

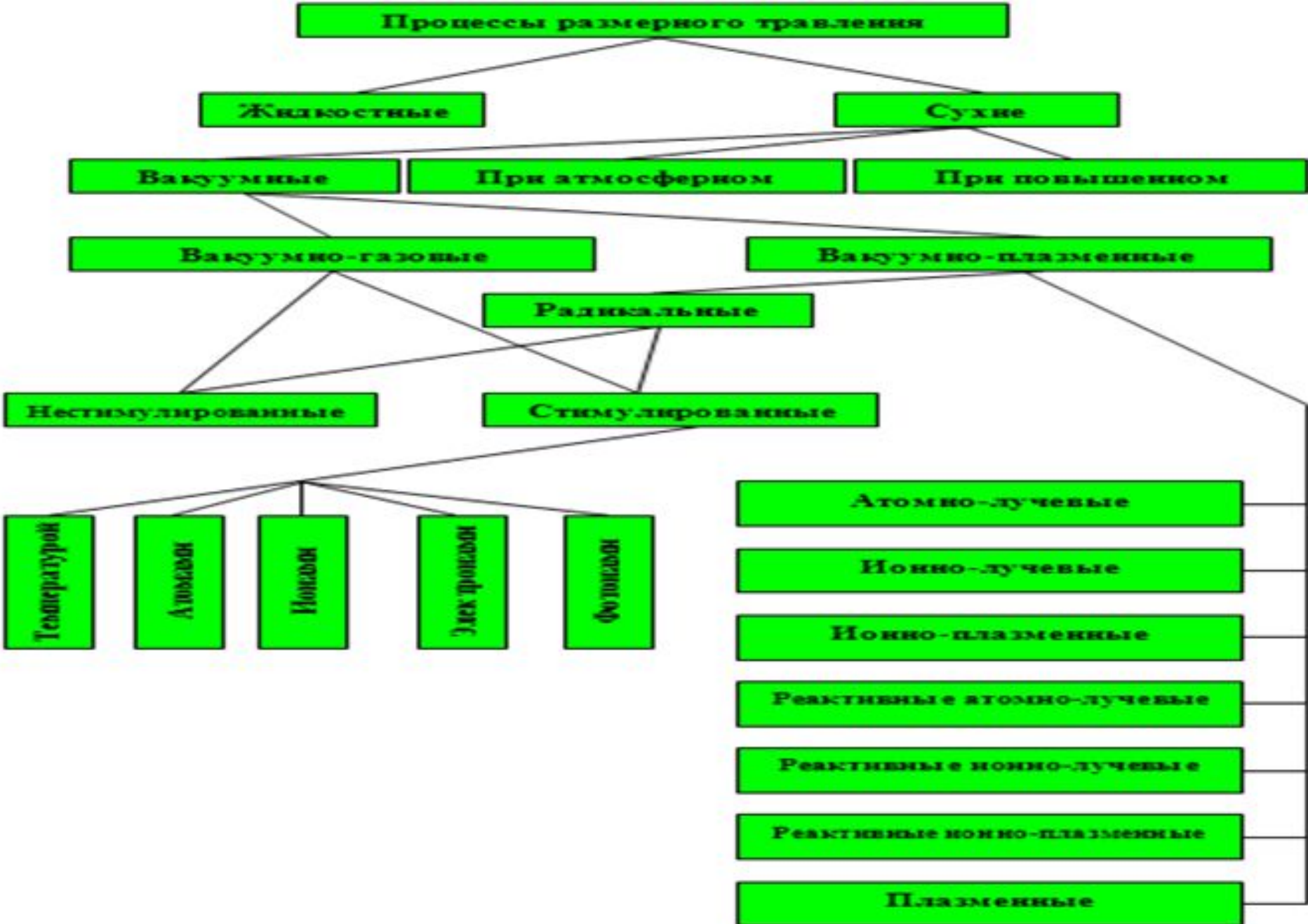
Применение плазменных технологий в производстве УБИС

В базовых технологических маршрутах оптической нанолитографии можно выделить два микромаршрута:

- 1. создание защитной маски** (фоторезистивной или из планаризирующего покрытия (BARC слоя)) на поверхности функционального слоя (ФС), сформированного на пластине (подложке);
- 2. обработка ФС через защитную маску**, в качестве которой наиболее часто используется травление с целью получения в ФС топологического рисунка с требуемыми размерами элементов.

Процессы травления материалов для получения топологического рисунка с требуемыми размерами элементов получили название процессов **размерного травления материалов (РТМ) (dimensional etching materials – DEM)**, *в отличие от:*

- процессов полирующего травления, применяющихся для сглаживания поверхностного рельефа материалов (полировки материалов);
- процессов структурного травления, применяющихся для выявления структуры поверхности материалов перед микроскопическими исследованиями;
- процессов травления с целью очистки поверхности материалов от инородных атомов и частиц (очистка травлением)



Классификация процессов размерного травления материалов

Плазмой называют квазинейтральный газ заряженных и нейтральных частиц, концентрация которых достаточна для того, чтобы создаваемый ими заряд ограничивал их движение.

Для выполнения этого условия нужно, чтобы характерный размер плазмы L_0 был много больше характерного размера экранирования (радиуса Дебая):

$r_D = (\epsilon_0 k_B T_e T_i / e e_i (n_i T_i + n_e T_e))^{1/2}$, - расстояния, на котором нарушается квазинейтральность за счет

теплового движения частиц (здесь ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, k_B - постоянная Больцмана, T_e, T_i – температуры электронов и ионов, e, e_i – заряды электронов и ионов, n_i, n_e – ионная и

электронная концентрации). На расстояниях, существенно превышающих дебаевскую длину, и при частотах, меньших $(4\pi n e^2 / m)^{1/2}$, т. е. меньше плазменной частоты, любое движение оставляет плазму квазинейтральной.

Низкотемпературная газоразрядная плазма (НГП).

НГП – это слабо ионизированный газ при давлении $13 \cdot 10^{-2}$ - $13 \cdot 10^2$ Па со степенью ионизации порядка 10^{-6} - 10^{-4} (концентрация электронов 10^{15} – 10^{18} м^{-3}), в котором электроны имеют среднюю энергию 1 - 10 эВ (температуру порядка 10^4 - 10^5 К), а средняя энергия тяжелых газа (ионов, атомов, молекул) на два порядка меньше ($T=(3 - 5) \cdot 10^2$ К).

При реализации процессов в НГП возможно, что:

1. НГП является одновременно средой проведения, источником участвующих в процессе частиц и стимулятором (активатором) процесса;
2. НГП служит только источником участвующих в процессе частиц;
3. НГП используется только для активации участвующих в процессе частиц, поверхностей или для стимуляции самого процесса.

В зависимости от вида плазмообразующего газа и природы поверхности твёрдого тела в каждом из трёх случаев **с помощью НГП могут быть проведены различные типы обработки, которые можно объединить в три большие группы:**

1. удаление материала с поверхности твёрдого тела (распыление, травление, очистка);
2. нанесение материала на поверхность твёрдого тела (химическое из газовой фазы, физическое из материала мишени, модифицируемое в газовой фазе);
3. модификация поверхности слоя твёрдого тела окисление, анодирование, легирование другими элементами, текстурирование, гетерирование, отжиг.

ВЧ разрядом можно назвать любой разряд в переменных электромагнитных полях.

Разряд относят к ВЧ, если длина волны поля больше размеров системы. В противном случае свойства разряда зависят от процесса распространения волн и его относят к СВЧ – разрядам.

К разрядам низкого давления относят разряды, в которых длина энергетической релаксации превышает размеры системы. При этом ФРЭ определяется всем распределением электрических полей в разряде. Такой режим наблюдается при $PL < 1$ Торр*см.

По физико-химическому механизму взаимодействия частиц НГП с поверхностью обрабатываемого материала (образца) процессы травления можно разделить на три группы:

- 1. Ионное травление (ИТ)**, при котором поверхностные слои удаляются только в результате физического распыления. Распыление осуществляется энергетическими ионами инертных газов. Под энергетическими ионами и атомами понимаются частицы с энергией 0,1 - 2,0 кэВ. **Если поверхность обрабатываемого материала находится в контакте с плазмой, то травление называется ионно-плазменным (ИПТ).** **Если поверхность образца не контактирует с плазмой, которая используется только как источник ионов, осуществляющих травление, то травление называют ионно-лучевым (ИЛТ).**
- 2. Плазмохимическое травление (ПХТ)** – травление при котором поверхностные слои материалов удаляются в результате химических реакций, с образованием летучих продуктов. **Если поверхность обрабатываемого материала находится в контакте с плазмой, то травление называют плазменным (ПТ).** При ПТ химические реакции стимулируются низкоэнергетическими электронной и ионной бомбардировками, а также воздействием излучения. **Если поверхность образца не контактирует с плазмой, которая используется только как источник ХАЧ, то такое травление называют радикальным травлением (РТ).** РТ осуществляется спонтанно без стимуляции электронной и ионной бомбардировками, а в ряде случаев и при отсутствии воздействия излучения.
- 3. При реактивном ионном (РИТ) или ионно-химическом травлении (ИХТ)** слои материала удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химическими реакциями между ХАЧ и атомами материала. **Если поверхность обрабатываемого материала находится в контакте с плазмой, то травление называют реактивным ионно-плазменным (РИПТ),** при этом на поверхность образца воздействуют энергетические ионы, свободные атомы и радикалы, электроны и излучение. Процесс физического распыления может, как ускоряться, так и замедляться химическими реакциями. **Если поверхность образца не контактирует с плазмой, то такое травление называют реактивным ионно-лучевым травлением (РИЛТ).** В процессе РИЛТ поверхность материала подвергается воздействию молекулярных и атомарных ионов, которые кроме физического распыления в результате ударной диссоциации и нейтрализации образуют ХАЧ, вступающие в химические реакции с обрабатываемым материалом. Химические реакции могут, как ускорить, так и замедлять процесс физического распыления.

ПТ и РИПТ происходят в плазме химически активных газов, и в них поверхность обрабатываемого материала подвергается воздействию одинакового набора частиц: ионов, электронов свободных атомов и радикалов, а также излучения. Поэтому очень важно уметь различать эти процессы. В качестве условной границы использовано значение энергии ионов E_i , бомбардирующих поверхность образца. Если $E_i < 100$ эВ, то травление является плазменным, если $E_i > 100$ эВ, то происходит РИПТ

Процессы травления должны обеспечивать:

воспроизводимость, скорость, селективность, степень анизотропии, равномерность и высокую производительность.

Указанные характеристики зависят от вакуумно-технических параметров процессов травления, таких как:

1. Конструкция реактора и способ возбуждения разряда
2. рабочее давление;
3. состав и расход рабочего газа;
4. скорость откачки;
5. предельное давление.

Основные выходные параметры процесса травления:

Скорость травления

Селективность травления

Анизотропия травления

Профиль травления

Уровень внесенных радиационных нарушений
поверхности

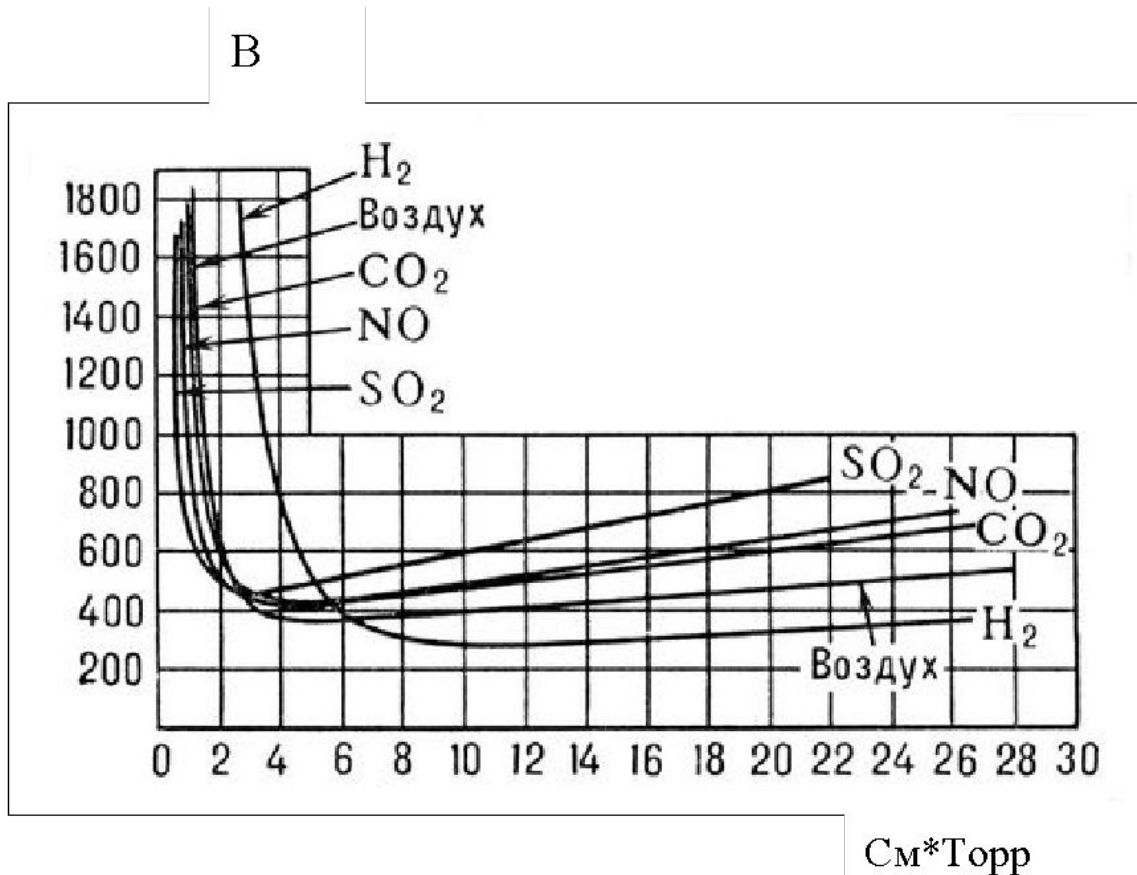
Уровень внесенных химических нарушений
поверхности

Степень изменения морфологии поверхности

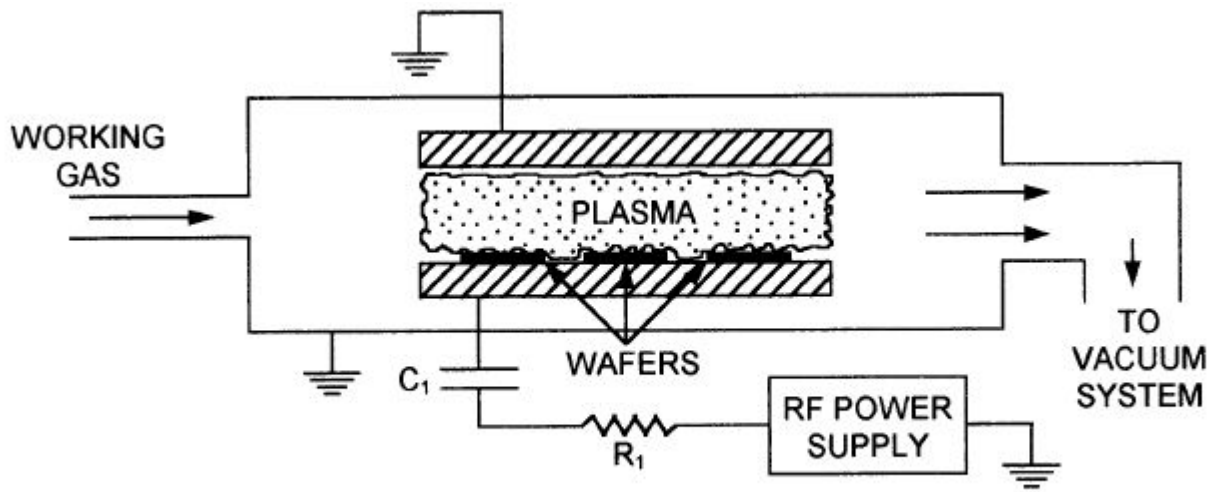
В системах вакуумного плазменного травления (ВПТ) диапазон давлений рабочего газа определяется условиями существования рабочих разрядов.

В указанном диапазоне следует выбирать такое давление $P_{\text{опт}}$, при котором достигаются минимальный потенциал зажигания разряда и максимальная проводимость плазмы. При $P_{\text{опт}}$ в плазме разряда скорости генерации ХАЧ и энергетических частиц максимальны, а следовательно максимальны скорости травления материалов. Значение $P_{\text{опт}}$ для конкретной системы ВПТ определяется видом используемого рабочего газа.

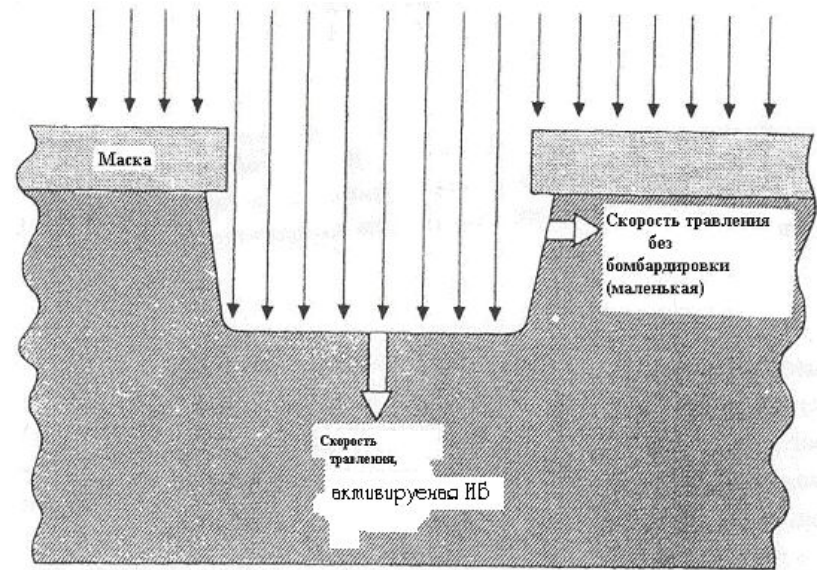
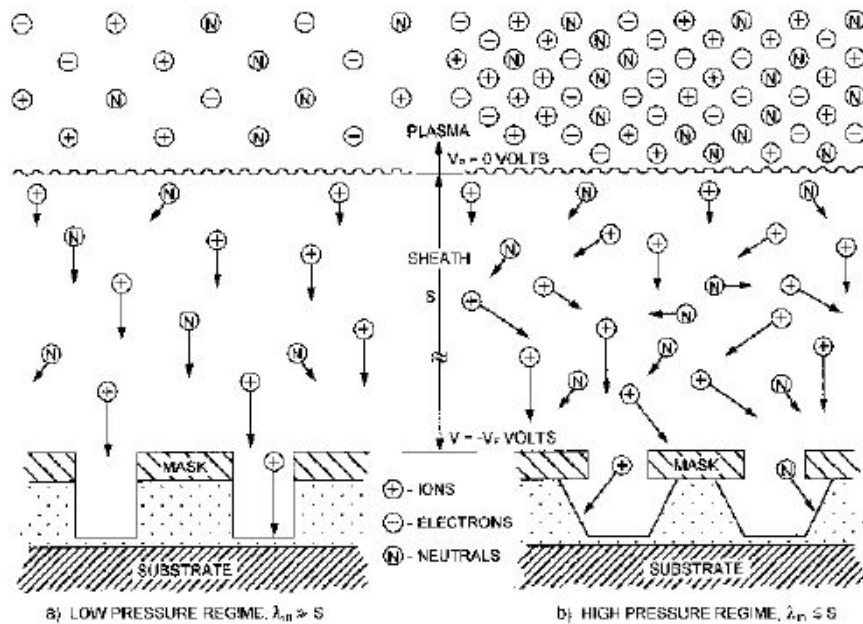
Кривые Пашена для различных газов



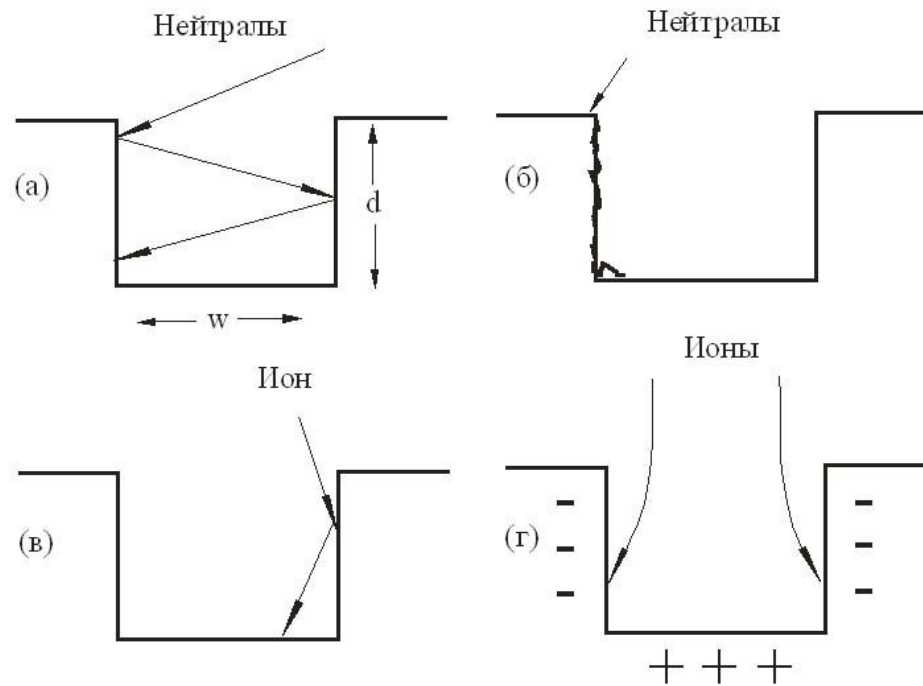
Закон Пашена, устанавливает, что наименьшее напряжение зажигания газового разряда между двумя плоскими электродами (в однородном электрическом поле) есть величина постоянная (и характерная для данного газа) при одинаковых значениях pd , где p — давление газа, d — расстояние между электродами.



b) REACTIVE ION ETCHING CONFIGURATION



Транспорт частиц в микроструктуре



Film	Etchant	Typical Gas Compounds
Al	Chlorine	BCl_3 , CCl_4 , Cl_2 , SiCl_4
Mo	Fluorine	CF_4 , SF_4 , SF_8
Polymers	Oxygen DF_4 , SF_4 , SF_6	
Si	Chlorine, fluorine CF_4 , SF_4 , SF_6	BCl_3 , CCl_4 , Cl_2 , SiCl_4
SiO_2	Chlorine, fluorine	CF_4 , CHF_3 , C_2F_6 , C_3F_8
Ta	Fluorine	"
Ti	Chlorine, fluorine	"
W	Fluorine	"

Plasma etch chemicals.

