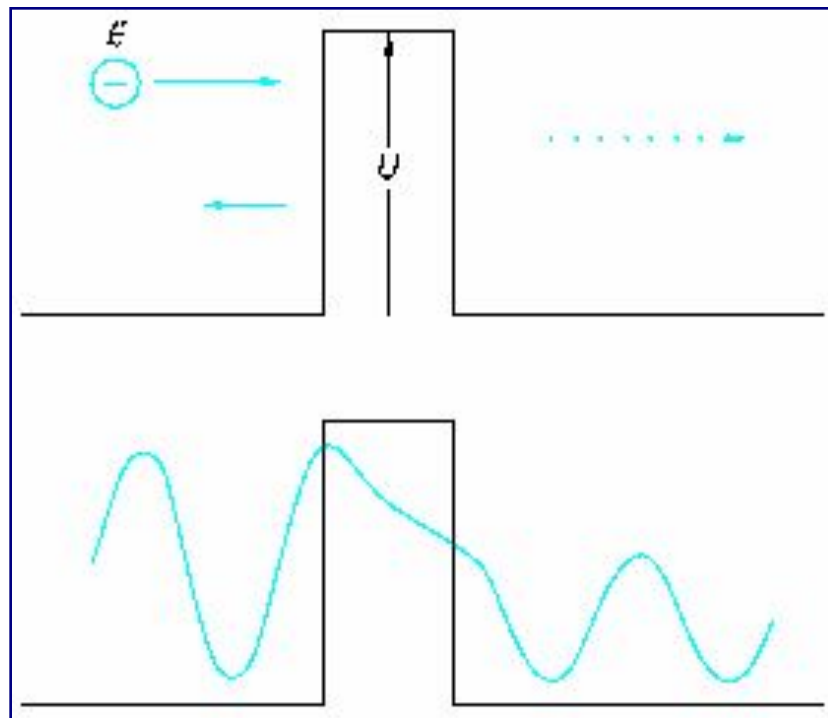
Интерференция. Эффект Ааронова-Бома.

$$\Delta\varphi = \frac{q}{\hbar} \int (Vdt - \vec{A}dS)$$



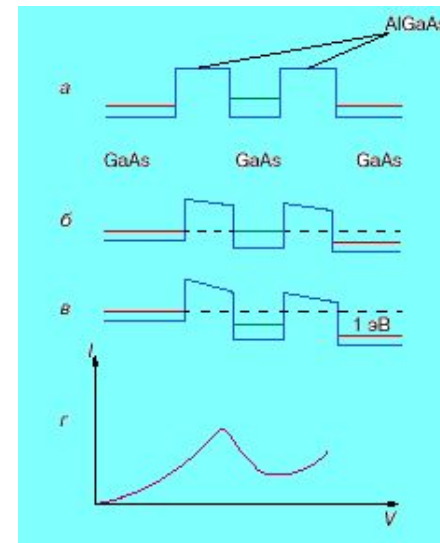
Туннелирование

- Квантовое ограничение, проявляясь в наноразмерных структурах, накладывает специфический отпечаток и на туннелирование. Так, квантование энергетических состояний электронов в очень тонких, периодически расположенных потенциальных ямах приводит к тому, что туннелирование через них приобретает резонансный характер, то есть туннельно просочиться через такую структуру могут лишь электроны с определенной энергией.

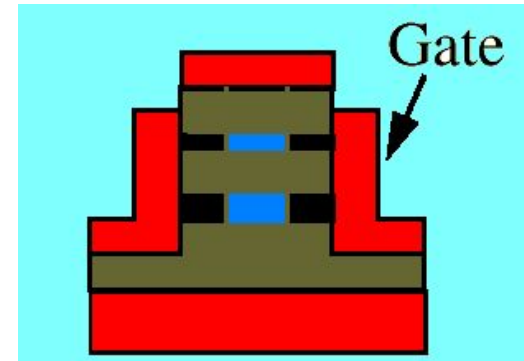
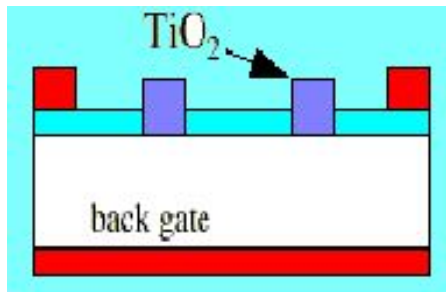


Туннельный резонансный транзистор

- Схема работы и вольт-амперная характеристика резонансного прибора.
- а – напряжение равно 0; б – подано резонансное напряжение; в – напряжение больше резонансного; г – вольт-амперная характеристика.