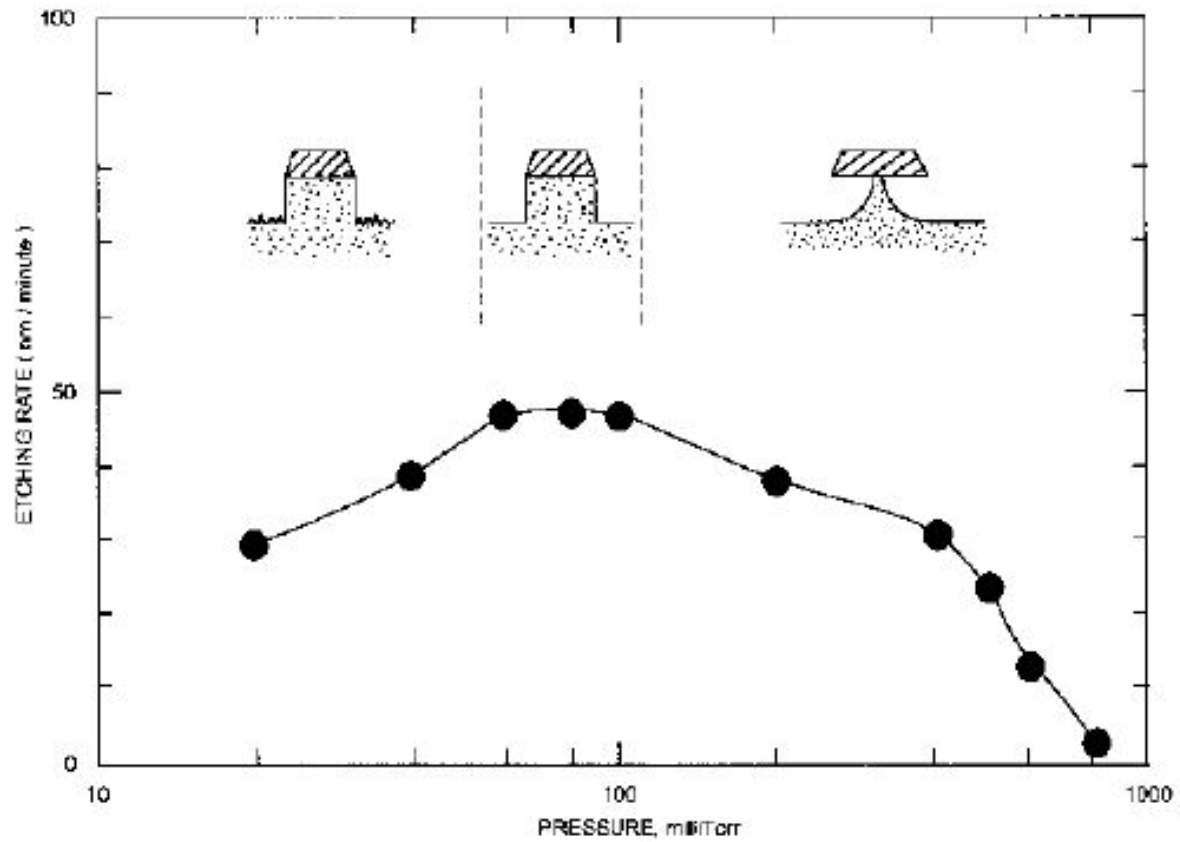
Номенклатура специальных газов



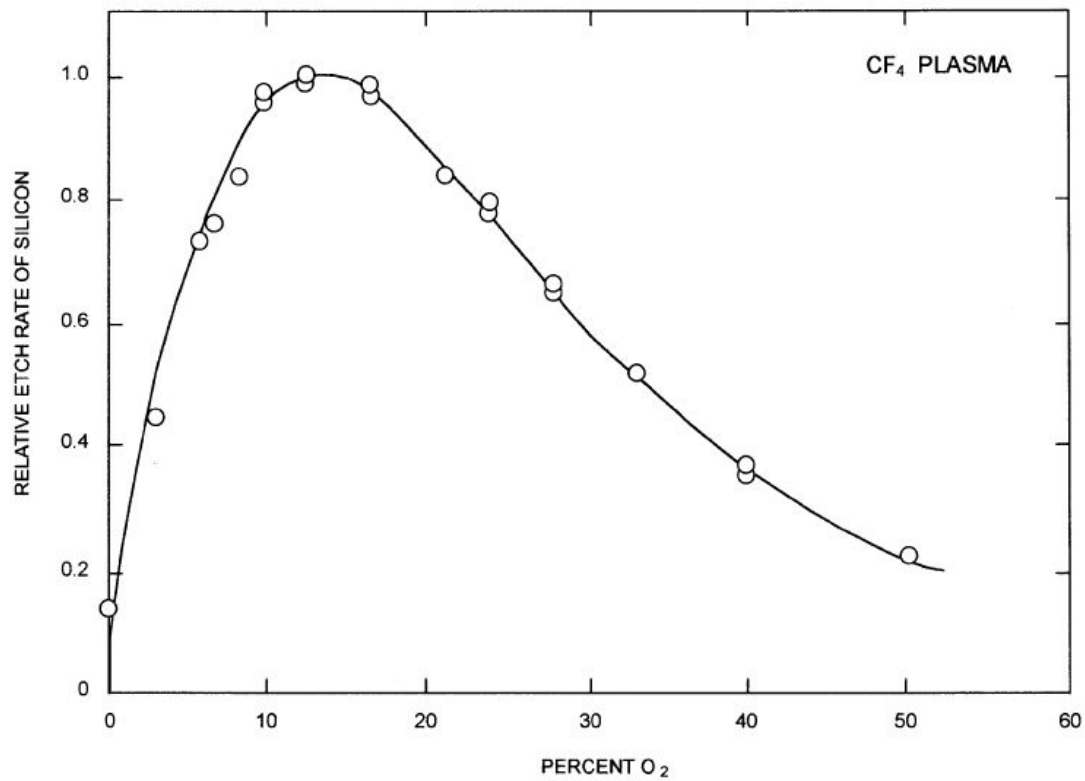
МЕТАН CH_4 - CHF_3 X-23

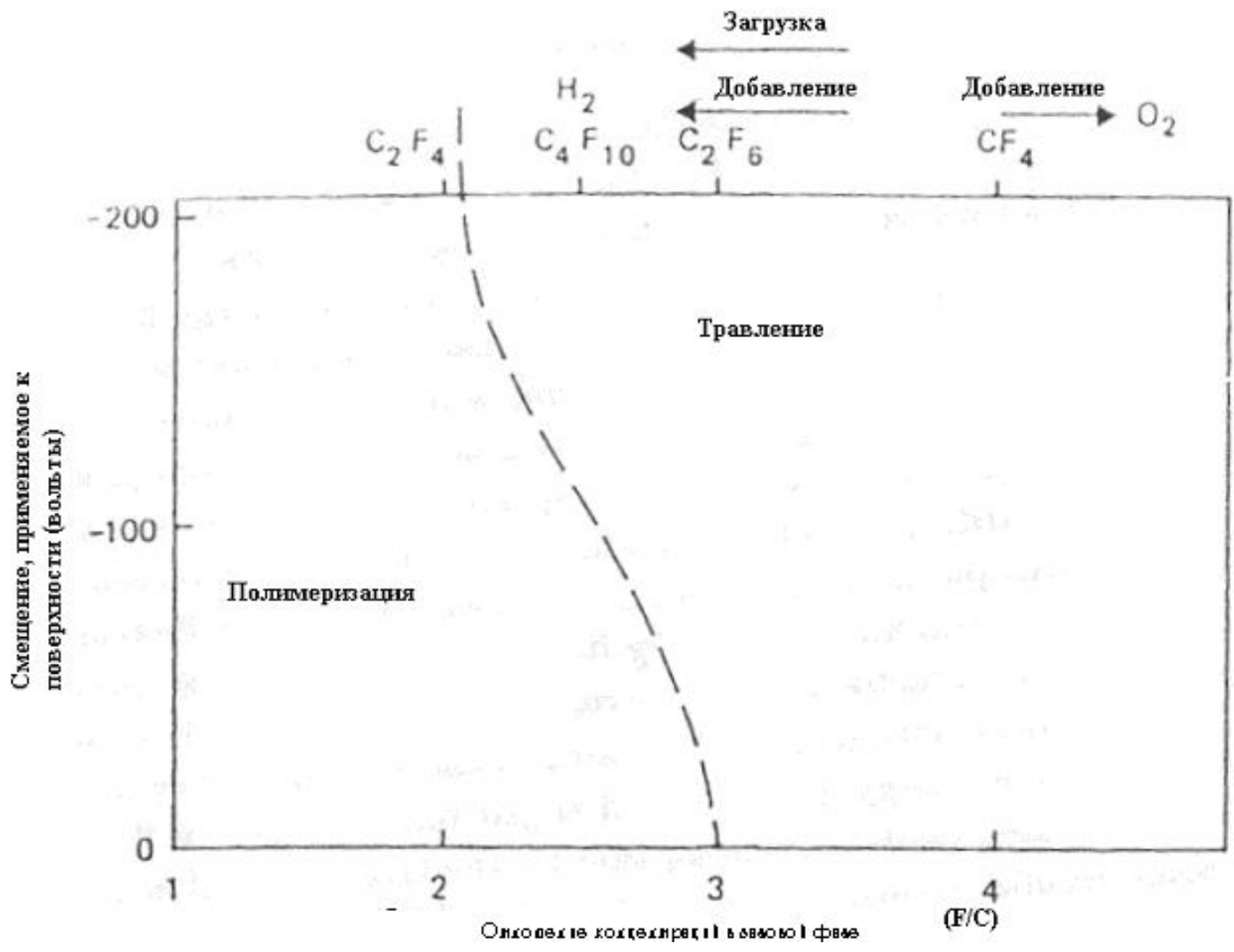
ЭТАН C_2H_6 - $C_2Cl_3F_3$ X-113

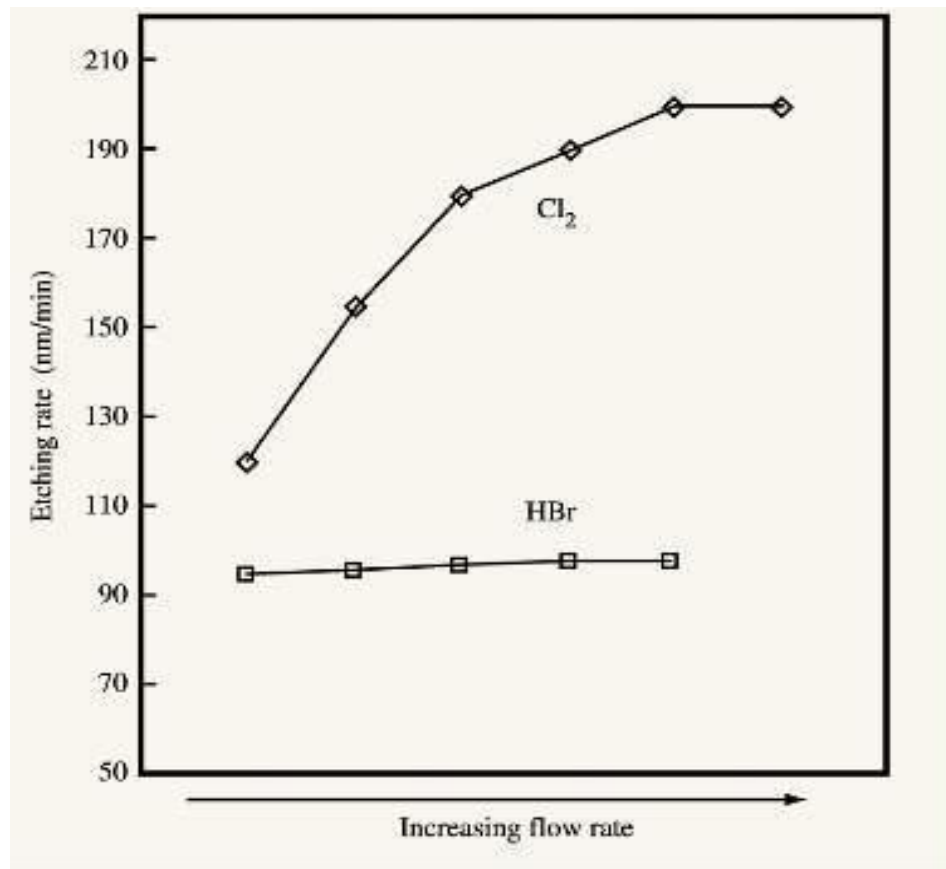
ЦИКЛОБУТАН C_4H_8 - C_4F_6 X-318



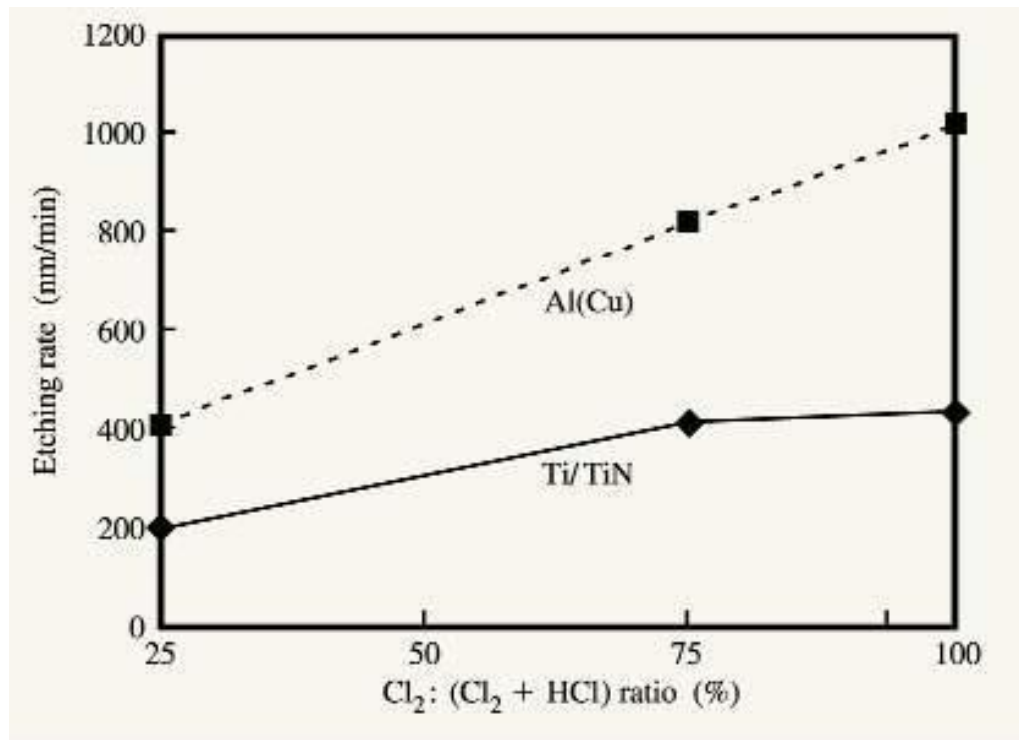
The etching rates and etching profiles of silicon in CF_4 plasmas as functions of gas pressure



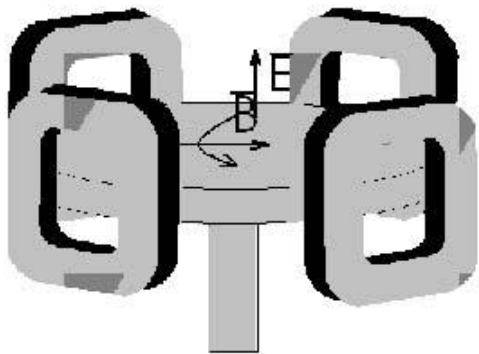




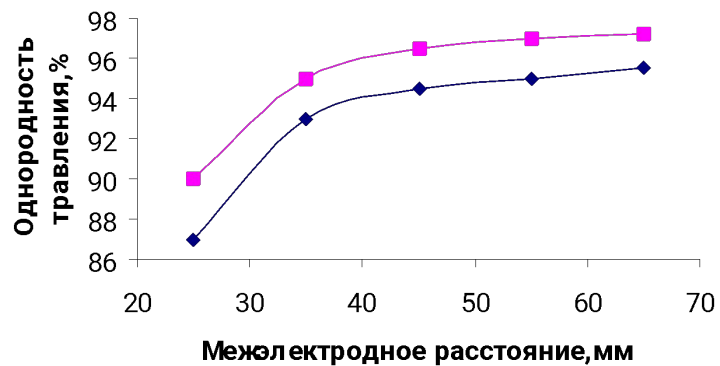
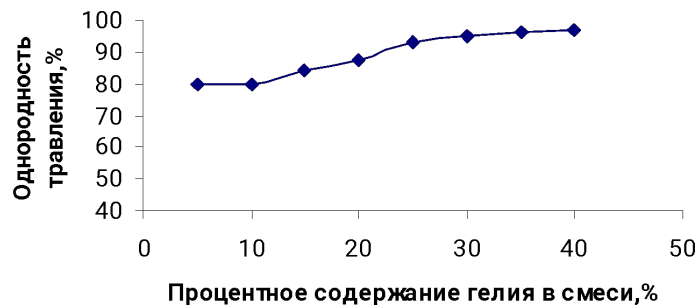
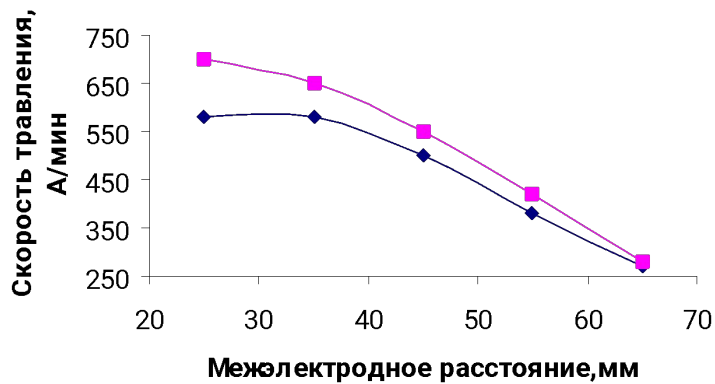
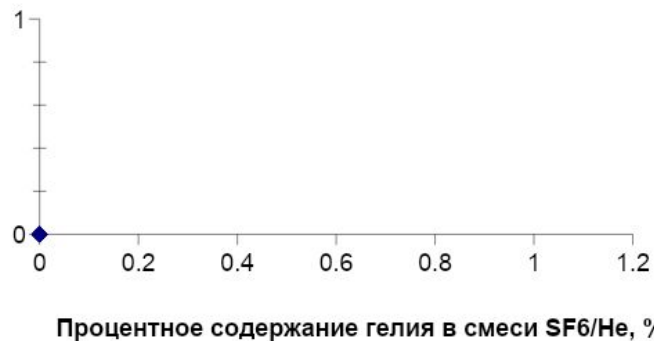
Скорость травления поликристаллического кремния для газовых смесей, основанных на HBr- и Cl₂, - от расхода смеси

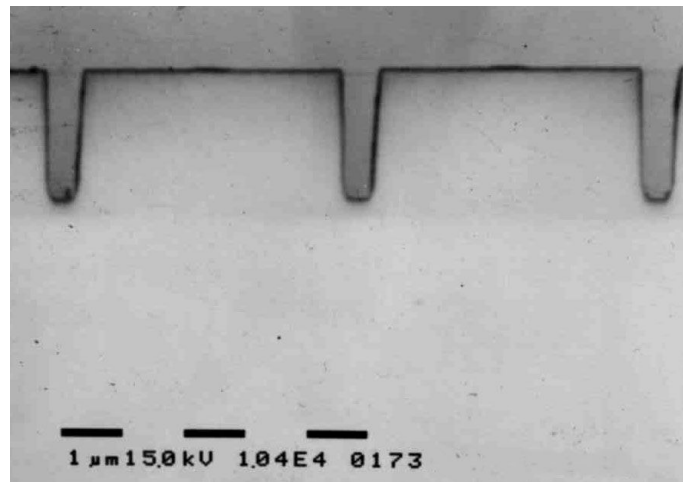
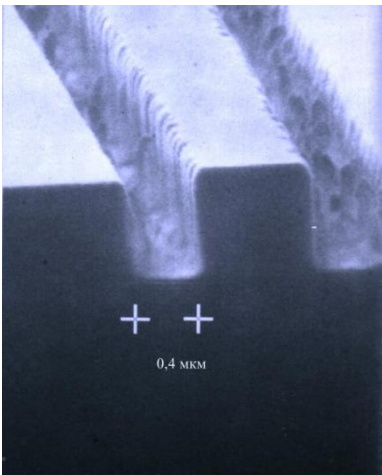
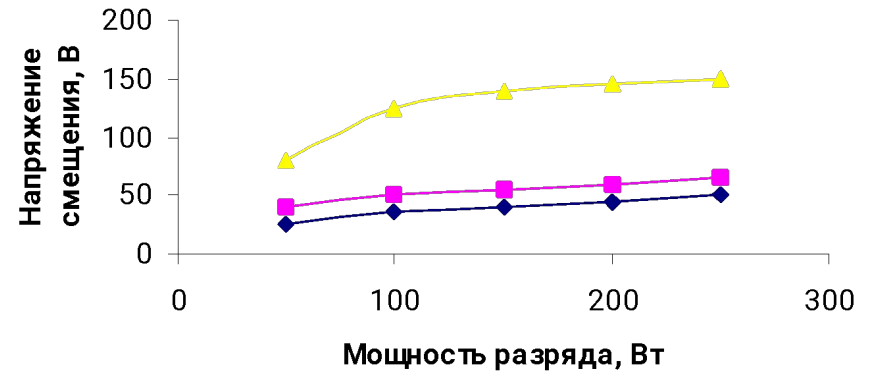
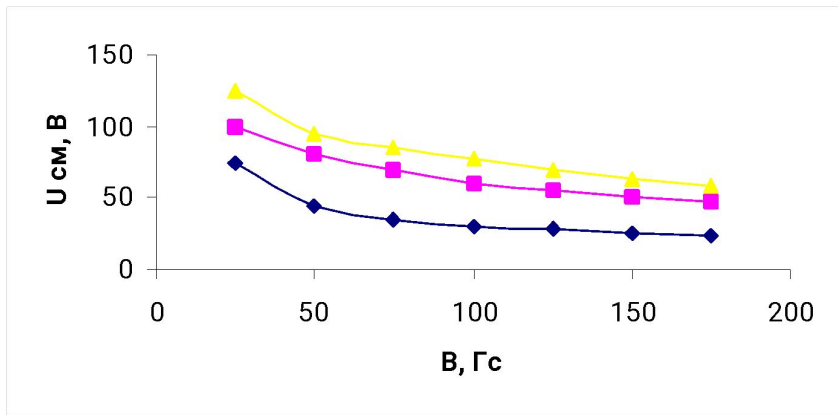


Зависимость скорости травления слоев проводника от соотношения газовых потоков в смеси.