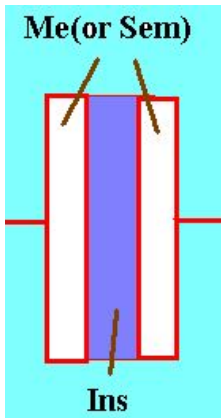


Туннельный резонансный транзистор



Одноэлектроника.

- Одно из самых перспективных направлений увеличения степени интеграции микросхем основано на развитии приборов, в которых контролируется перемещение буквально одного электрона. В таких устройствах, называемых сейчас одноэлектронными транзисторами бит информации будет представлен одним электроном. В одноэлектронных транзисторах время перемещения электрона определяется процессами туннелирования и может быть очень малым.



$$E = \frac{Q^2}{2C} \quad \Delta E = \frac{e^2}{2C}$$

$$\Delta E \gg kT \quad \Delta E \tau \gg h$$

$$\tau = RC \rightarrow \Delta E \gg \frac{h}{RC}$$

$$R = \max(R_i; R_s)$$

$$R \gg R_Q$$

$$R_Q = \frac{h}{4e^2} \approx 6.45 \text{ком}$$

Одноэлектроника.

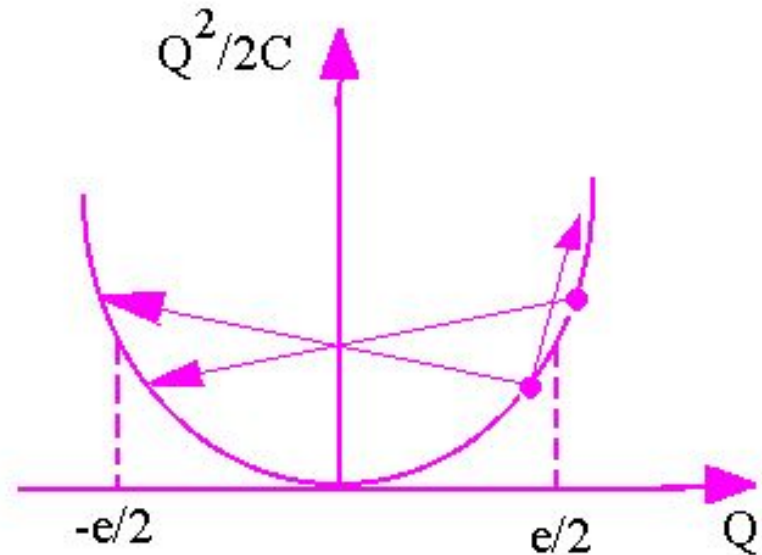
$$Q = Q_0 \pm ne$$

$$-e/2 < Q_0 < e/2$$

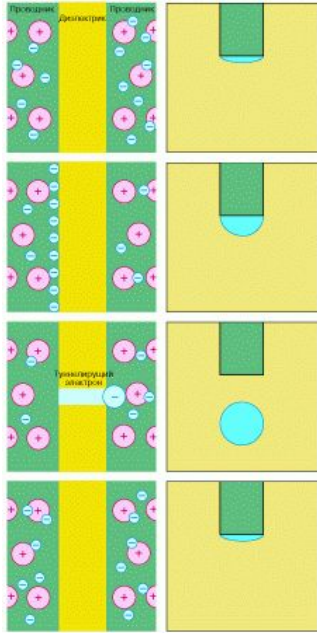
$$V = Q/C$$

Если $-e/2C < V < +e/2C$, то $I = 0$

Кулоновская блокада — это явление отсутствия тока при приложении напряжения к туннельному переходу из-за невозможности туннелирования электронов вследствие их кулоновского отталкивания.



Одноэлектроника.



$$V_{\text{КБ}} = e/2C,$$

$$e = I \cdot t$$

$$f = I/e,$$

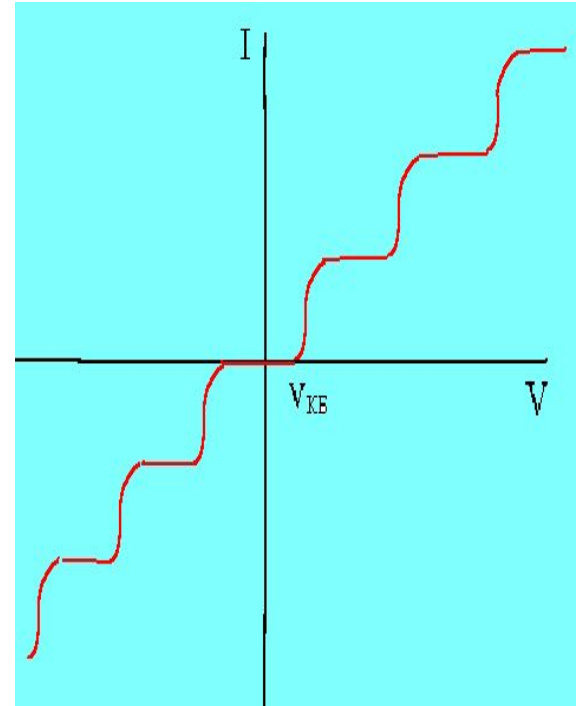
при 4.2 К емкость

$$C \ll 2 \times 10^{-16} \text{ Ф},$$

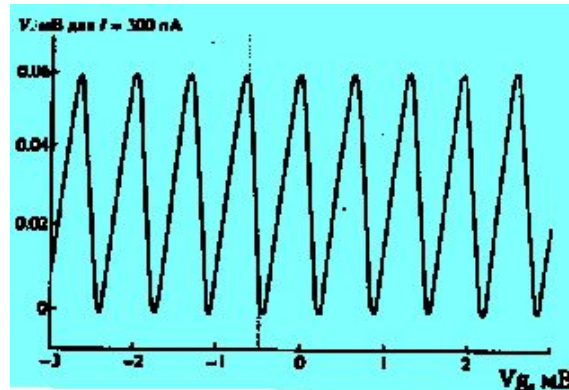
для $T = 77 \text{ К}$ и $T = 300 \text{ К}$

$$C \ll 10^{-17} \text{ и } C \ll 3 \times 10^{-18}$$

соответственно.



Кулоновская лестница



Одноэлектронное
туннелирование в
условиях кулоновской
блокады

Одноэлектроника.

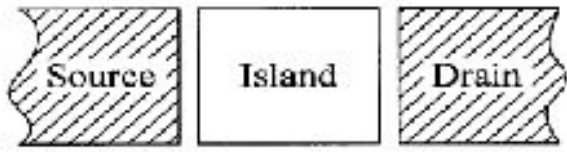
Оценка быстродействия одноэлектронных приборов

Характеристики	$S=a \times b$, нм ²	C , аФ	T , К	R , кОм	$\tau=RC$, пс
Современная технология	100×100	300	0.15	30	10
Ближайшая перспектива	30×30	30	1.5	30	1
Пределы нанолитографии	10×10	3	15	30	0.1
Молекулярный уровень	3×3	0.3	150	30	0.01

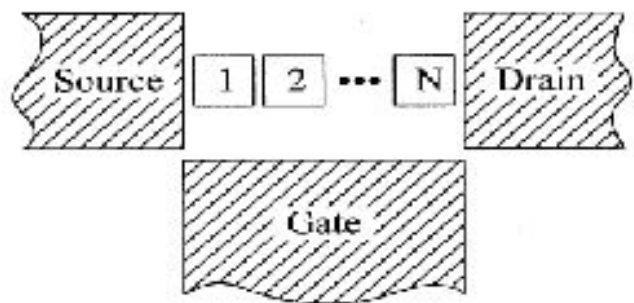
В таблице $S=a \times b$ – площадь туннельного перехода, C – емкость данного перехода, R – сопротивление, T – рабочая температура, τ – время переключения.