Скорость травления SiO₂,
А/мин





**INDEPENDENT (INPUT)
VARIABLES**

WORKING GAS
TYPE OF GAS
MIXTURE RATIO
FLOW RATE
PRESSURE

GEOMETRY
GAS DISTRIBUTION
ELECTRODE AREA
WAFER POSITION

PLASMA REACTOR
INPUT POWER
RF FREQUENCY
PULSING FREQUENCY
DC WAFER BIAS

**PLASMA-RELATED
PARAMETERS**

ELECTRON NUMBER DENSITY
ELECTRON KINETIC TEMPERATURE
DC PLASMA POTENTIAL
ION ENERGY DISTRIBUTION
NEUTRAL GAS PRESSURE
ION ENERGY FLUX
ACTIVE SPECIES FLUX

BLACK BOX

**DEPENDENT
(OUTPUT) VARIABLES**

ETCH RATE
DIRECTIONALITY
SELECTIVITY
UNIFORMITY

Independent input variables, plasma-related parameters, and dependent output variables of a plasma etching reactor.

Несмотря на большое разнообразие все процессы вакуумного газоплазменного травления (ВГПТ) по механизму взаимодействия с обрабатываемым материалом можно отнести к пяти типам:

- спонтанное химическое травление (*spontaneous chemical etching - SC etching*);
- ионное травление физическим распылением (*ion etching by physical sputtering - PS etching*);
- ионное травление химически модифицированным физическим распылением (*ion etching by chemically modified physical sputtering - CMPS etching*);
- радиационно-стимулированное химическое травление (*radiation assisted chemical etching - RAC etching*);
- радиационно-возбуждаемое химическое травление (*radiation excited chemical etching - REC etching*).

Классификация процессов вакуумного газо-плазменного травления (ВГПТ) по механизму взаимодействия с обрабатываемым материалом

спонтанное химическое
травление

физическо
Е распыление

радиационно-
возбуждаемое
химическое травление

радиационно-
стимулированное химическое
травление

химически модифицированное
физическое распыление

Спонтанное химическое травление материалов.

В процессах спонтанного химического травления (*spontaneous chemical etching - SC etching*) основной вклад в удаление материала функционального слоя (ФС) вносят самопроизвольные химические реакции с участием химически активных частиц (ХАЧ) (свободных атомов и радикалов) (*radicals*). К такому типу травления относятся:

- не стимулированные процессы газового травления (ГТ) (*gas etching - GE*);
- не стимулированные процессы радикального травления (РТ) (*radical etching - RE*);

Необходимым условием для протекания спонтанного травления материала ФС является образование в результате химической реакции хотя бы одного летучего и стабильного при температуре T_{pr} и давлении процесса p_{pr} продукта.

При использовании органических защитных масок (ОЗМ), к которым относятся маски из органических фото-, электроно- и рентгенорезистов, печатных слоев, антиотражающих и планаризирующих покрытий, температура процессов размерного травления T_{pr} обычно лежит в диапазоне (320 - 400) К или (50 - 130) °С

Термин «летучий» означает, что при температуре и давлении процесса травления, давление паров образующего продукта реакции должно быть достаточно высоко, чтобы он самопроизвольно испарялся с поверхности обрабатываемого материала, т.е. чтобы выполнялось условие:

$$T_{pr} \gg T_{ev},$$

где T_{ev} - температура испарения (*evaporation temperature*) образующегося продукта реакции.

Из-за отсутствия данных по температурам испарения многих соединений, летучесть продуктов реакций, образующихся в процессах спонтанного химического травления материалов ФС, в первом приближении определяется по значениям их температур плавления T_m (*melting temperature*), кипения T_b (*boiling temperature*) или сублимации T_{sb} (*sublimation temperature*), приводимых в химических справочниках, энциклопедиях и табл.

Фториды веществ	T_m , К	T_b , К	T_{sb} , К	Хлориды веществ	T_m , К	T_b , К	T_{sb} , К
SiF ₄	183	208		SiCl ₄	203	331	
TiF ₄	673		575	TiCl ₄	258	409	
TiF ₂	1547	2425		TiCl ₂	1030	1600	
MoF ₆	290,5	308		MoCl ₆	580	630	
WF ₆	276	291		WCl ₆	548	620	
PtF ₄			720	PtCl ₄	643		
AlF ₃	1313	1529		AlCl ₃	473		
Al ₂ F ₆				Al ₂ Cl ₆			296
TaF ₅		503		TaCl ₅		519	
NbF ₄		509		NbCl ₅		527	
GaF ₃		1273		GaCl ₃			475
InF ₃		≥1470		InCl ₃			573

Из данных табл. видно, что условие реализации спонтанного химического травления в частности выполняется при травлении кремния (Si), титана (Ti), вольфрама (W), молибдена (Mo), тантала (Ta) и ниобия (Nb) атомами (радикалами) фтора (F) и при травлении кремния, титана, алюминия (Al), тантала (Ta), ниобия (Nb) и арсенида галлия (AsGa) атомами (радикалами) хлора (Cl). углерода (C) и всех органических пленок на его основе;

- при травлении атомами (радикалами) водорода (H) слоев кремния, углерода и всех органических пленок на их основе.

Если материал ФС не образует летучих двухкомпонентных соединений с ХАЧ (атомами и радикалами), то необходимо рассмотреть его трехкомпонентные соединения. Например, все галогениды хрома нелетучи и имеют температуры кипения (T_b) выше 1273 К, однако оксихлорид хрома CrO_2Cl_2 имеет $T_b = 391$ К. Поэтому травление ФС хрома следует проводить при совместном действии атомов (радикалов) хлора и кислорода, т.е. в плазме (или ее послесвечении) газовой смеси хлора (хлорсодержащего газа) и кислорода, при их соотношении в смеси 1:1

В общем случае, если обрабатываемая газовая или плазменная среда не содержит частиц, которые могут пассивировать обрабатываемую поверхность материала ФС, то скорость спонтанного травления материала тем выше, чем ниже температура кипения его галогенида (продукта реакции травления). Атомами (радикалами) фтора кремний травится гораздо быстрее, чем атомами (радикалами) хлора, т.к. температура кипения SiF_4 $T_b(\text{SiF}_4) = 208$ К значительно ниже температуры кипения SiCl_4 $T_b(\text{SiCl}_4) = 331$ К

Характеристики процесса спонтанного травления во фторуглеродных газах существенно зависят от относительного содержания фтора и углерода. В настоящее время фторуглеродные газы характеризуются величиной F/C, например для CF_4 величина $F/C = 4$. С уменьшением отношения F/C снижается скорость травления материалов с одновременным повышением селективности травления кислородосодержащих соединений относительно соединений, не содержащих кислорода, например SiO_2 относительно Si и Si_3N_4 . **При уменьшении отношения F/C возрастает количество ненасыщенных фторуглеродных частиц (частиц, у которых атомы углерода имеют свободные валентности или двойные и тройные связи), которые способны полимеризоваться**

Добавка кислорода в диапазоне (20 – 40) % при спонтанном травлении материалов в плазме фторуглеродных газов **увеличивает выход свободных атомов фтора и скорость травления.**

Атомы водорода интенсивно реагируют с атомами фтора в плазме разряда, формируя очень стабильные молекулы HF. Поэтому **добавка водорода в плазму фторуглеродных газов уменьшает концентрацию атомов фтора,** а, следовательно, **увеличивает концентрации ненасыщенных частиц, которые проявляют склонность к полимеризации на поверхностях.**

Добавкой водорода можно вызвать осаждение полимерных пленок на поверхности в плазме CF_4 или C_2F_6 .

Аналогичное влияние на скорость и селективность спонтанного травления материалов оказывает использование в качестве рабочих газов соединений, содержащих водород, таких как CHF_3 , CH_2F_2 и др.

В механизме спонтанного химического гетерогенного травления можно выделить следующие **основные стадии**:

- доставка химически активных частиц (ХАЧ) к поверхности обрабатываемого материала;
- адсорбция ХАЧ на поверхности материала;
- диффузия адсорбированных ХАЧ через адсорбционный слой реагентов и продуктов реакции к атомам (молекулам) травимого материала;
- взаимодействие ХАЧ с атомами (молекулами) материала с образованием летучих и стабильных продуктов реакции;
- диффузия продуктов реакции через адсорбционный слой к границе раздела слой - газовая (плазменная среда);
- десорбция продуктов травления с поверхности в газовую фазу;
- отвод продуктов травления из газовой фазы реакционной зоны.

Скорость гетерогенных многостадийных процессов определяется скоростью наиболее медленной (лимитирующей) стадии.

Скорость спонтанного травления материала ФС в результате химической реакции (*spontaneous chemical etching - SC etching*) в кинетической области определяется выражением :

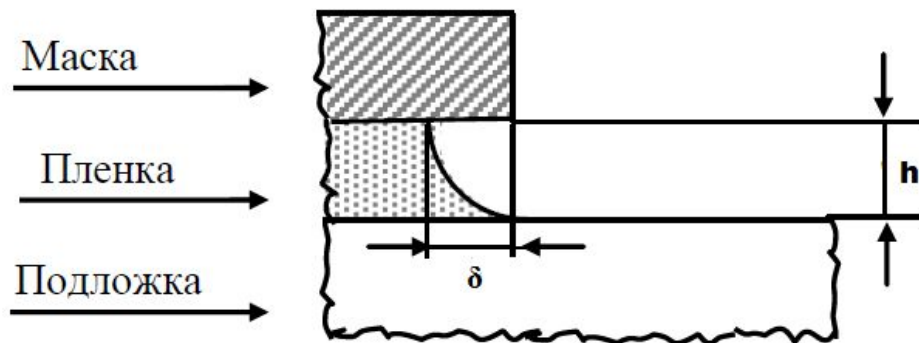
$$v_{SCet} = 10^7 \cdot \varepsilon_{cr} \cdot Y_{cr} \cdot q_r / n_M \text{ [нм/с]},$$

где $\varepsilon_{cr} = c_{cr} \cdot \exp(-E_{act}/k \cdot T_s)$ - вероятность спонтанной химической реакции; Y_{cr} - коэффициент выхода материала в результате спонтанной химической реакции травления, атом/ХАЧ (для реакции $Si + 4F^{\bullet} \rightarrow SiF_4$ $Y_{cr} = 0,25$ атом/ХАЧ); $n_M = (\rho_M \cdot N_A) / A_M$ - атомная плотность материала, атом/см³; $q_r = 1/4 \eta_r \cdot v_r$ - плотность потока ХАЧ, падающего на поверхность материала, ХАЧ/(см²·с); c_{cr} - предэкспоненциальный множитель, не зависящий от температуры; T_s - температура поверхности обрабатываемого материала; k - постоянная Больцмана; E_{act} - энергия активации спонтанной химической реакции травления; ρ_m и A_m - соответственно, плотность (г/см³) и атомная масса (г/моль) материала; N_A - число Авогадро, атом/моль; η_r и v_r - соответственно, концентрация и средняя тепловая скорость ХАЧ.

селективность спонтанного химического травления одного материала относительно другого определяется выражением:

$$s(M_1/M_2) = (c_{cr1} \cdot Y_{cr1} \cdot n_{M2} / c_{cr2} \cdot Y_{cr2} \cdot n_{M1}) \cdot \exp\{-(E_{act1} - E_{act2})/k \cdot T_s\}$$

По своему механизму процессы спонтанного химического травления материалами потоками атомов и радикалов должны быть изотропными, также как процессы жидкостного химического травления (ЖХТ) с показателем анизотропии $A = 1$. Однако пониженное давление и коллимирующее действие маскирующих покрытий придают некоторую направленность потокам ХАЧ, и анизотропия спонтанного химического травления обычно лежит в диапазоне (2,0 - 5,0)



Характерный профиль травления пленки материала функционального слоя для жидкостного химического травления с $\delta = h$ и для спонтанного химического травления потоками атомов и радикалов при пониженном давлении с $\delta = (0,2 - 0,5) \cdot h$.

. Ионное травление материалов физическим распылением

В процессах ионного травления физическим распылением (*ion etching by physical sputtering - PS etching*) скорость травления материала функционального слоя (ФС) определяется только процессом его физического распыления за счет кинетической энергии ионов или атомов инертных газов, т.к. никакие химические реакции не протекают. К такому типу относятся процессы:

- ионно-плазменного травления (ИПТ);
- ионно-лучевого травления (ИЛТ);
- и атомно-лучевого травления (АЛТ).

Процесс физического распыления материалов количественно характеризуется коэффициентом распыления (КР) (*sputtering yield*), который определяется как число атомов, выбиваемых (распыляемых) из материала одним падающим (бомбардирующим) ионом. КР обычно не является целым числом, и должен рассматриваться как среднестатистическое значение по большому количеству бомбардирующих ионов. В соответствии с определением КР Y_s определяется по формуле:

$$Y_s = N_a / N_i \text{ [атом/ион]},$$

где N_a - число выбитых (распыленных) атомов материала; N_i - число ионов, бомбардирующих материал.

Значение КР материалов ионами инертных газов зависит от следующих факторов:

1. Массы бомбардирующих ионов m_i . КР материалов возрастает с увеличением массы (атомного номера) бомбардирующих ионов в области энергий используемых для травления материалов физическим распылением. Причем, если рост значений КР материалов при переходах от гелия к неону и от неона к аргону значительный, то при переходах от аргона к криптому и от криптона к ксенону он резко уменьшается.
2. От энергии бомбардирующих ионов E_i . КР материалов растет прямо пропорционально с увеличением энергии ионов до значения E_i^* , которое лежит в диапазоне (300 - 500) эВ. При $E_i > E_i^*$ рост КР с повышением энергии ионов замедляется.

$$E_i^* [\text{Дж}] = 515a^2 \cdot z_i \cdot z_a \cdot (m_i + m_a) / m_a,$$

где $a = 0,8853a_0 \cdot (z_i^{2/3} + z_a^{2/3})^{-1/2}$ - характерный радиус экранирующего электронного облака по модели Томаса - Ферми; $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м - первый боровский радиус атома водорода; z_i и z_a - атомные номера бомбардирующего иона и распыляемого материала; m_i и m_a

Расчетные значения энергии E_i^* материалов при их распылении ионами аргона.

Распыляемый материал	C	Al	Si	Ti	Cr	Cu	Ni	Ge	Nb	Mo	Ta	W	Au	Pt
Значение энергии E_i^* , эВ	310	320	330	330	340	350	360	360	380	390	440	450	450	460

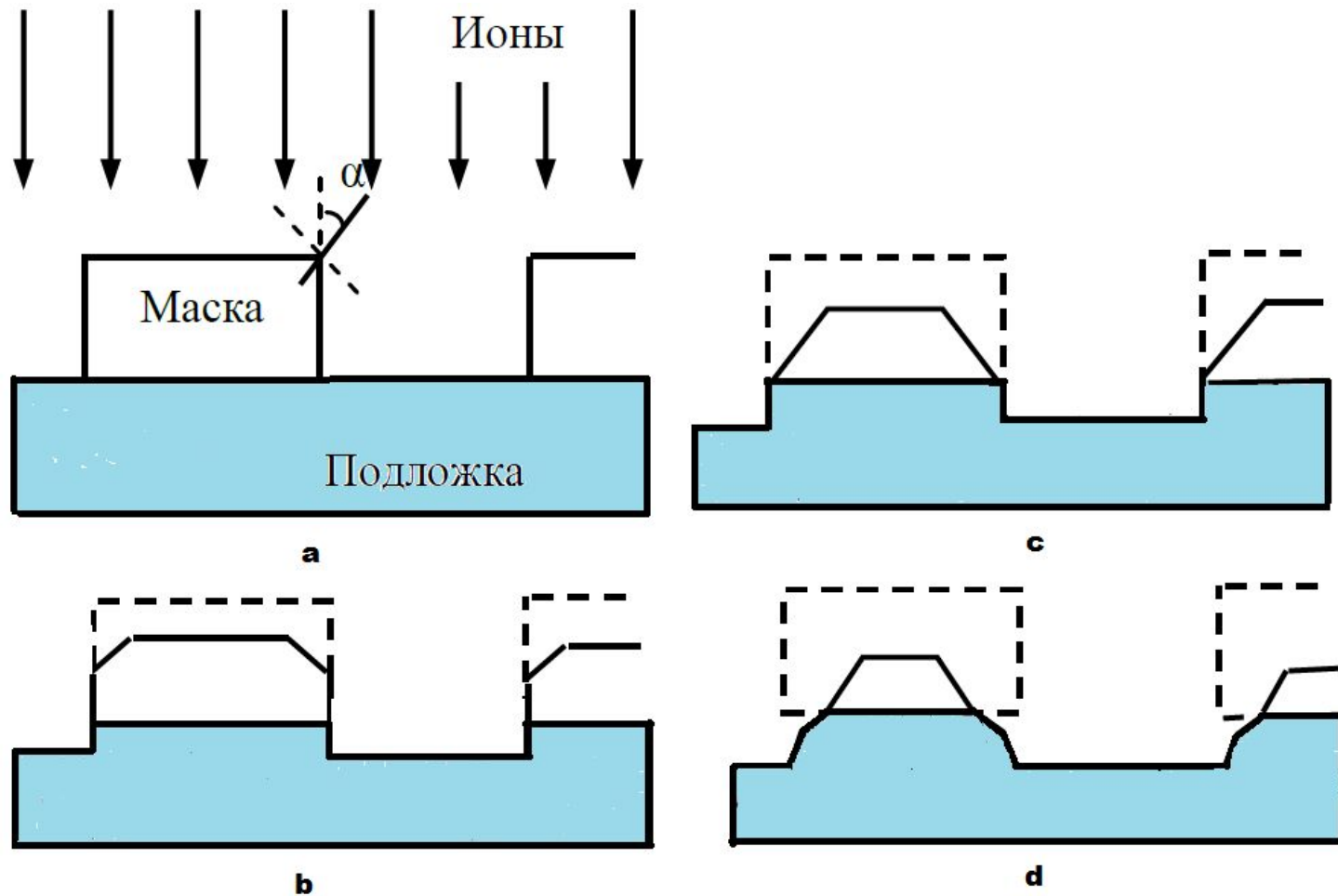
3. От атомного номера распыляемого материала z_a . Наблюдается сложная периодическая зависимость КР от атомного номера распыляемого материала, в которой можно выделить такую закономерность: в пределах каждого периода таблицы Менделеева КР возрастает по мере заполнения электронных d-оболочек.

4. От угла падения ионов на поверхность распыляемого материала α . С ростом этого угла от 0 (отсчет ведется от нормали к поверхности) до $(50 - 70)^\circ$ наблюдается увеличение КР материалов. Угол падения ионов на поверхность распыляемого материала, который соответствует максимальному КР, обозначается как α_{\max} . Экспериментально определенные значения α_{\max} составляют для монокристаллического кремния соответственно 50° , $53,5^\circ$ и 62° при энергии ионов аргона E_i 350 эВ, 500 эВ и 1000эВ [86].

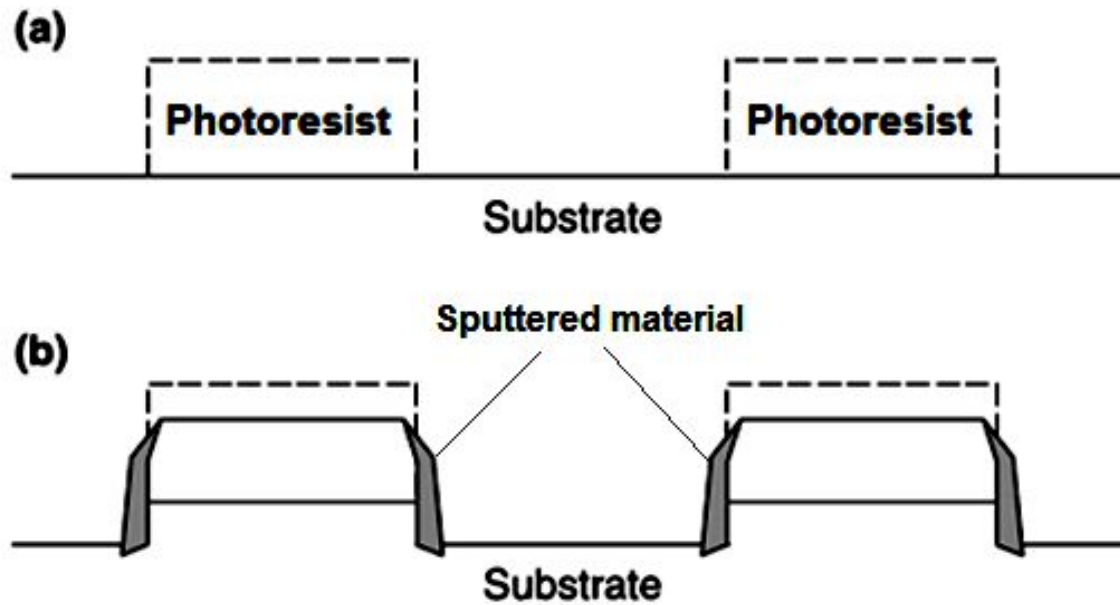
Скорость ионного травления материала физическим распылением (*ion etching by physical sputtering - PS etching*) в точке с координатами (x,y) на его поверхности при падении ионов под углом α (угол отсчитывания от нормали к поверхности материала) определяется по формуле:

$$V_{\text{PSet}}(x,y;\alpha) = 6,25 \cdot 10^{25} \cdot Y_s(E_i, \alpha) \cdot j_i(x,y) \cdot \cos \alpha / n_M \text{ [нм/с]},$$

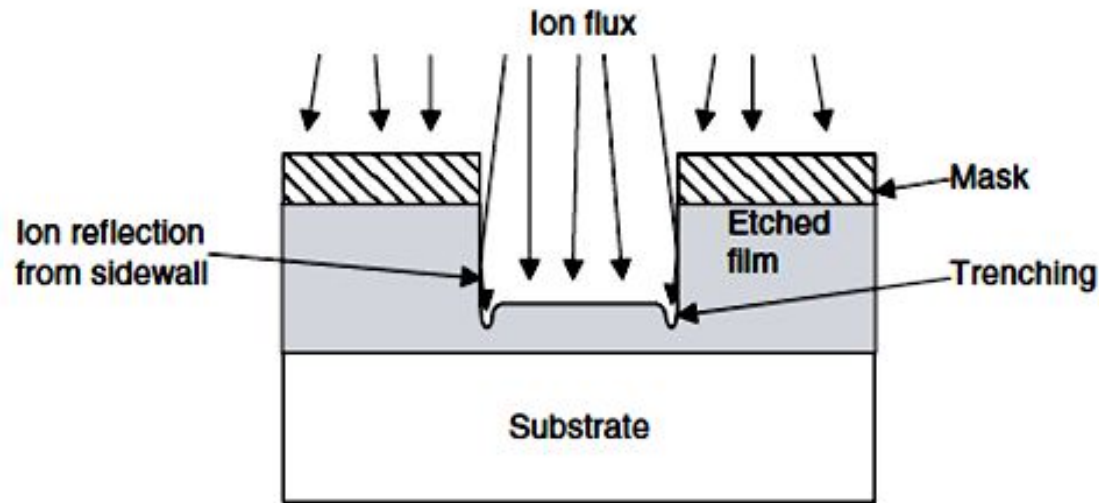
где $Y_s(E_i, \alpha)$ - коэффициент распыления материала, зависящий от энергии E_i и угла падения ионов (атомов) на поверхность материалов \square , атом/ион; $j_i(x,y)$ - плотность ионного тока в точке с координатами (x,y) на поверхности материала, мА/см²; n_M - атомная плотность материала в атом/см³.



Эволюция профиля ионного травления подложки через защитную маску: а – профиль маски и подложки до проведения процесса ионного травления; б – начало образования граней на маске; в – грани маски достигли начальной плоскости подложки; д – изменение формы и размеров вытравливаемого в подложке профиля



Влияние эффекта переосаждения распыленного материала (*sputtered material*) подложки (*substrate*) на профиль ионного травления структуры через фоторезистивную маску (*photoresist*)



Влияние на профиль получаемой при ионном травлении структуры (*etched film*) эффекта отражения ионов от боковых стенок структуры (*ion reflection from sidewall*), способствующего образованию на дне структуры пристеночных канавок (*trenching*)

Jackson M.J. Micro and nanomanufacturing. Springer Science+Business Media, LLC, N.Y., USA, 2007. - 699 p.

Скорости травления различных материалов ионами аргона при энергии $E_i = 700$ эВ и плотности ионного тока $j_i = 1,2$ мА/см² [93].

Материал	Скорость травления, нм/мин	Материал	Скорость травления, нм/мин
Золото (Au)	304	Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	32
Платина (Pt)	131	Никель/железо (NiFe = 81/19)	85
Палладий (Pd)	178	Нитрид титана (TiN)	38
Медь (Cu)	167	Фоторезист серии AZ	48
Алюминий (Al)	106	Ниобат лития (LiNbO ₃)	72
Титан (Ti)	40	Алюминий/карбид титана (AlTiC)	26
Титан/вольфрам (TiW)	61	Кремний (Si)	75
Хром (Cr)	81	Двуокись кремния (SiO ₂)	72
Оксид хрома (Cr ₂ O ₃)	31	Тантал (Ta)	54

Применительно к процессам травления материалов физическим распылением, следует отметить два важных аспекта:

1. Существующие теории физического распыления материалов потоками ионов, используемые в настоящее время, создавались при условии, что плотность потока ионов значительно меньше поверхностной плотности атомов материалов. Поэтому распыление каждого атома материала падающим ионом является актом, независимым от воздействия предыдущих ионов. Такое условие справедливо при плотностях ионного тока в диапазоне (0,3 - 3,0) мА/см². Однако уже созданы источники ионов на основе плазмы высокой плотности (*high density plasma - HDP*), позволяющие получать ионные пучки с плотностями ионного тока (10 - 20) мА/см² [10], при которых условие независимости ионных воздействий не выполняется. Для таких пучков требуется провести комплекс исследований, чтобы определить механизм удаления материалов и вывести закономерности его влияния на технологические характеристики.

2. Промышленно доступные источники, позволяющие создавать потоки нейтральных ускоренных атомов, появились только в последнее десятилетие. А до этого, в качестве потоков нейтральных частиц, использовались ионные пучки с компенсированным суммарным зарядом за счет введения (впрыска) в них пучков электронов. Поэтому для распыления материалов потоками ускоренных нейтральных атомов тоже надо провести комплекс исследований по выявлению его механизма и закономерностей.

Ионное травление химически модифицированным физическим распылением материалов.

При ионном травлении химически модифицированным физическим распылением (*ion etching by chemically modified physical sputtering - CMPS etching*) спонтанные, радиационно-стимулированные или радиационно-возбуждаемые реакции с образованием нелетучих соединений (продуктов) модифицируют поверхностные слои обрабатываемого материала функционального слоя (ФС), которые удаляются в результате физического распыления. **Например, поверхность кремния под воздействием плазмы аргон/кислород сразу превращается в слой двуокиси кремния (SiO_2), и скорость травления кремния определяется скоростью физического распыления слоев SiO_2 .**

Наиболее ярко выражен этот эффект при травлении ионами инертных газов таких легко окисляющихся материалов, как алюминий (Al) и титан (Ti). В этих случаях даже повышения остаточного давления в вакуумной камере установки с $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) до $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) приводит к снижению скорости ионного травления слоев алюминия и титана в несколько раз за счет окисления их поверхности.

Скорость травления химически модифицированных поверхностных слоев материала за счет физического распыления может быть как больше, так и меньше скорости физического распыления исходного материала. В первом случае происходит химически ускоренное физическое распыление, а, во втором - химически замедленное физическое распыление. К такому типу относятся некоторые процессы :

- реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ);
- реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ);
- реактивного атомно-лучевого травления (РАЛТ);

а также те процессы ионно-плазменного (ИПТ), ионно-лучевого (ИЛТ) и атомно-лучевого травления (АЛТ), в которых активные частицы остаточных газов (кислорода и азота) способны проводить быструю химическую модификацию поверхности обрабатываемого материала.

Процессы химически модифицированного физического распыления наиболее часто используются при травлении ионами аргона в присутствии кислорода (его молекул, атомов или ионов) неокисляющихся (Au, Pt) или слабо окисляющихся (Cu, Ni) материалов через маски из сильно окисляющихся материалов (Al, Ti) для повышения селективности травления.

Радиационно-стимулированное химическое травление материалов.

При радиационно-стимулированном химическом травлении (radiation assisted chemical etching - RAC etching) спонтанные химические реакции вносят существенный вклад в удаление материала функционального слоя (ФС). Радиационное воздействие (РВ), в качестве которого может выступать облучение поверхности обрабатываемого материала потоками ионов, электронов, фотонов или их комбинацией в виде плазмы, производит стимуляцию (активацию) химических реакций и значительно увеличивает скорость травления материалов. Доля физического распыления в удалении материалов мала. **К такому типу относятся процессы:**

- радиационно-стимулированного газового травления (РСГТ);
- радиационно-стимулированного радикального травления (РСРТ);
- плазменного травления (ПТ);
- реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ);
- реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ);
- и реактивного атомно-лучевого травления (РАЛТ);

в которых нейтральные газовые частицы спонтанно травят обрабатываемый материал.

Скорость радиационно-стимулированного химического травления (*radiation assisted chemical etching - RAC etching*) материала определяется выражением:

$$V_{\text{RACet}} = 10^7 \cdot [\varepsilon_{\text{cr}} \cdot Y_{\text{cr}} \cdot q_{\text{r}} + \varepsilon_{\text{racr}}(E_{\text{re}}) \cdot Y_{\text{racr}}(E_{\text{re}}) \cdot q_{\text{re}}] / n_{\text{M}} \text{ [нм/с]},$$

Где $\varepsilon_{\text{racr}}(E_{\text{re}})$ - вероятность радиационно-стимулированной химической реакции, зависящая от энергии РВ; $Y_{\text{racr}}(E_{\text{re}})$ - коэффициент выхода материала в результате радиационно-стимулированной химической реакции, зависящий от энергии РВ, атом/частица; q_{re} - плотность потока РВ на поверхность материала, частиц/(см²*с);

Киреев В.Ю. Газоплазменные процессы и оборудование микроэлектронного производства. - Глава 5 в энциклопедии «Машиностроение», том III-8. «Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении». /Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – Изд-во «Машиностроение», М.: 2000. – 744 с.

Сравнивая выражение для радиационно-стимулированного химического травления с формулой для спонтанного травления, его можно представить в виде:

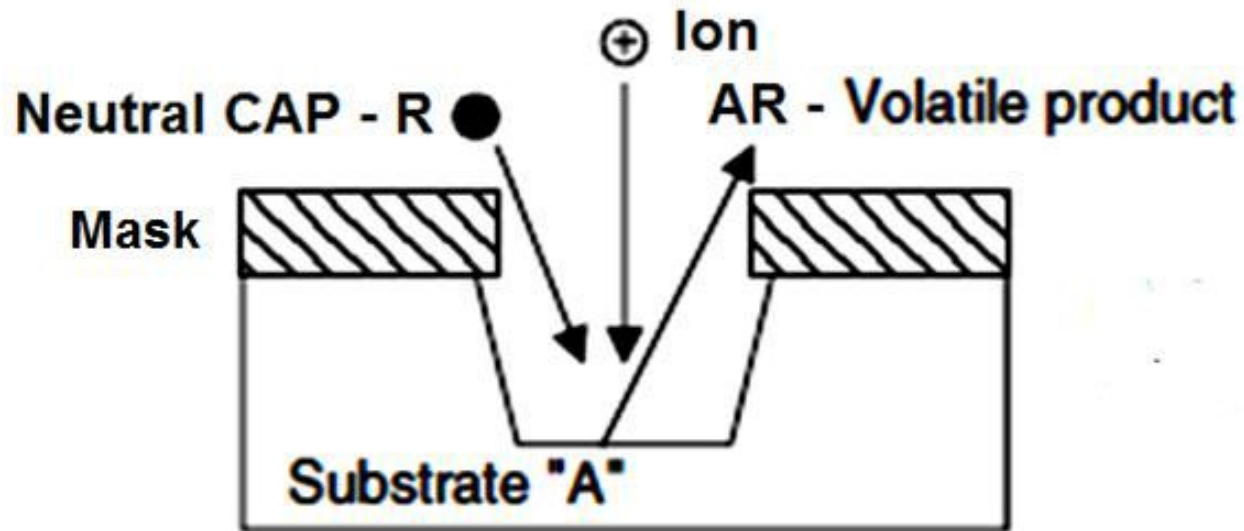
$$V_{\text{RACet}} = V_{\text{SCet}} + V_{\text{ACet}}$$

где V_{SCet} и V_{ACet} - соответственно спонтанная и стимулированная (вызванная радиационной стимуляцией) компоненты скорости радиационно-стимулированного химического травления.

Тогда анизотропия радиационно-стимулированного химического травления может быть выражена как:

$$A = V_{\text{RACet}}/V_{\text{SCet}} = 1 + V_{\text{ACet}}/V_{\text{SCet}}$$

т.е. значением анизотропии можно управлять с помощью изменения плотности потока радиационного воздействия.



Типичный профиль ионно-стимулированного газового или радикального травления

Coburn J.W., Winters H.F. Plasma etching - a discussion of mechanisms. - J. Vac. Sci. Technol., 1979, v. 16, No. 2, p. 391 - 403.

Соотношение между плотностью потока молекул, атомов или радикалов рабочего газа и плотностью тока пучка ионов инертного газа составляет обычно больше, чем 50:1. Это приводит к тому, что давление рабочего газа около обрабатываемой поверхности на один - два порядка больше, чем давление инертного газа в источнике. Таким образом, значительно (в несколько раз) увеличивается скорость травления материалов, как относительно радикального (или газового) травления, так и относительно ионно-лучевого травления.

Стимулирующее воздействие ионов на химические реакции прямо пропорционально растет с их энергией до значений в диапазоне (120 - 150) эВ, а дальше рост начинает резко замедляться. Таким образом, оптимальные по энергетической эффективности воздействия ионов инертных газов, стимулирующие химические реакции травления материалов, происходят при значительно меньших энергиях, чем оптимальные по энергетической эффективности процессы физического распыления этих материалов.

Радиационно-возбуждаемое химическое травление материалов.

При радиационно-возбуждаемом химическом травлении (*radiation excited chemical etching - REC etching*) **спонтанные химические реакции травления материала функционального слоя (ФС) не протекают**. Основной вклад в удаление материала вносят возбуждаемые радиационной стимуляцией химические реакции, доля физического распыления мала. **К такому типу относятся процессы:**

- радиационно-стимулированного газового травления (РСГТ);
- радиационно-стимулированного радикального травления (РСРТ);
- плазменного травления (ПТ);
- реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ);
- реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ);
- реактивного атомно-лучевого травления (РАЛТ);

в которых нейтральные газовые частицы спонтанно не травят обрабатываемый материал

В этом случае радиационное воздействие (РВ) само возбуждает химические реакции, и его параметры (вид, энергия, интенсивность, пространственное распределение) непосредственно определяют характеристики травления материала ФС.

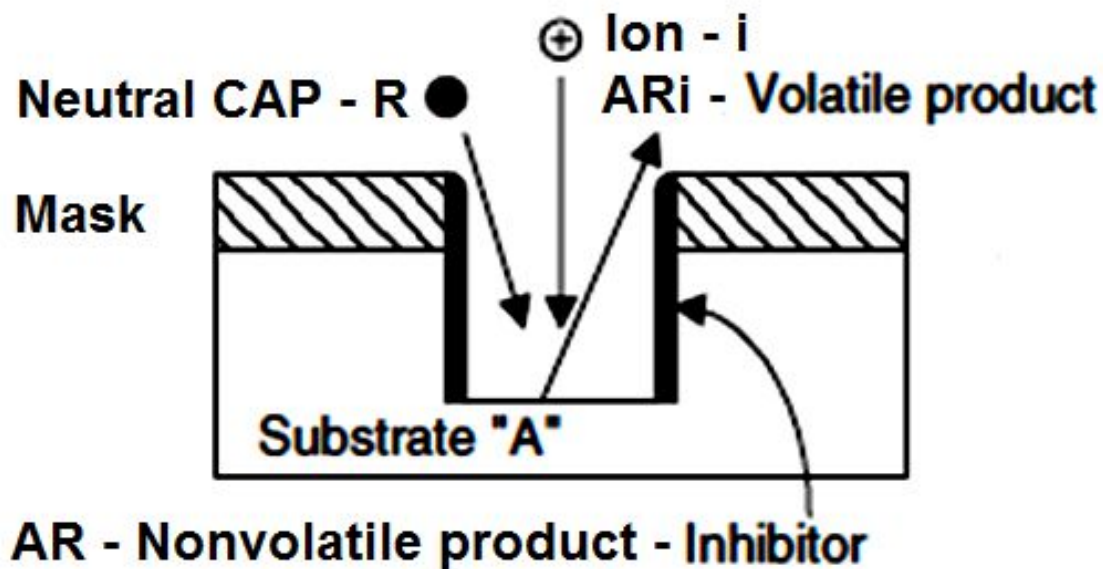
Скорость радиационно-возбуждаемого химического травления (*radiation excited chemical etching - REC etching*) материала ФС определяется выражением:

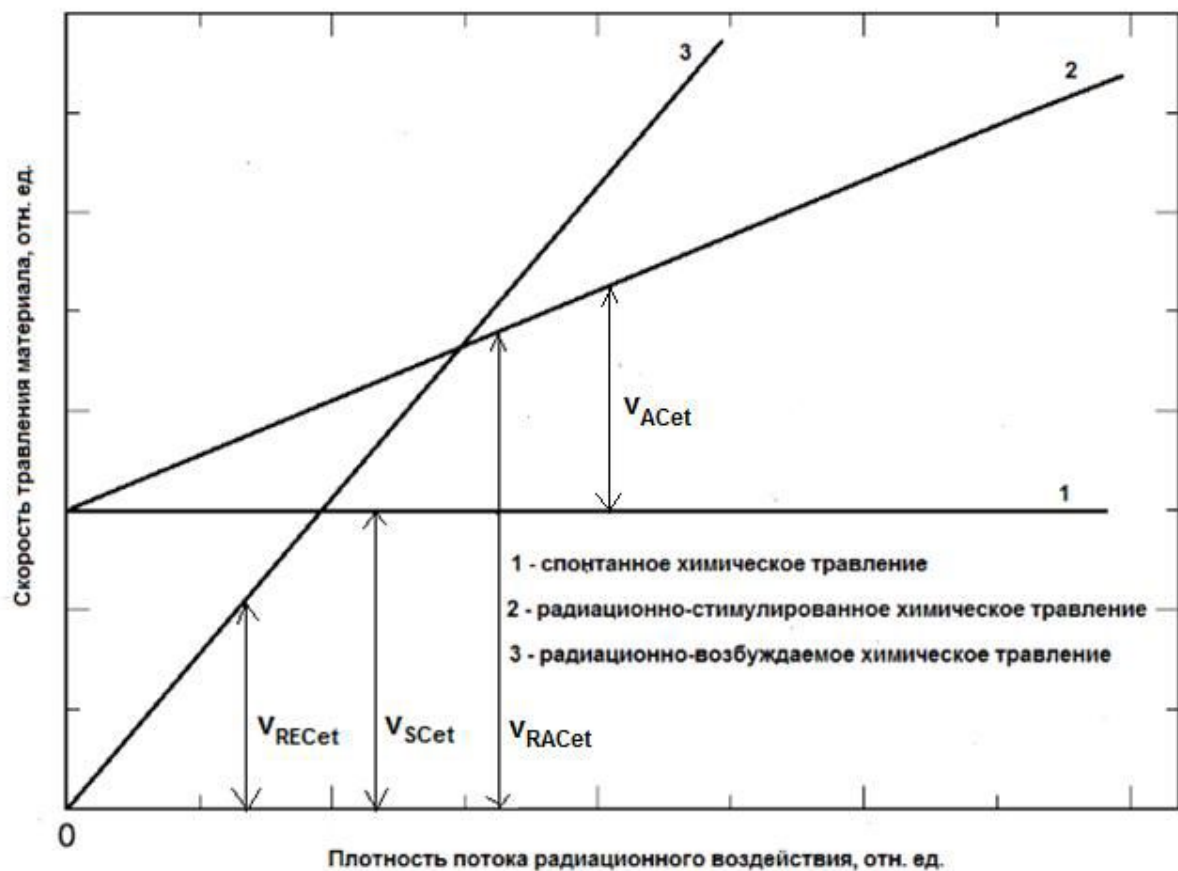
$$V_{RECet} = 10^7 \cdot \varepsilon_{recr}(E_{re}) \cdot Y_{recr}(E_{re}) \cdot q_{re} / n_M \text{ [нм/с]},$$

Где $\varepsilon_{recr}(E_{re})$ - вероятность радиационно-возбуждаемой химической реакции, зависящая от энергии РВ;

$Y_{recr}(E_{re})$ - коэффициент выхода материала в результате радиационно-возбуждаемой химической реакции, зависящий от энергии РВ, атом/частица; q_{re} - плотность потока РВ на поверхность материала, частиц/(см²*с); n_M - атомная плотность материала в атом/см³.

В процессах ионно-возбуждаемого газового и радикального травления (ИВГТ и ИВРТ), когда возбуждение химической реакции травления материала (substrate —A) определенными химически активными нейтральными частицами (neutral CAP - R) (газовыми молекулами, атомами или радикалами) проводится потоком ионов инертного газа (ion), формируемого в автономном ионном источнике с заданными значениями энергии, плотности тока и угла падения, то типичный профиль травления должен иметь вид





Типичные зависимости скорости травления материалов для спонтанного химического травления v_{SCet} , радиационно-стимулированного химического травления v_{RACet} и радиационно-возбуждаемого химического травления v_{RECet} . Величина v_{ACet} является стимулированной компонентой скорости радиационно-стимулированного химического травления.

При проведении процессов травления в условиях плазмы (низкотемпературной неравновесной газоразрядной плазмы - ННГП) процессы взаимодействия различных ХАЧ, которые могут образовывать летучие и нелетучие продукты реакций с поверхностью материала, а также полимерные пленки на его поверхности, одновременно стимулируются потоками ионов, электронов и излучения плазмы. Такой широкий спектр одновременного воздействия различных химических реакций и стимулирующих факторов не дает возможности выделить вклад каждого из них в процесс травления и независимо управлять его параметрами.

Повышение концентрации электронов, например, за счет увеличения мощности, вкладываемой в плазму, автоматически изменит концентрацию и энергию ионов, а также интенсивность излучения плазмы. Еще сложнее дело обстоит, когда плазма служит одновременно средой, в которой находится обрабатываемая пластина, источником химических частиц, производящих реакции травления, модификации и полимеризации на поверхности материала, а также стимулятором или возбудителем (инициатором) этих реакций, как процессах плазменного (ПТ) и реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ).

В этом случае изменение стимулирующего воздействия (концентрации электронов) приводит к изменению еще и концентрации различных ХАЧ, производящих реакции травления, модификации и полимеризации на поверхности обрабатываемых материалов. Невозможность точного выделения стимулирующего или возбуждающего воздействия плазмы, а также отсутствие независимого управления его параметрами без изменения типа и характеристик потоков химических частиц и производимых ими реакций, приводят к различным профилям плазмо-стимулированного газового или радикального травления материалов.

Сравнительные технологические характеристики процессов вакуумного газоплазменного травления

Технологическая характеристика	Процессы вакуумного газоплазменного травления							
	ИПТ	ИЛТ	РТ	ПТ	РИПТ	РИЛТ	ГТ	ИСГТ
Скорость травления $v_{\text{ет}}$, нм/с	0,1 - 1,0	0,3 - 3,0	1,0 - 10	3,0 - 15	1,0 - 5,0	0,5 - 3,0	10 - 20	1,0 - 10
Равномерность травления R , %	90 - 95	95 - 97	90 - 99	80 - 95	90 - 95	95 - 97	97 - 99	95 - 97
Селективность травления s , б/р	2,0 - 5,0	2,0 - 5,0	20 - 50	10 - 30	5,0 - 10	5,0 - 10	30 - 80	10 - 20
Анизотропия травления A , б/р	5,0 - 10	10 - 100	2,0 - 5,0	5,0 - 20	10 - 50	10 - 100	2,0 - 5,0	10 - 100
Коэффициент загрузки K_f , б/р	1,0	1,0	1,0 - 0,5	1,0 - 0,6	1,0 - 0,8	1,0	1,0 - 0,3	1,0
Фактор перетрава F , б/р	1,3	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	1,1	1,2
Типичная плотность привносимой дефектности $D_p \times 10^2$, дефект/см ² (для частиц с $d_D \geq d_{\text{cr}}$)	5,0 - 10	3,0 - 5,0	1,0 - 5,0	5,0 - 15	5,0 - 10	3,0 - 5,0	3,0 - 7,0	1,0 - 5,0
Плотность привносимых радиационных дефектов $D_{\text{гд}}$ в безразмерной шкале 0 - 1,0	1,0	0,9	0,1	0,3	0,7	0,5	0	0,3

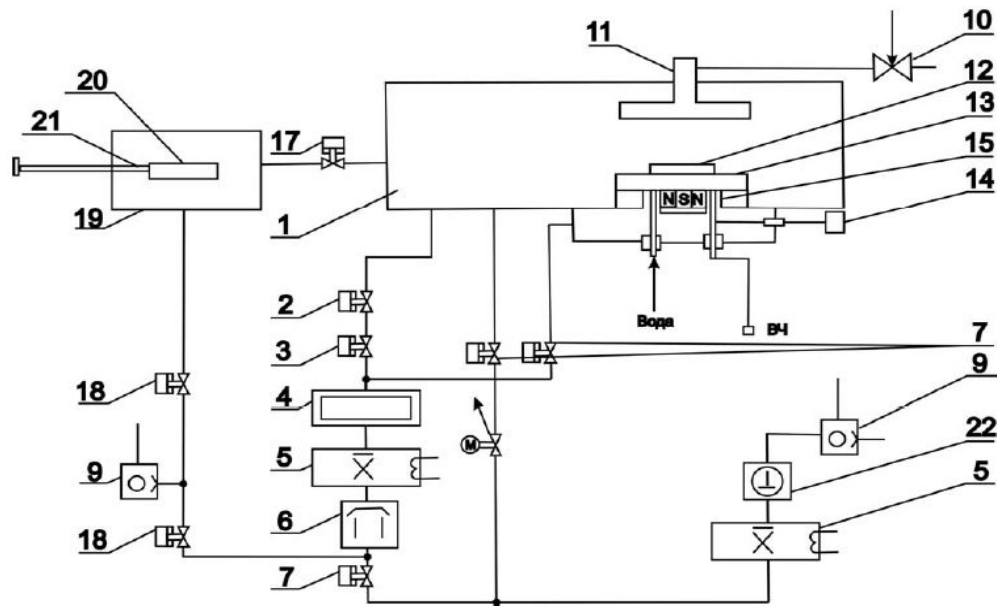


Рис 1. Структурная схема вакуумного агрегата:

1 - реакционная камера, 2 - высоковакуумный затвор, 3 - регулятор потока высоковакуумной магистрали, 4 - азотная ловушка, 5 - водяная ловушка, 6 - паромасляный насос, 7 - вакуумный клапан, 8 - регулятор потока, 9 - форвакуумный насос, 10 - напекатель рабочего газа, 11 -анод, 12 - подложка, 13 - катод, 14 - привод сканирования магнетрона, 15 - магнетрон, 16 - камера магнетрона, 17 - высоковакуумный затвор, 18 - высоковакуумные клапаны $D_y 56$, 19 - шлюзовая камера, 20 - подложкодержатель, 21 - ручной манипулятор, 22 - насос АВР

Состав и параметры оборудования вакуумного газоплазменного травления функциональных слоев.