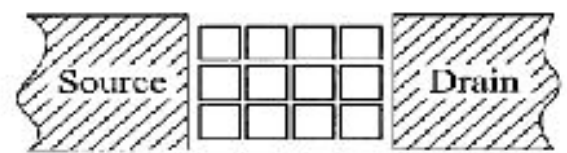
0D



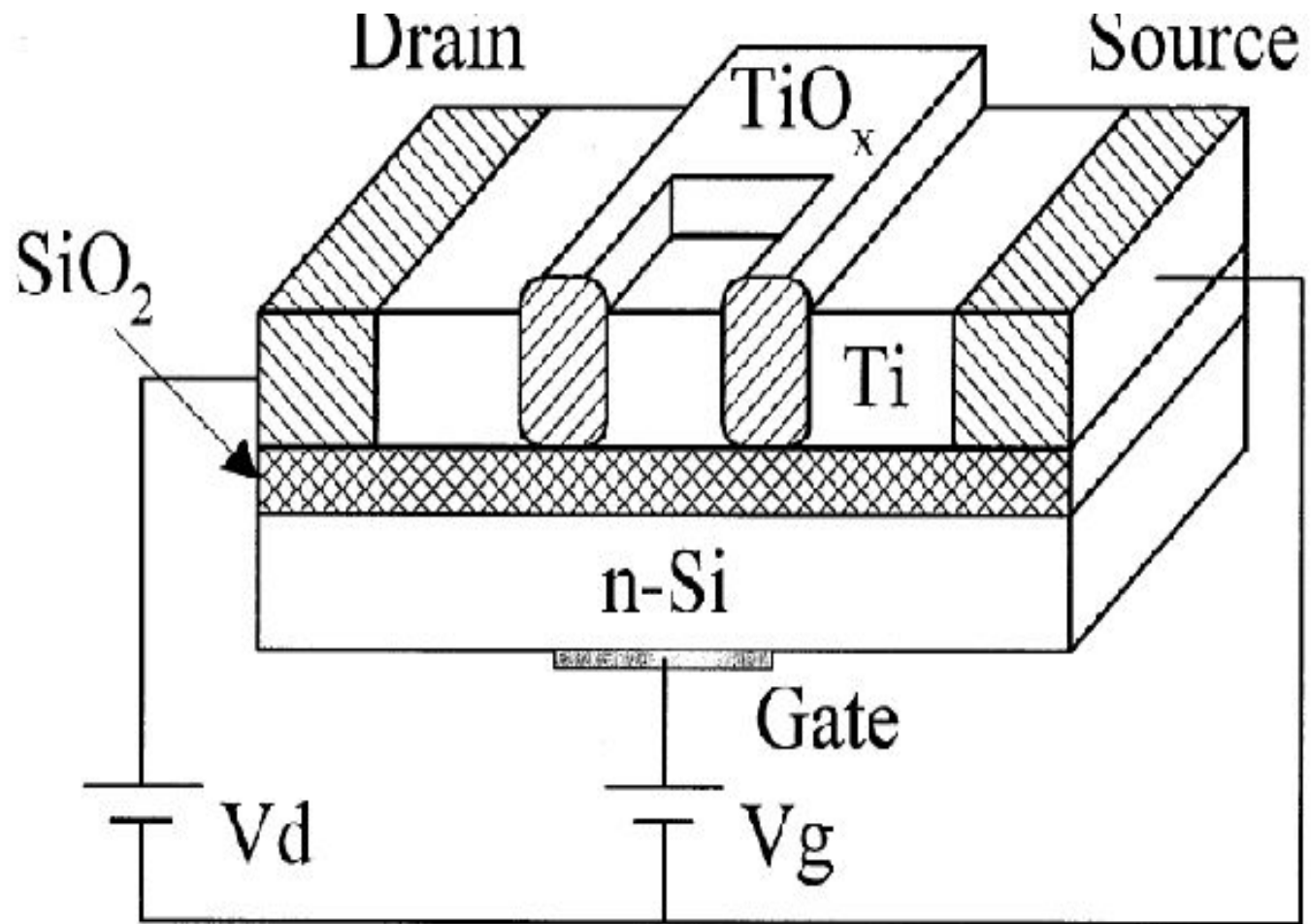