Оборудование вакуумного газоплазменного травления (ВГПТ) материалов функциональных слоев (ФС) состоит из следующих основных функциональных систем:

1. Реактора (системы травления), служащего для проведения процесса травления ФС на пластине (подложке) и состоящего из рабочей камеры и расположенных внутри нее или присоединенных к ней снаружи подложкодержателей, экранов, электродов, нагревательных элементов, источников радиационных (плазменных, фотонных, электронных, ионных, атомных) воздействий и химически активных частиц (ХАЧ).
2. Газовой системы, служащей для подачи требуемых потоков (или порций потоков) газов, паров или парогазовых смесей в рабочую камеру и автономные источники радиационных воздействий и ХАЧ, их распределения в пространстве и во времени и состоящей из нескольких каналов, в состав которых входят фильтры, трубки, испарители, вентили, клапана, измерители и регуляторы расхода газов, коллекторы и стабилизаторы давления газов.
3. Вакуумной системы, служащей для обеспечения требуемых остаточных и рабочих давлений, а также скоростей откачки или отвода поступающих реагентов и продуктов реакций в рабочей, транспортной и шлюзовой камерах, автономных источниках радиационных воздействий и ХАЧ, и состоящей из откачных (отводных) коллекторов или отверстий, труб, клапанов, заслонок, измерителей и регуляторов давлений и скоростей откачки, ловушек, фильтров, вакуумных насосов, скрубберов или нейтрализаторов выхлопных газов.
4. Системы возбуждения и поддержания плазмы разряда в рабочей камере при проведении плазменных процессов травления и процессов автоматической очистки элементов рабочей камеры, а также в автономных источниках для активации реагентов, состоящей из генераторов и источников электрических и магнитных полей, согласующих устройств, кабелей или волноводов, измерителей и регуляторов подводимых мощностей.

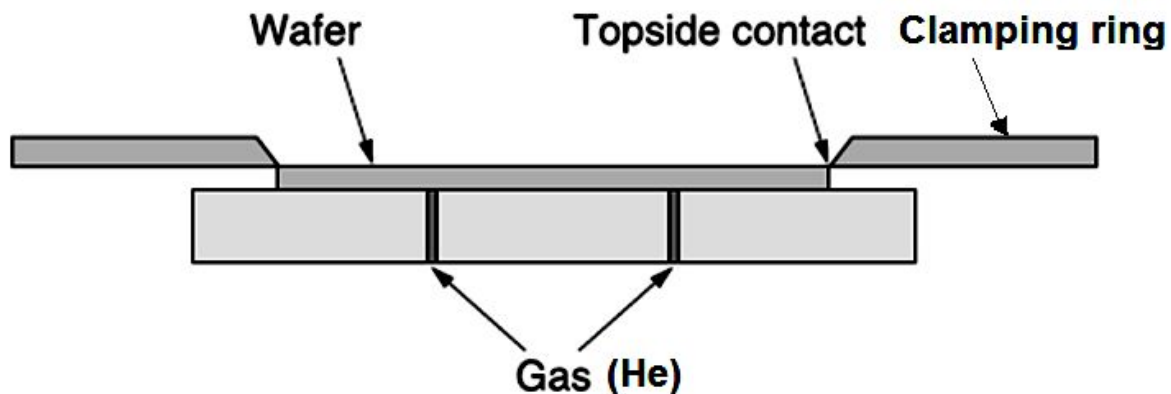
5. Системы термостатирования электродов, стенок камеры, подложкодержателей, испарителей жидких реагентов, участков газовых каналов и откачных магистралей, служащей для измерения, регулирования и стабилизации их температуры и состоящей из нагревателей, термостатов, труб, емкостей хладагентов, устройств их перекачки, подачи и распределения, измерителей и регуляторов температуры.
6. Системы загрузки – выгрузки пластин, кассет, СМДФ (стандартный механический интерфейс) контейнеров, транспортирования и позиционирования пластин внутри установки, состоящей из СМДФ загрузчиков, приемных и передающих кассет, загрузочных и транспортных камер, устройств загрузки, перемещения, позиционирования и прижима пластин на подложкодержателях внутри установки.
7. Системы контроля момента окончания процесса травления ФС (времени травления), состоящей из датчиков сигналов на основе оптического эмиссионно-спектрального, лазерного интерферометрического или масс-спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных программно-аппаратных вычислительных комплексов для обработки полученных сигналов по требуемому алгоритму.
8. Системы управления, служащей для управления перечисленными выше системами, контроля режимов их работы и исправности входящих в них устройств, и состоящей из управляющей ЭВМ с программным обеспечением, клавиатурой ввода команд, дисплеем и устройств записи, хранения и передачи информации по локальным и глобальным компьютерным сетям.

Состав оборудования ВГПТ материалов ФС определяет

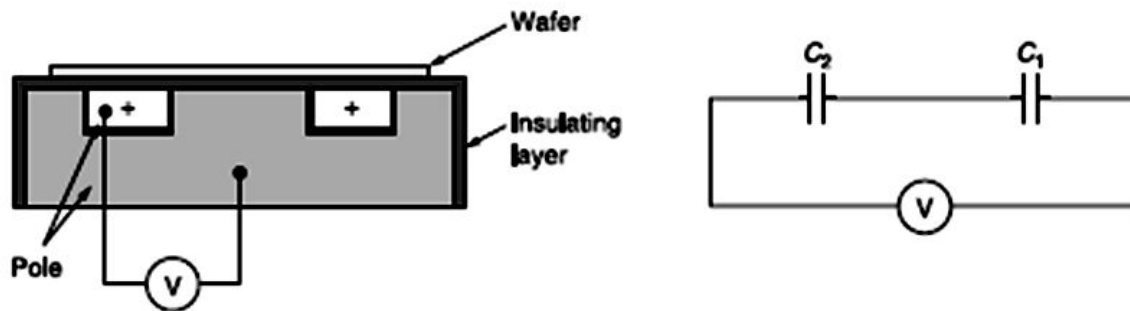
перечень операционных (целенаправленно выставляемых режимных) параметров, к которым относятся:

1. Остаточное давление ($P_{\text{ост}}$) и диапазон его возможного изменения ($\Delta P_{\text{ост}}$) в установке.
2. Рабочее давление (P_p) и диапазон его возможного изменения (ΔP).
3. Расходы рабочих газов и паров (Q_1, Q_2, \dots, Q_n), определяющие состав рабочей смеси, и диапазоны их возможного изменения ($\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_n$).
4. Мощности плазменных разрядов (W), подаваемые на различные электроды и/или напряжения и плотности токов различных источников, а также диапазоны их возможного изменения (ΔW).
5. Температуры подложкодержателя (T_{sub}), электродов (T_{el}) и стенок камеры (реактора) (T_{cw}) и диапазоны их возможного изменения (ΔT_{sub}), (ΔT_{el}) и (ΔT_{cw}).
6. Время процесса травления (etching) всего ФС (tet) или время отдельных стадий (step) процесса травления ($t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sn}$).

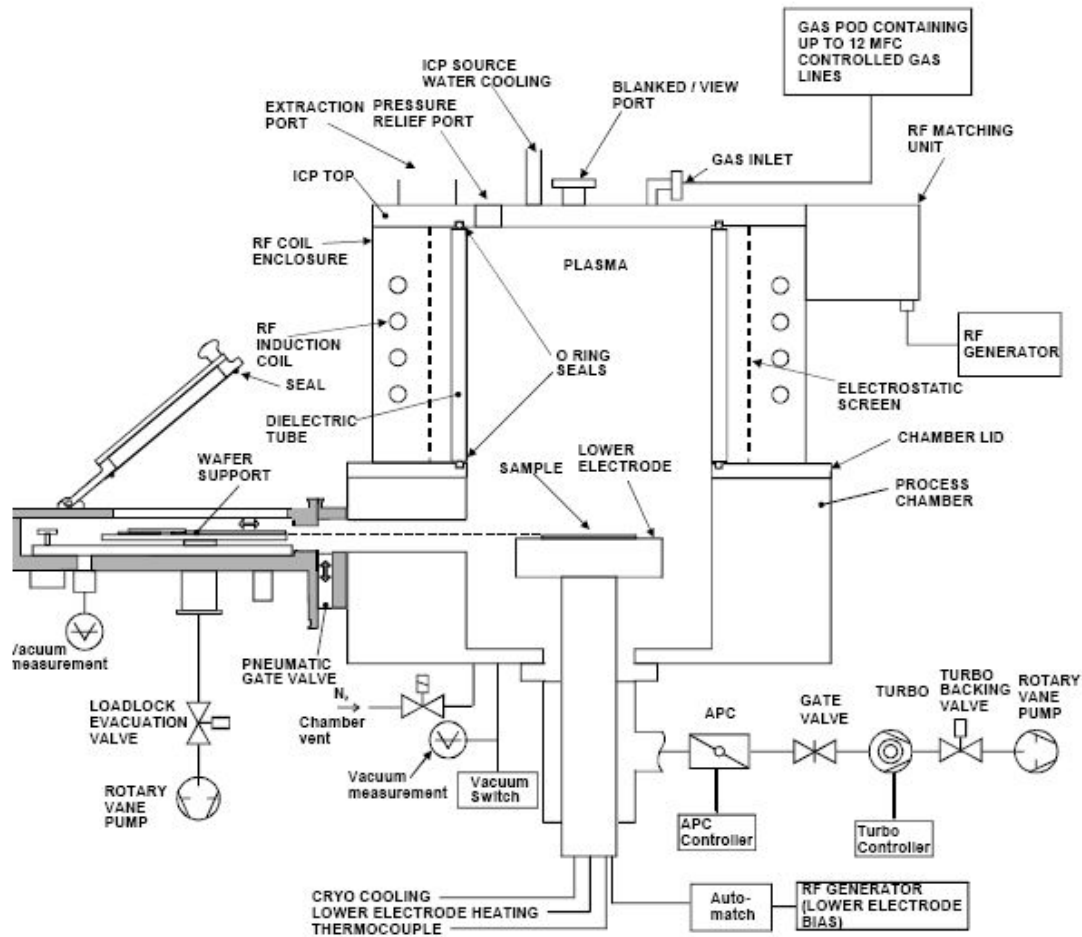
Указанные шесть операционных параметров встречаются во всех видах оборудования ВГПТ, тогда как для отдельных групп оборудования могут добавляться дополнительные операционные параметры.



Способ крепления пластины к охлаждаемому подложкодержателю и обеспечения ее хорошего теплового контакта в оборудовании вакуумного газоплазменного травления: с помощью прижимного кольца (*clamping ring*) и напуска гелия (*He*) под пластину;



Способ крепления пластины к охлаждаемому подложкодержателю и обеспечения ее хорошего теплового контакта в оборудовании вакуумного газоплазменного травления с помощью электростатического прижима, создаваемого с подачей высокого постоянного напряжения (V) между двумя изолированными частями подложкодержателя



Изображение ICP системы для травления. Электростатический экран между катушкой и диэлектрическим окном (кварцевая труба) обеспечивает индуктивное связывание и предотвращает емкостное связывание между плазмой и катушкой. Образец загружается рукой – роботом, специально разработанной для безопасной загрузки образцов MEMS

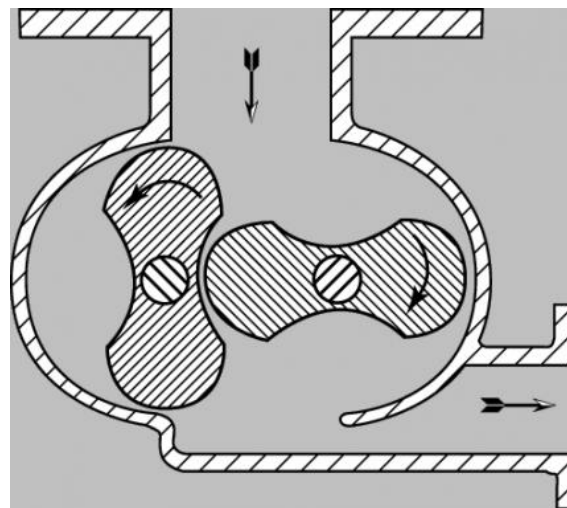
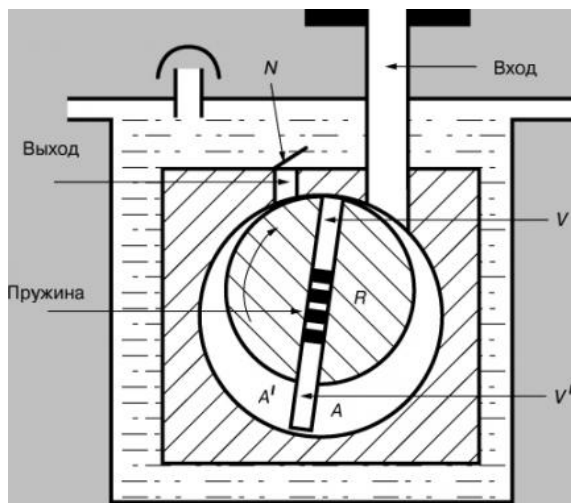
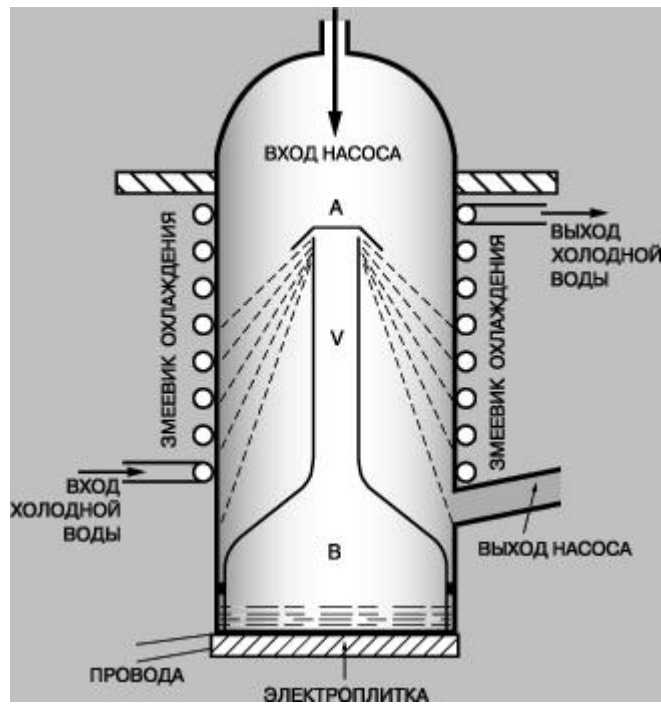
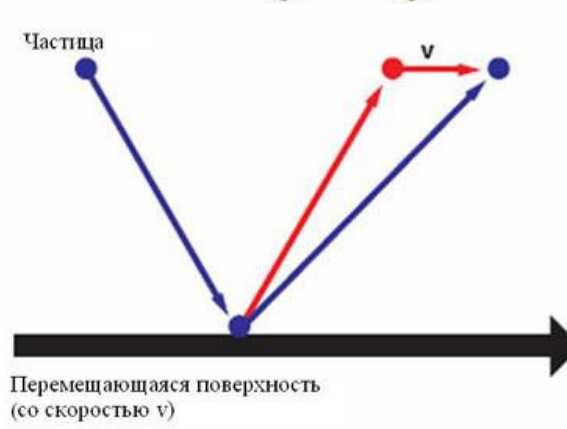
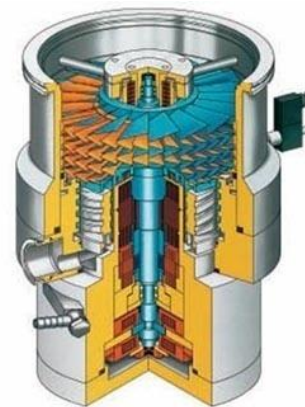
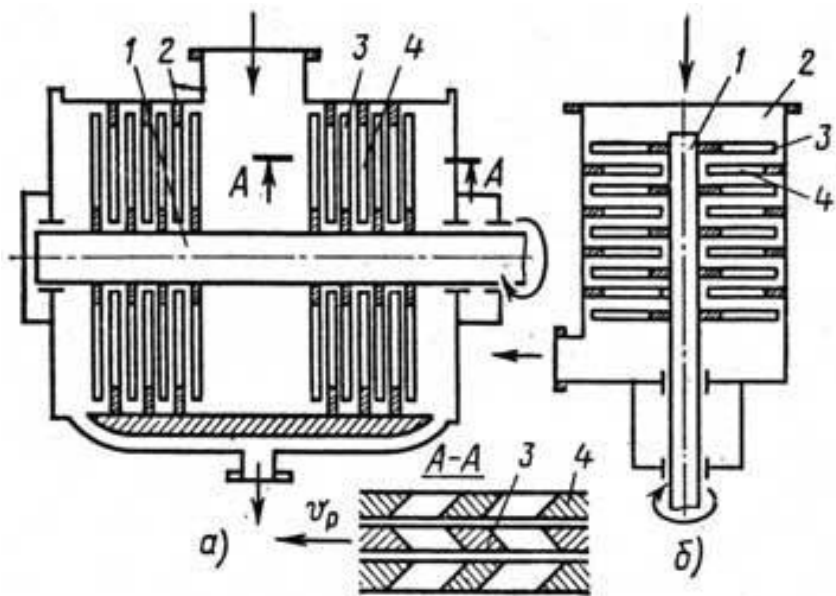


Схема форвакуумного насоса



Диффузионный насос



Турбомолекулярный насос

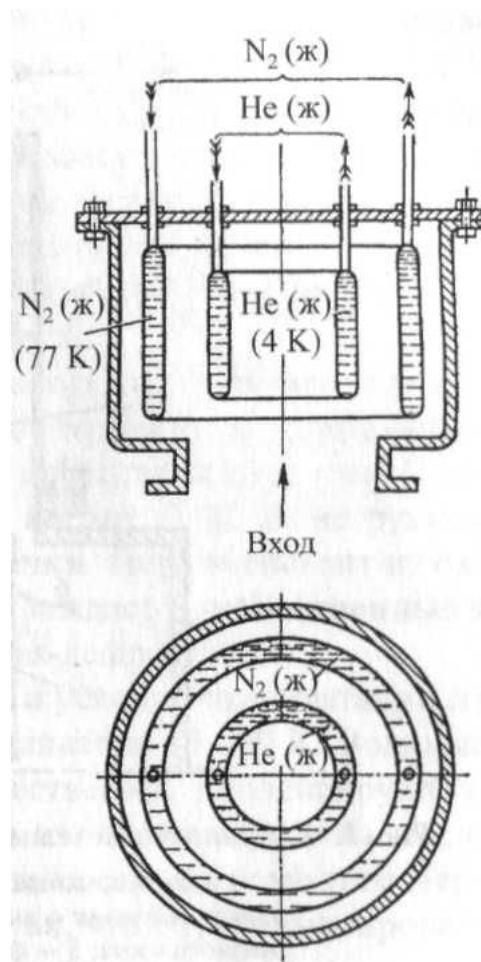
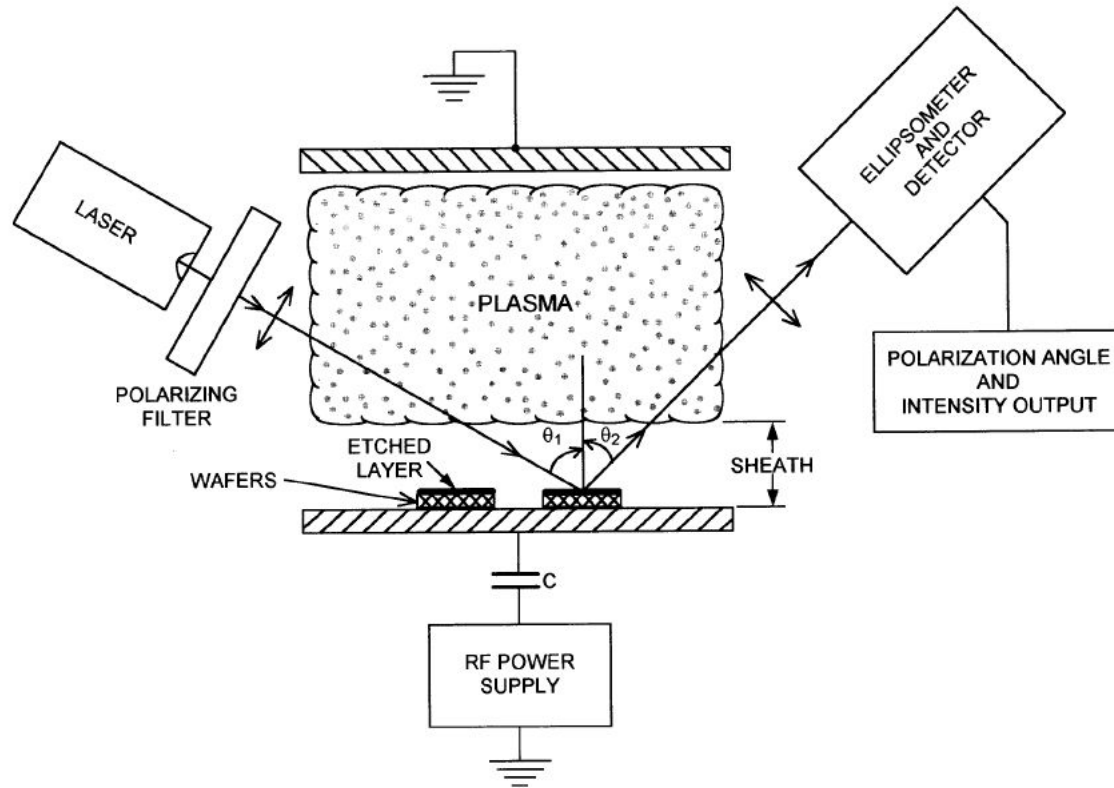


Схема криогенного насоса

IN SITU PROCESS MONITORING



A schematic drawing of an experimental arrangement for ellipsometry of the etched layer in an RF plasma reactor.

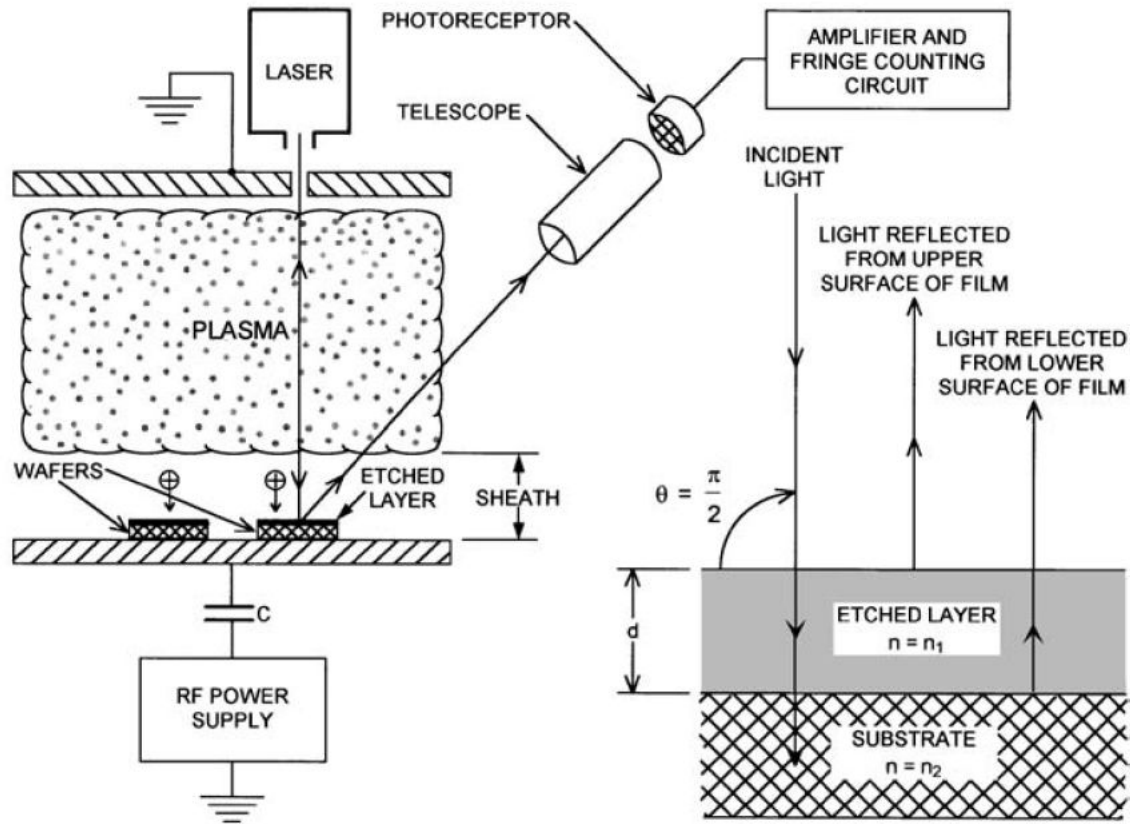
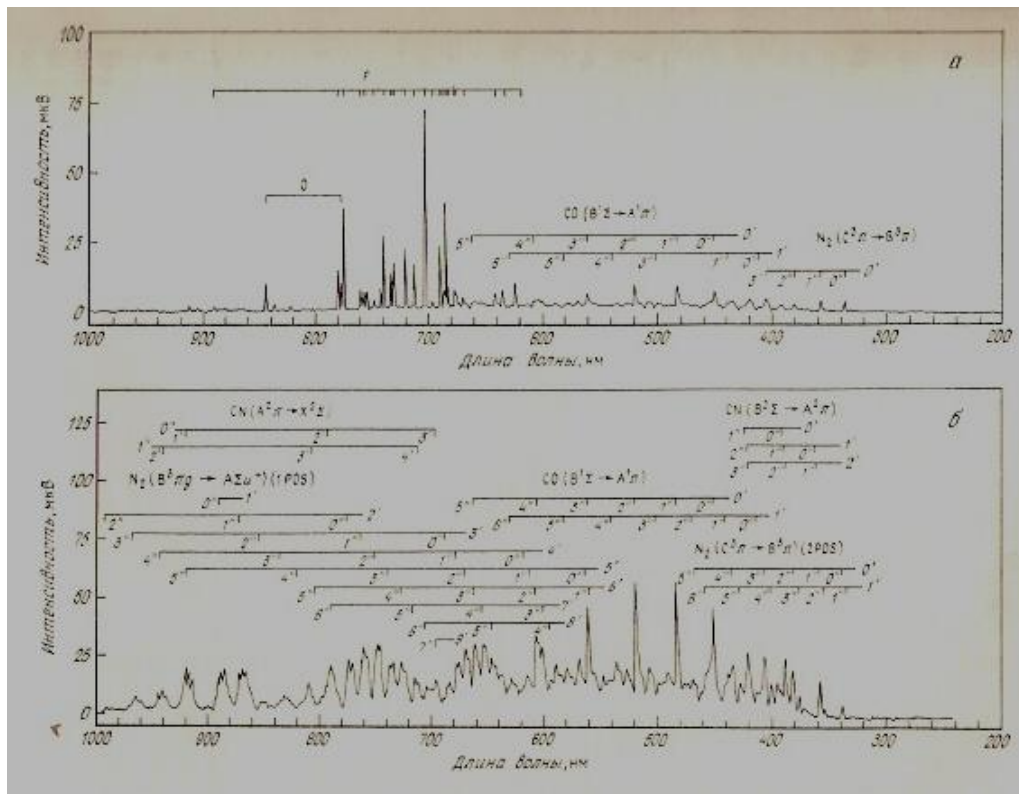
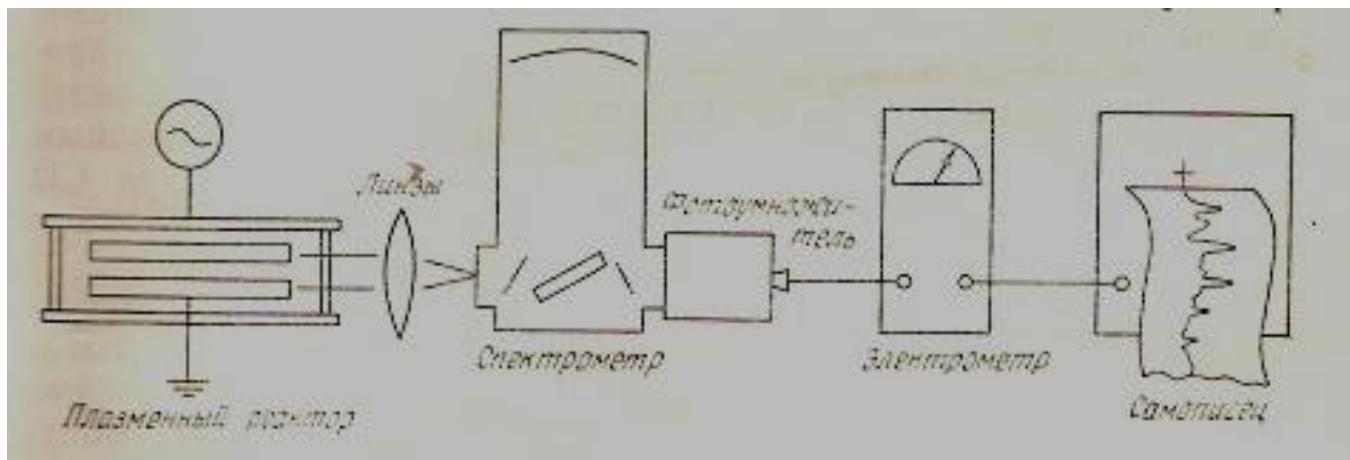
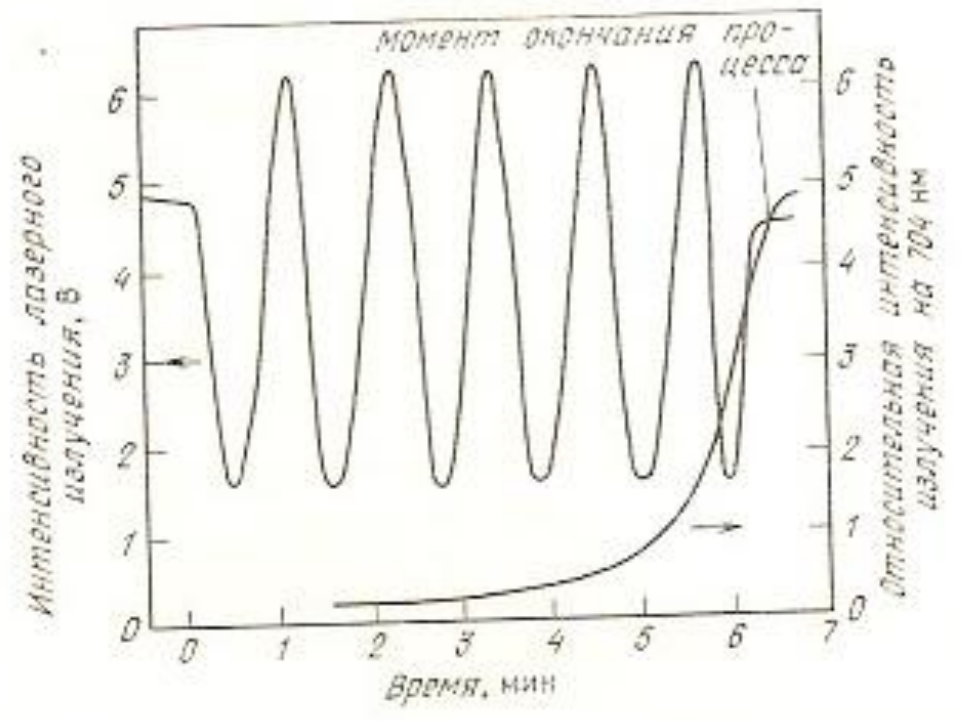
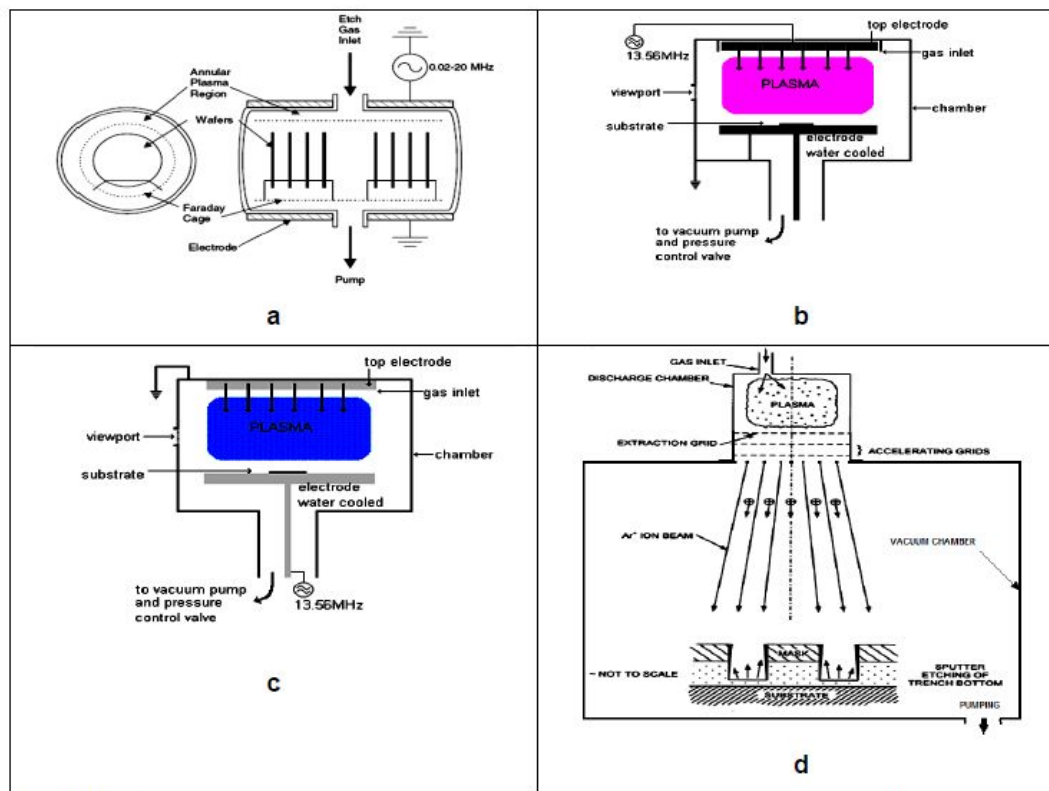


Fig. 1. An experimental arrangement for *in situ* measurement of the thickness of an etched layer.

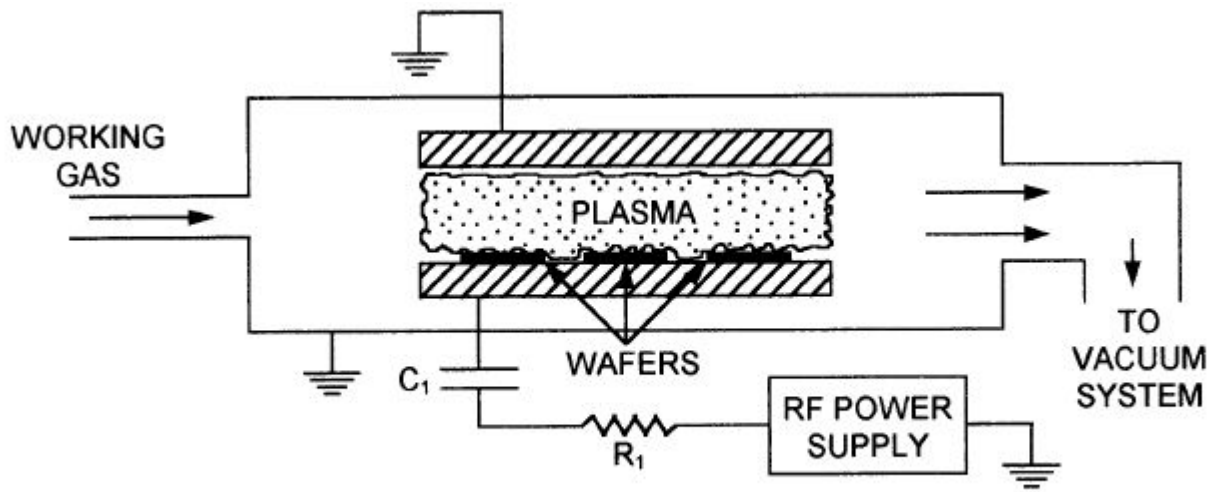


а – эмиссионный спектр ВЧ-разряда на смеси 92% CF_4 – 8% O_2 ; б – эмиссионный спектр разряда на смеси того же состава при травлении пленки нитрида кремния, осажженной в плазме

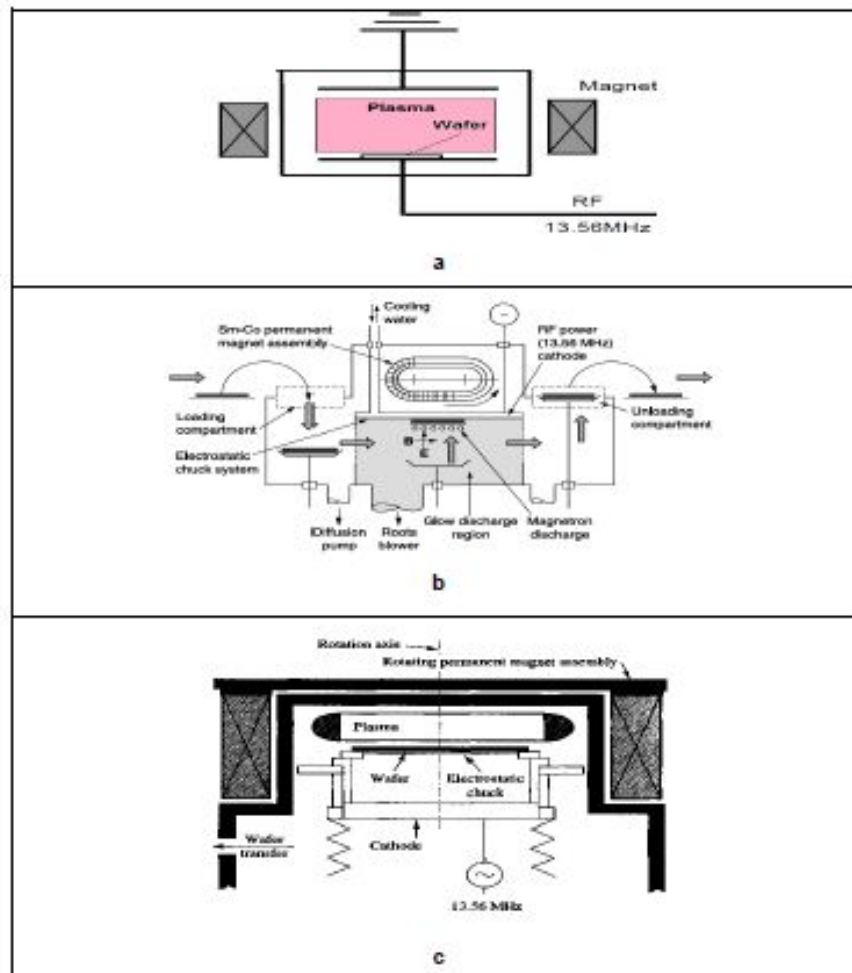




Основные системы размерного вакуумного газоплазменного травления функциональных слоев ИС первого поколения: а - цилиндрический реактор (barrel reactor) для группового плазменного травления (ПТ) пластин с возможностью установки внутри него металлического перфорированного экрана (Faraday cage) и реализации процесса радикального травления РТ); б - планарный плазменный реактор с плоскопараллельными электродами (plasma parallel plate reactor), характеризующийся расположением пластин на заземленном электроде; в - планарная система реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) с плоскопараллельными электродами (planar RIE system), характеризующаяся расположением пластин на ВЧ электроде; г - система ионно-лучевого травления (ИЛТ) с автономным ионным источником, пристыкованным к вакуумной камере (vacuum chamber)

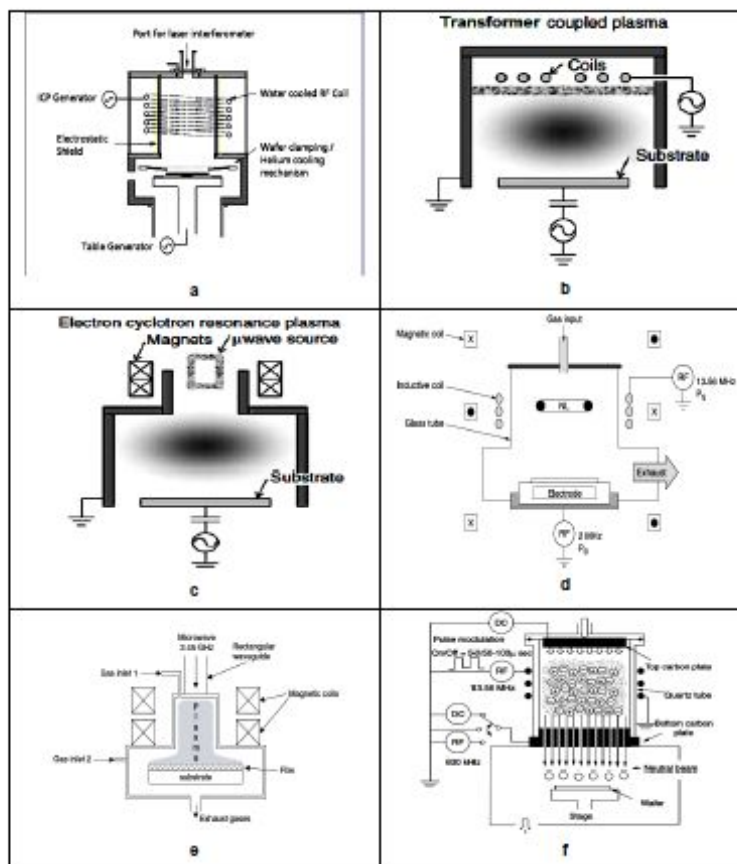


b) REACTIVE ION ETCHING CONFIGURATION

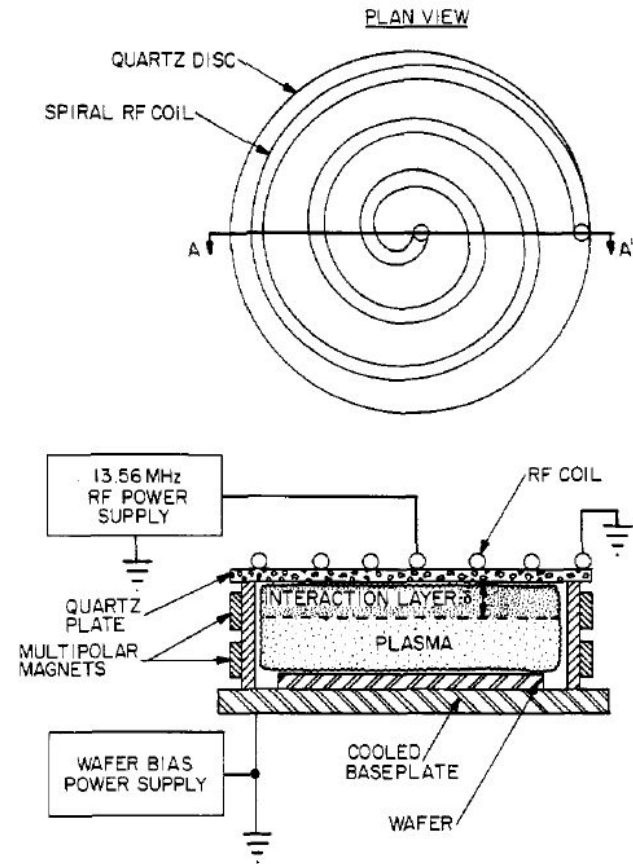


Handbook of Semiconductor Interconnection Technology. /Edited by G.C. Schwartz and K.V. Srikrishnan. 2-nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, N.Y., USA, 2006. - 506 p.