1D

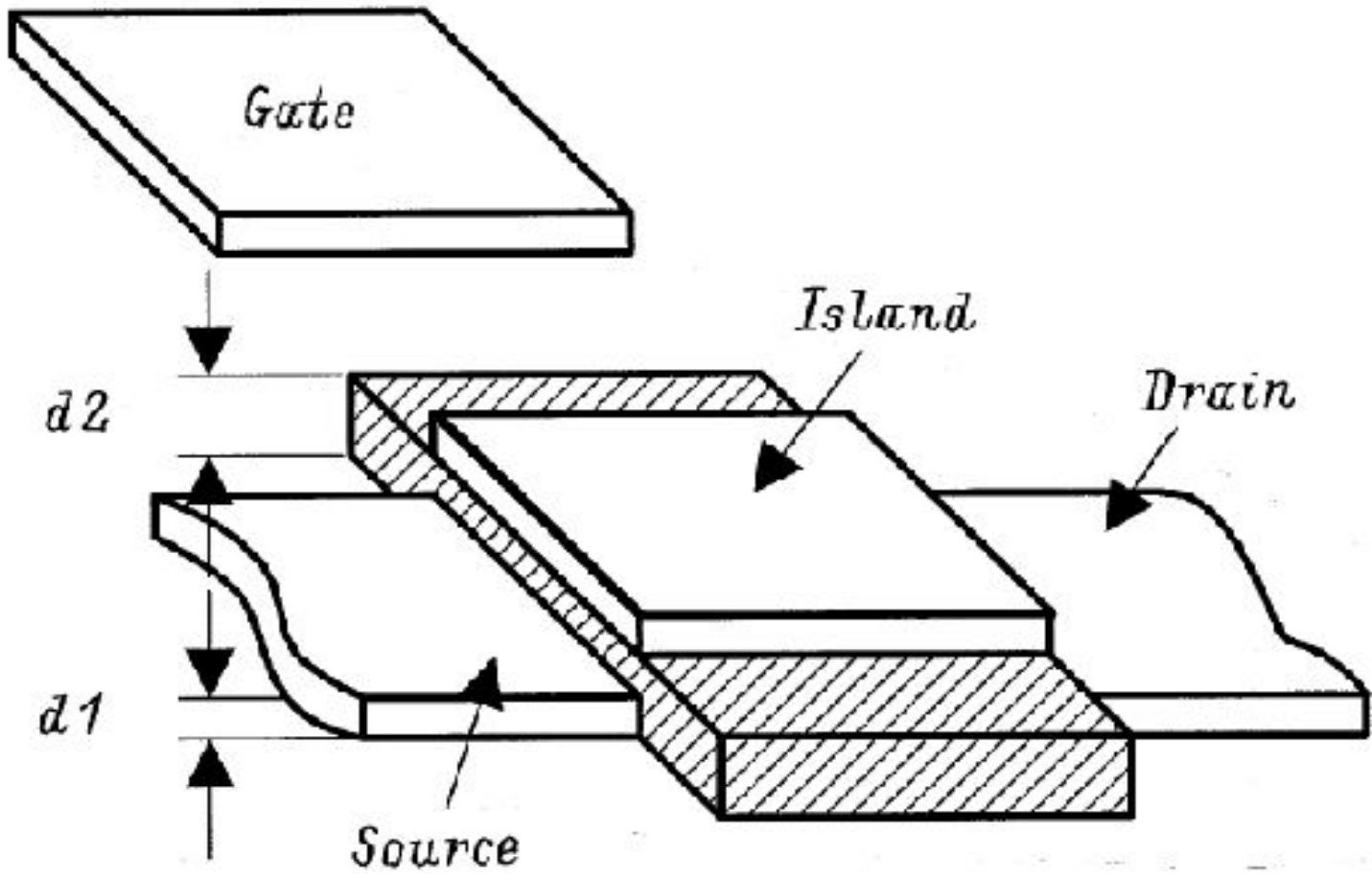