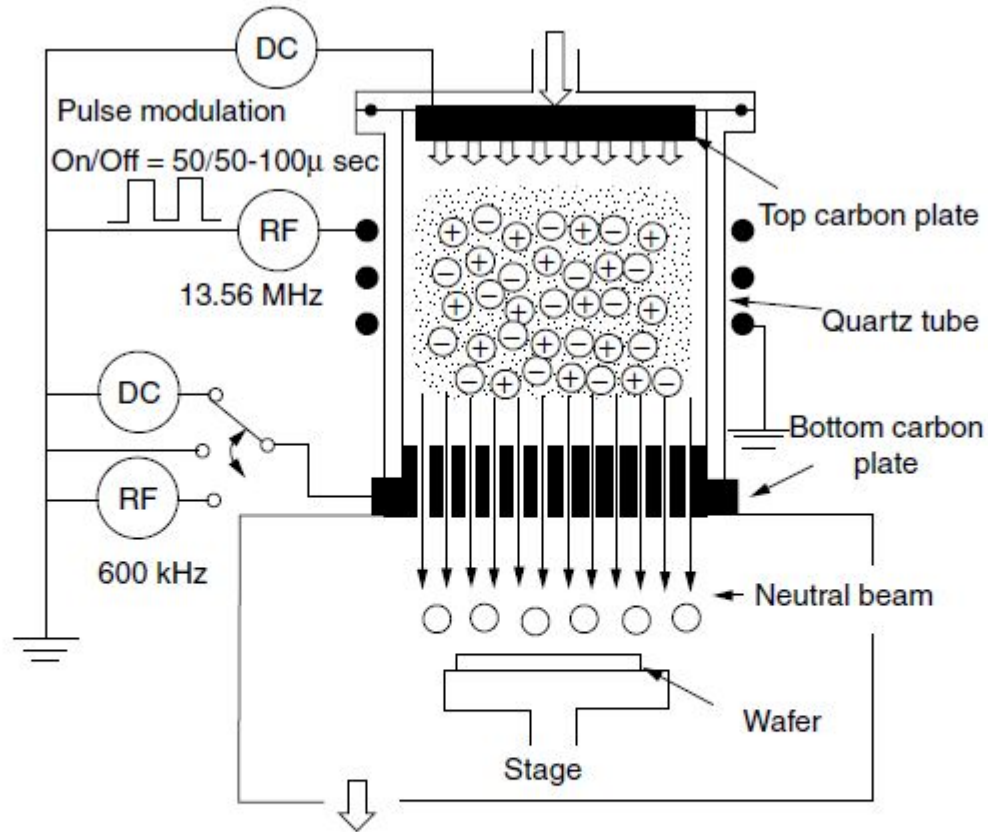
Основные системы размерного вакуумного газоплазменного травления функциональных слоев ИС второго поколения: **a** - планарная система магнитно-стимулированного реактивного ионно-плазменное травление (МС РИПТ) (*magnetically enhanced reactive ion etching - MERIE*) с вращающимся магнитным полем, создаваемым набором неподвижных электромагнитов (*magnet*); **b** - система магнетронного реактивного ионно-плазменное травление (МРИПТ) (*magnetron reactive ion etching - MRIE*); **c** - планарная система градиентного магнитно-стимулированного реактивного ионно-плазменное травление (ГМС РИПТ) (*dipole rotating magnet system - DRM system*) с вращающейся системой из постоянных магнитов (*rotating permanent magnet assembly*)



Основные системы размерного вакуумного газоплазменного травления функциональных слоев ИС третьего поколения: **a** - система с индукционно-связанной плазмой (*inductive coupled plasma – ICP*) высокой плотности, реализующая различные процессы вакуумного газоплазменного травления; **b** - система с трансформаторно-связанной плазмой (*transformer coupled plasma – TCP*) высокой плотности, реализующая различные процессы вакуумного газоплазменного травления; **c** - система с плазмой высокой плотности на основе сверхвысокочастотного (СВЧ) или микроволнового разряда на электронном циклотронном резонансе (ЭЦР) (*electron cyclotron resonance - ECR*), реализующая различные процессы вакуумного газоплазменного травления; **d** - система с индукционно-связанной плазмой (*inductive coupled plasma – ICP*) высокой плотности с нейтральным контуром (*neutral loop discharge – NL discharge*), реализующая различные процессы вакуумного газоплазменного травления; **e** - система высокого (больше 100 Па) давления с плазмой высокой плотности на основе СВЧ разряда на ЭЦР, реализующая различные процессы вакуумной газоплазменной обработки и удаления резистов; **f** - система травления пучком нейтральных атомов, реализующая процессы атомно-лучевого травления и атомно-стимулирующего газового и радикального травления

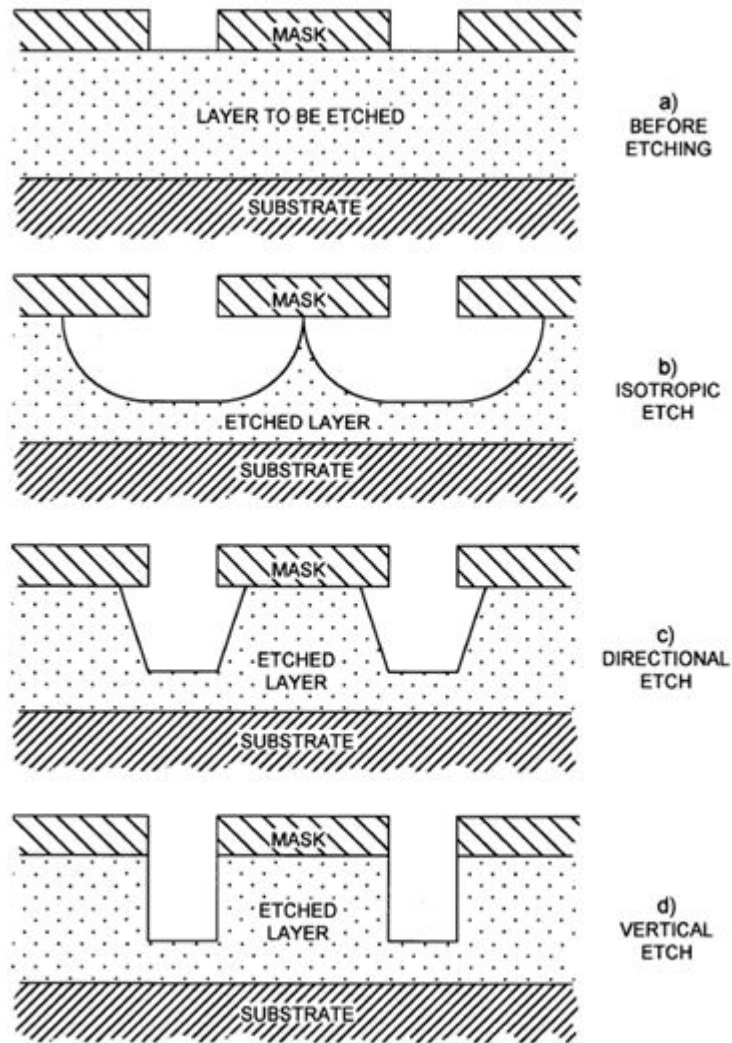


Schematic of an inductive parallel plate reactor. Top: plan view showing flat spiral RF coil on top surface of the reactor. Bottom: elevation through section AA' showing cross-section of inductive parallel plate reactor.



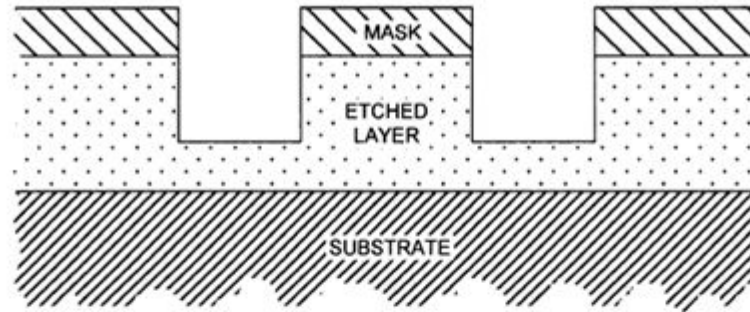
Schematic diagram of an experimental neutral beam etch chamber. (Reprinted from Noda, S., Nishimori, H., Ida, T., Arikado, T., Ichiki, K., Ozaki, T., and Samukawa, S., *J. Vac. Sci. Technol. A*, 22, 1507, 2004. With permission. Copyright 2004, American Institute of Physics.)

PATTERN TRANSFER BY PLASMA-RELATED ETCHING

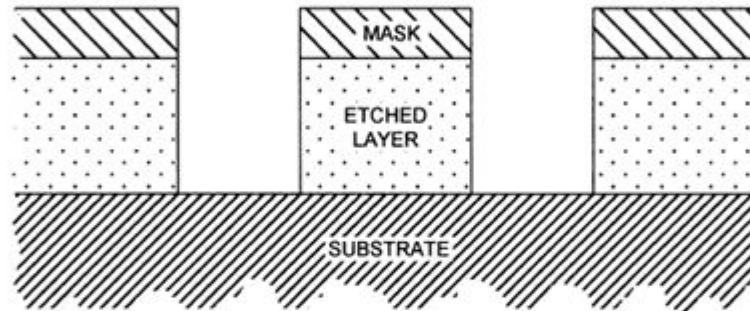


Various degrees of etching directionality: (a) an unetched layer; (b) result of an isotropic etch; (c) result of a directional etch; and (d) result of a vertical etch.

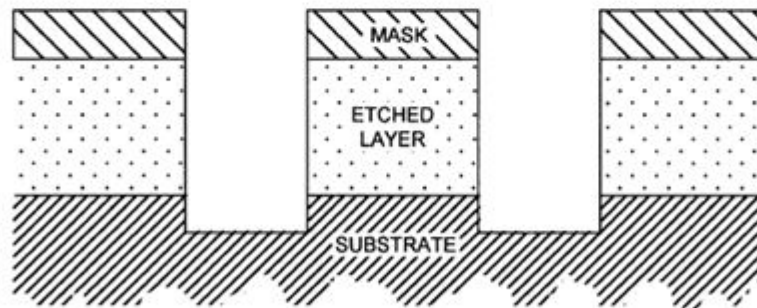
PATTERN TRANSFER BY PLASMA-RELATED ETCHING



a) INCOMPLETE ETCH



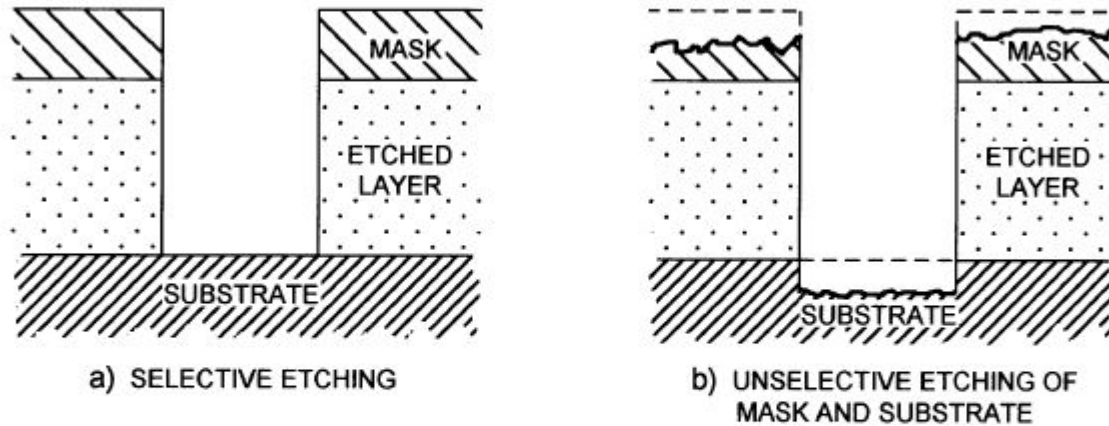
b) COMPLETED ETCH



c) OVERETCH, WITH FINITE SELECTIVITY

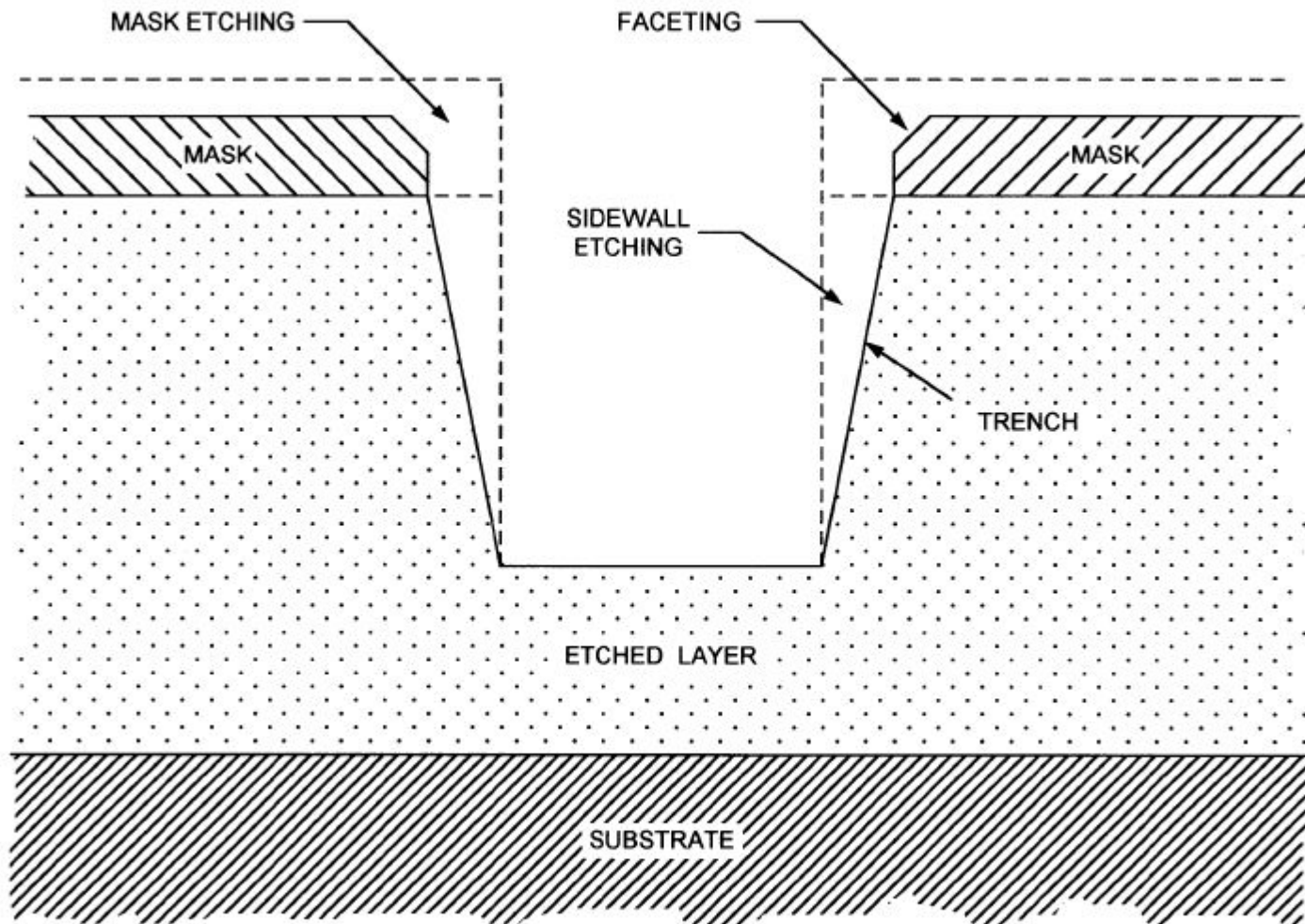
Relative completion of the etching process: (a) an incomplete etch; (b) a completed etch; and (c) an over-etched trench with finite selectivity.

PLASMA ETCHING

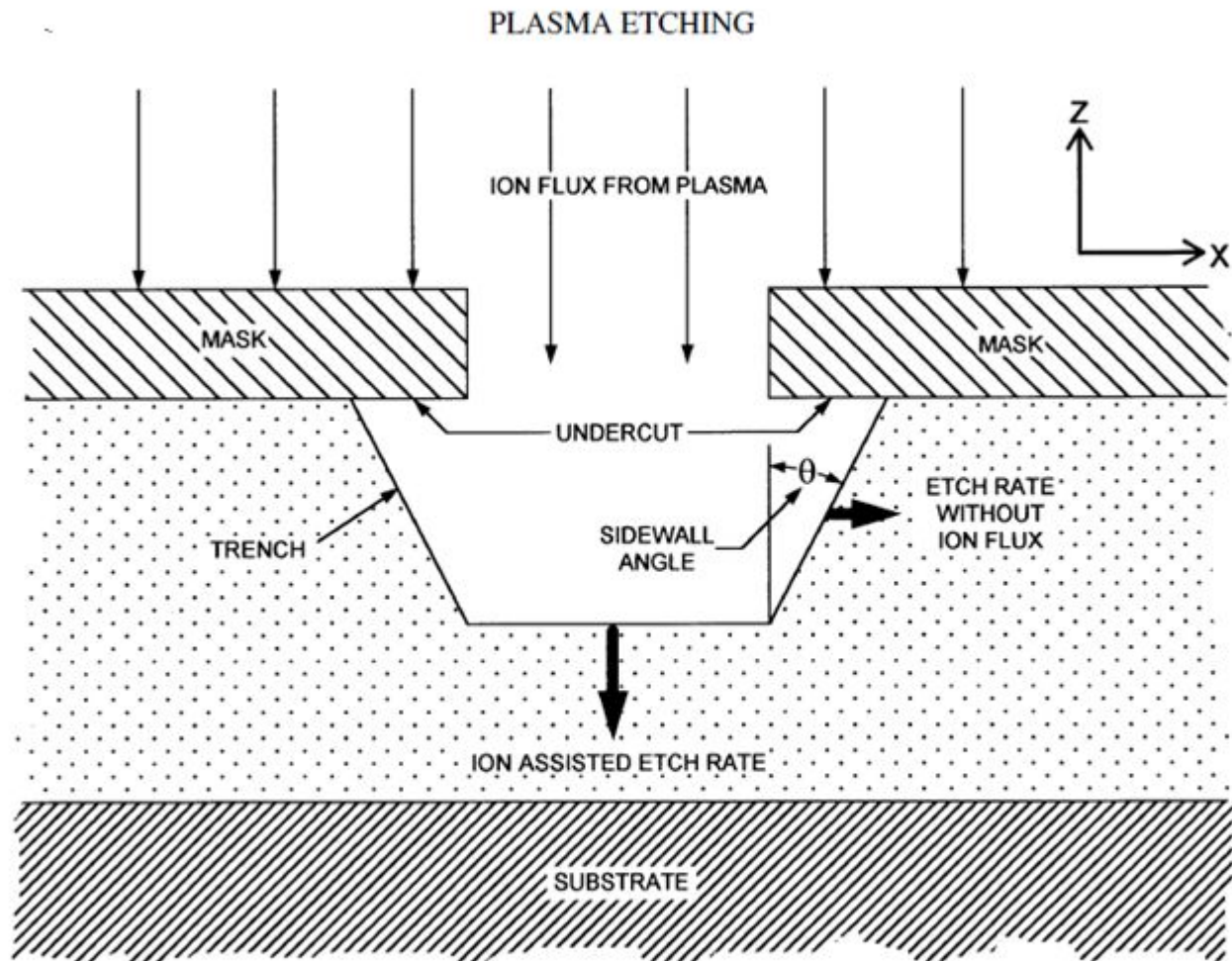


Relative selectivity of an etching process: (a) selective etching; (b) unselective etching of mask and substrate.

PATTERN TRANSFER BY PLASMA-RELATED ETCHING



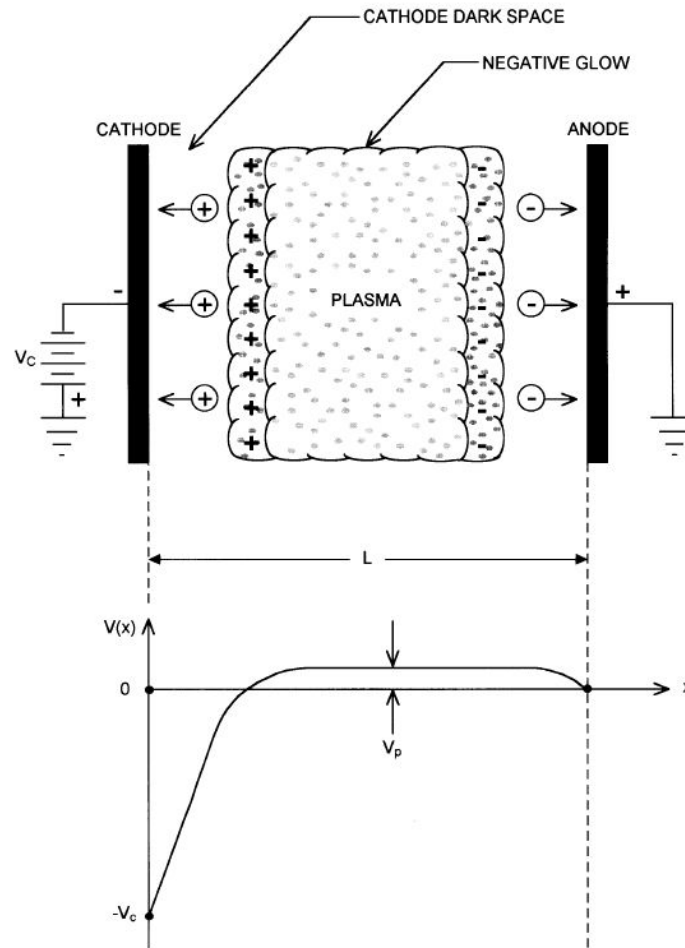
Consequences of unselective mask erosion.