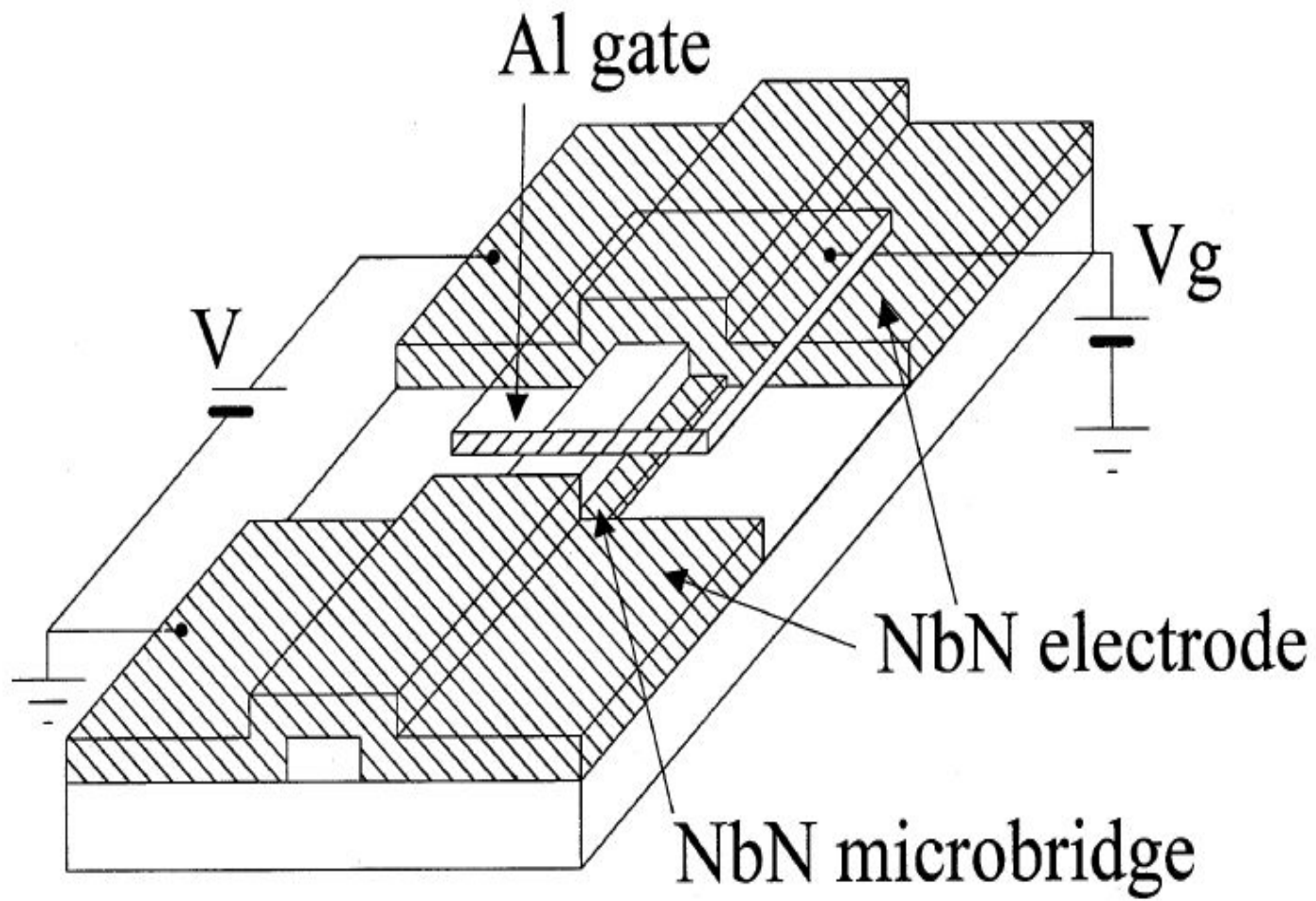
1D



2D







Одноэлектроника.