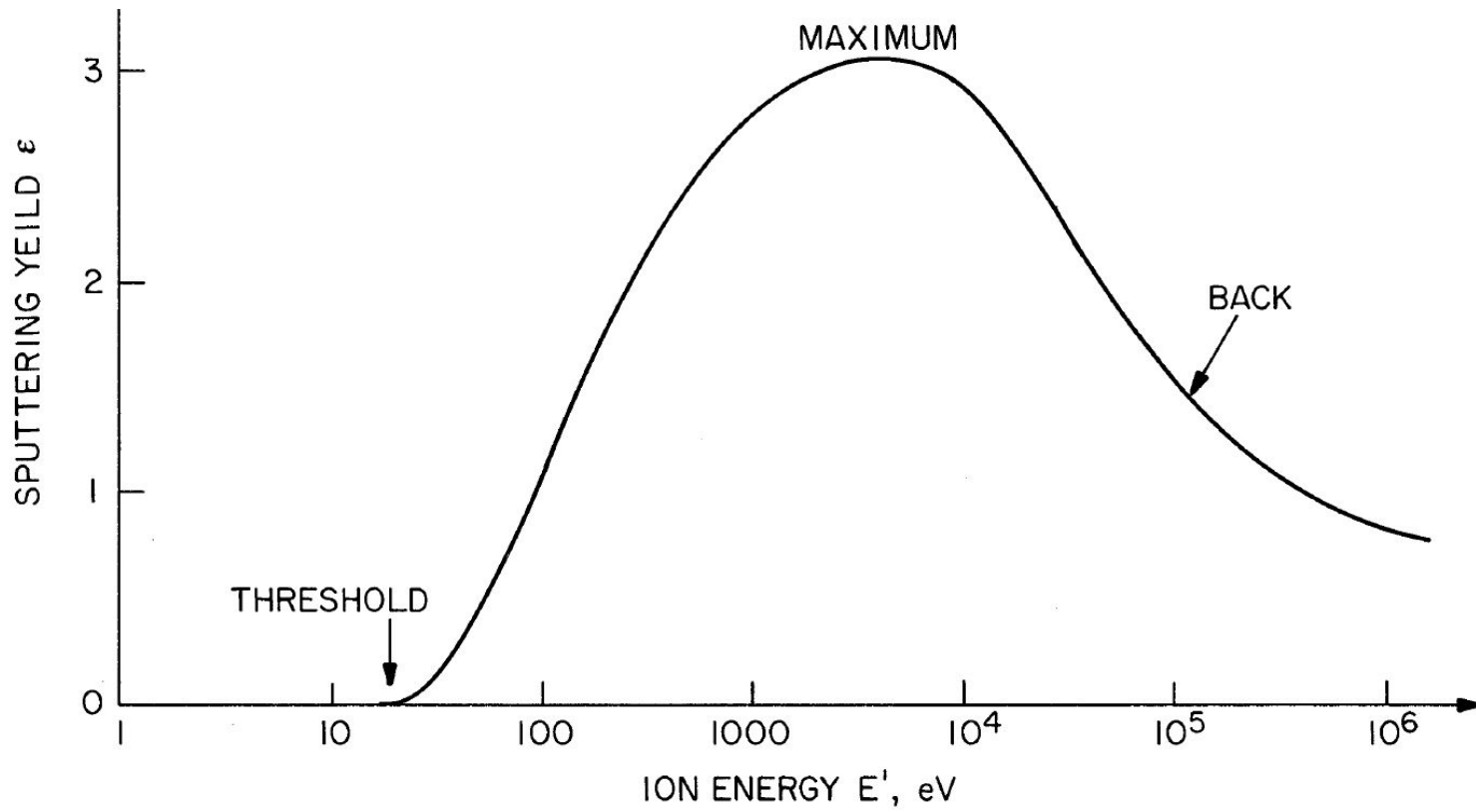
A directional etch with a finite undercutting rate producing sidewalls of half-angle θ .

Для большинства применений плазменных процессов в микро- и нанoeлектронике важно знать как распределено падение потенциала в приэлектродном промежутке. Это падение потенциала будет во многом определять интенсивность распыления материала, влияние ИБ на характер и интенсивность химических взаимодействий на обрабатываемой поверхности, а также уровень привносимых радиационных нарушений структуры материала

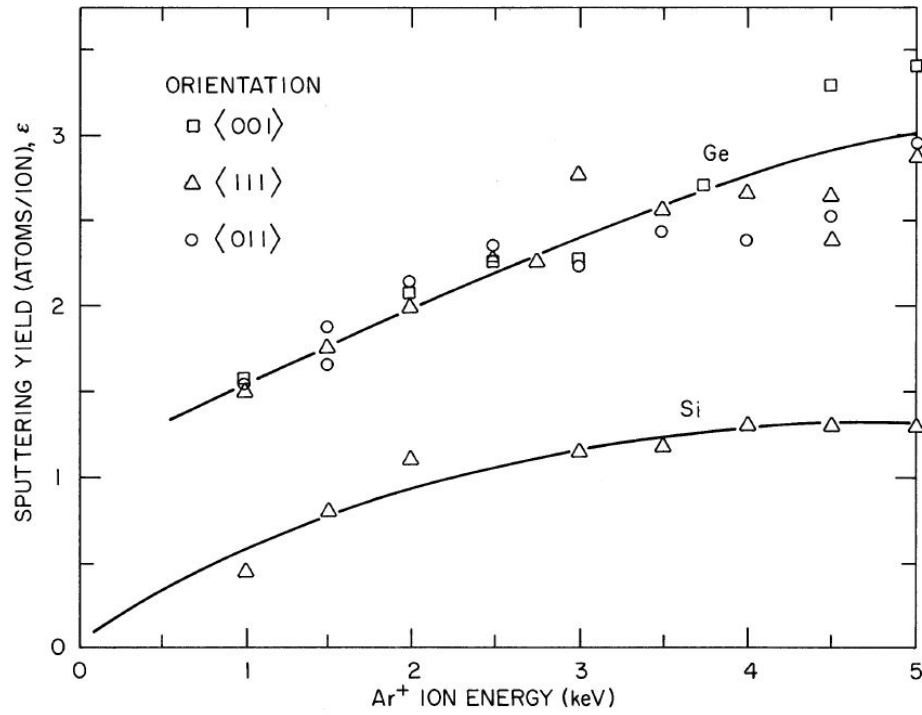
VACUUM PLASMA SOURCES



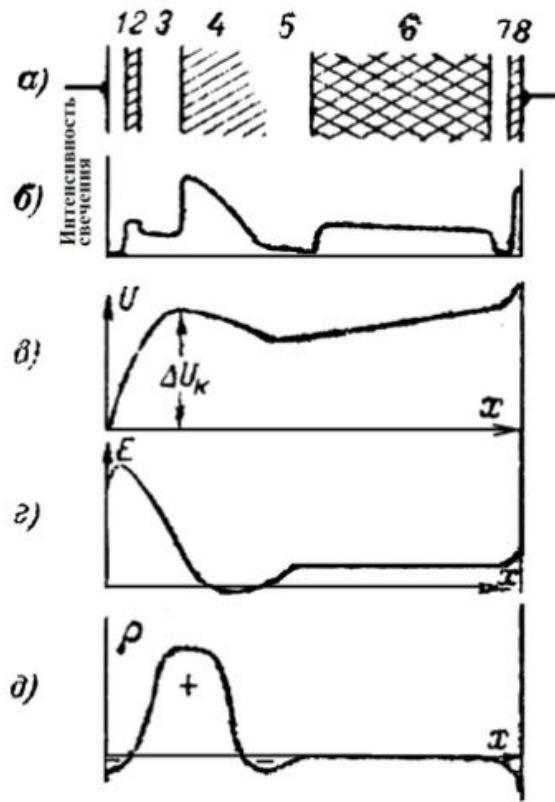
The DC obstructed abnormal glow discharge plasma source, with the approximate potential distribution.



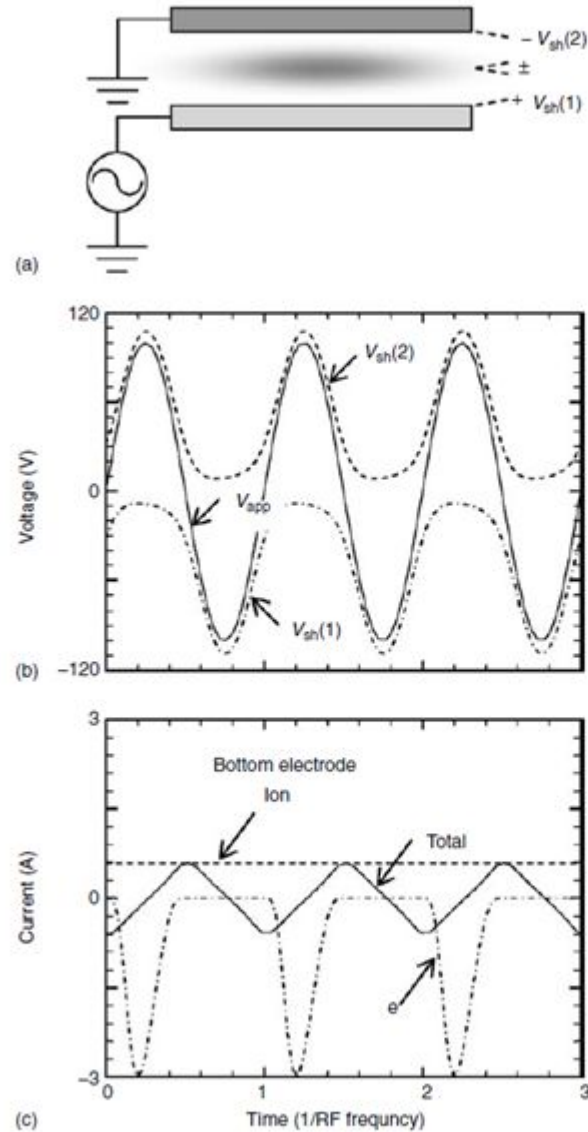
Schematic diagram of a sputtering yield curve as a function of ion energy.



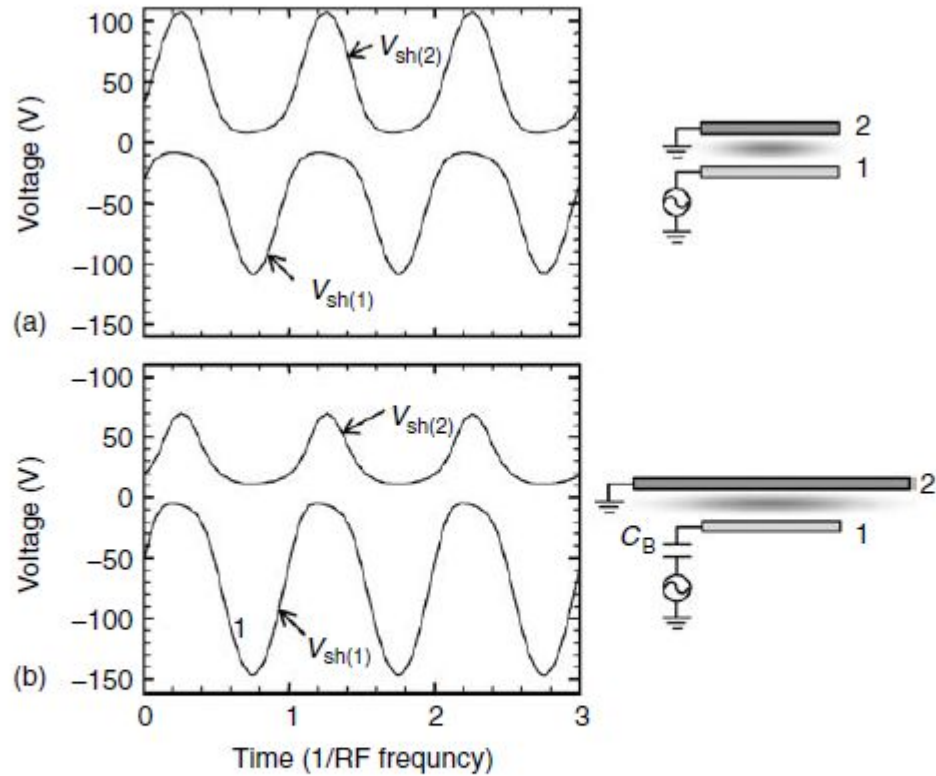
The sputtering yield ϵ as a function of energy for argon ions impacting various lattice planes of silicon and germanium



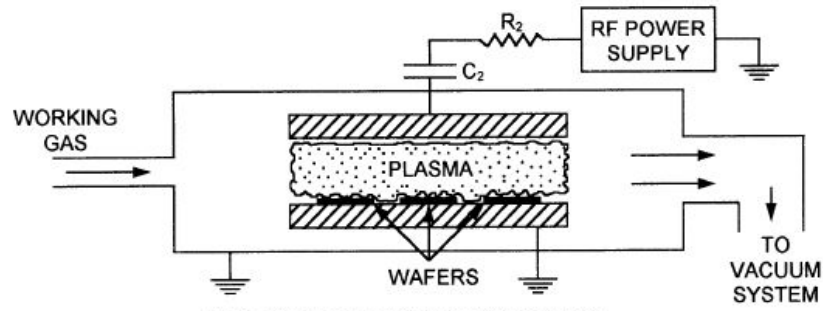
- 1) первая катодная темная область;
- 2) первое катодное свечение;
- 3) вторая катодная темная область;
- 4) второе катодное свечение (катодное тлеющее свечение);
- 5) фарадеева темная область;
- 6) столб разряда;
- 7) анодная темная область;
- 8) анодное свечение.



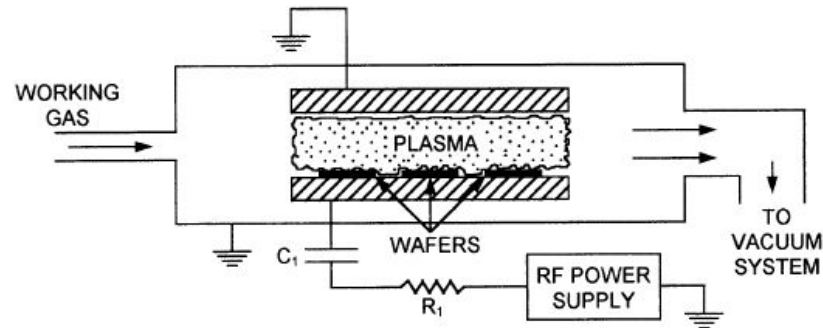
Sheath voltage and current in a parallel plate plasma reactor: (a) the parallel plate reactor, (b) applied and sheath voltages, and (c) ion, electron, and total current at bottom electrode.



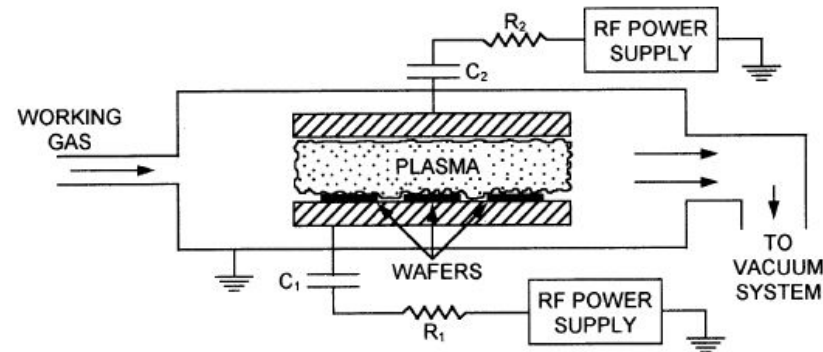
Sheath voltages in a parallel plate plasma reactor: (a) equal electrode areas and (b) unequal electrode areas with blocking capacitor.



a) PLASMA ETCHING CONFIGURATION

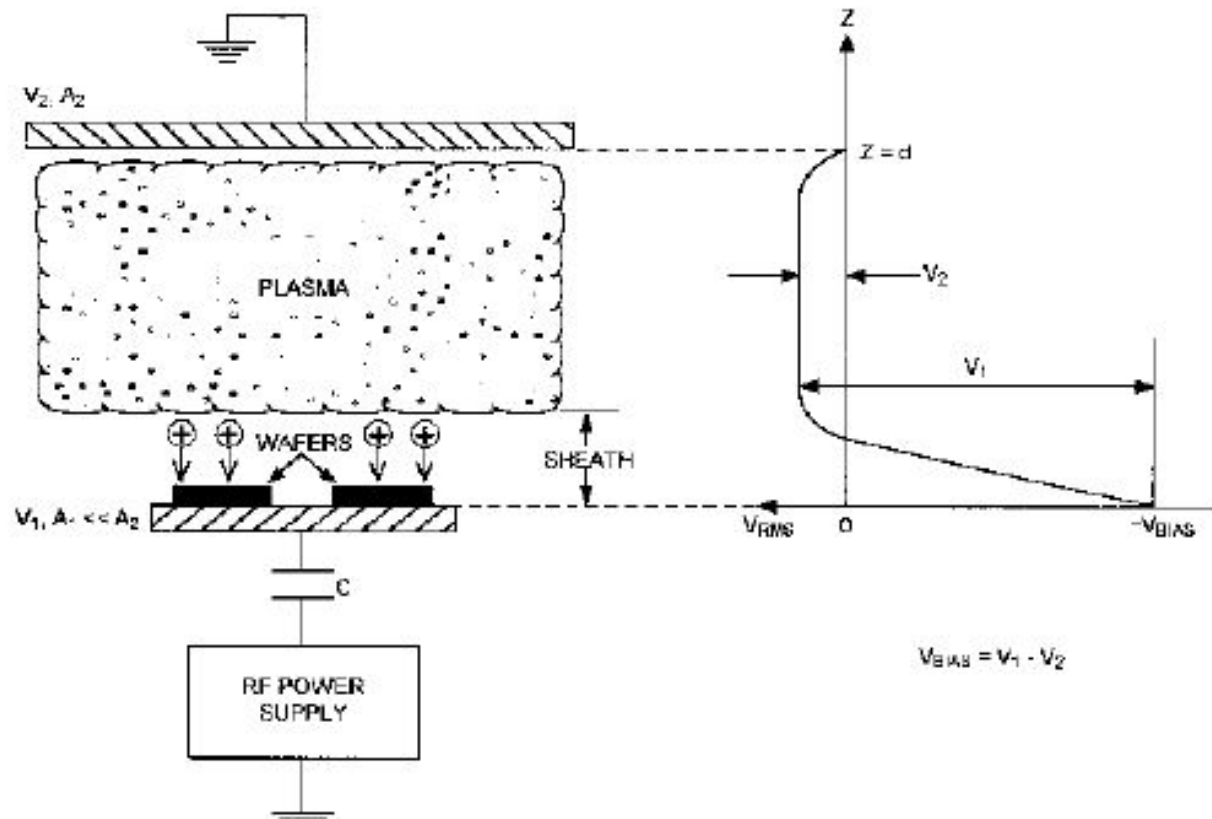


b) REACTIVE ION ETCHING CONFIGURATION



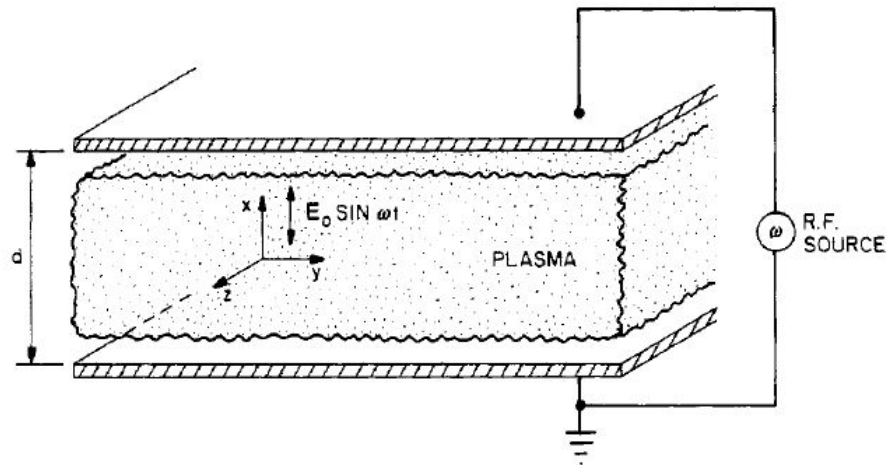
c) TRIODE ETCHING CONFIGURATION

Configurations of the RF parallel-plate plasma source: (a) the plasma etching configuration; (b) the reactive ion etching (RIE) configuration; and (c) the triode configuration.



$$V_1 = V_2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^q \quad \text{V} \quad 1 \leq q \leq 2.5.$$

Схема РИТ



The generation of an RF plasma in an unmagnetized, parallel plate plasma reactor with plate separation d and driving frequency ω .

Основные факторы при травлении в плазме элементов с малыми размерами и высоким аспектным соотношением:

зарядка диэлектрических поверхностей (например, фоторезист или диэлектрическая маска) – приводит к **искажению профиля травления**.

эффект зарядового аспектного соотношения (разница в заряде верхней и нижней частей структуры) или электронного затенения.

Проблемы: протекание тока через тонкие изолирующие слои может вызывать **пробой диэлектрика и повреждение устройства**, может наблюдаться **подтрав поликремния** во время перетрава затворного электрода; **сдвиг пороговых напряжений** при травлении затворов; потери ионного тока внизу щели при травлении через диэлектрическую маску – наблюдается **искажение профиля, не контролируемое пленкообразование внутри структуры**.

эффект аспектного отношения, известный как «Замедление РИТ» (структуры с большими размерами **травятся более быстро**, чем структуры с малыми размерами).

Четыре основных механизма снижения анизотропии и задержки РИТ

Ионное затенение.

Рассеивание и зарядовый обмен в ОПЗ делает **поступающие ионы изотропными**.

Затенение нейтралами

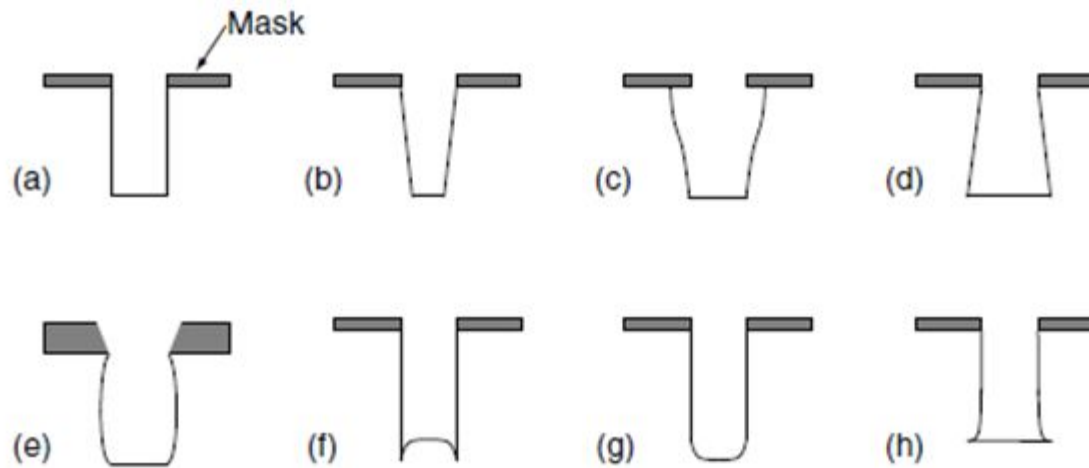
Столкновения, как с другими частицами, так и с боковыми стенками структуры, **замедляет поток химически активных нейтралов** (например, F) внутрь структуры. Доступ нейтральных частиц к нижней части структуры, необходимый для удаления полимера и формирования летучих продуктов травления, затрудняется.

Накопление заряда

Электроны, из-за их высокого коэффициента диффузии и более длинной средней длины свободного пробега, имеют тенденцию, преимущественно заряжать верхние части травимой структуры и области фоторезиста. Как результат, **ионы отклоняются к боковым стенкам**, что может приводить к их травлению.

Транспортировка нейтральных продуктов

Обратный поток продуктов травления со дна структуры может сталкиваться с входящими частицами и переосаждаться на дне структуры, значительно **увеличивая высадку полимера**.



Feature profiles in an etch process: (a) vertical sidewalls and bottom surface, (b) tapered sidewalls, (c) under-cutting, (d) reentrant profile, (e) bowing, (f) micro-trenching, (g) curved bottom surface, and (h) notching.

a- «идеальный» профиль, **b** - осаждение полимера на боковые стенки формируемой структуры, **c** - проявляется химическая составляющая интегрального процесса травления, **d** - защищающие боковые стенки полимерные пленки сформированы нейтральными частицами с большой адгезионной способностью с недостатком их в донной части, **e** - окна маски имеют наклон + избыточное содержание в газовой смеси кислорода, который снижает вероятность образования защитной пленки на боковых стенках структуры и повышает концентрацию в газовой фазе разряда химически активных травящих частиц, **f** - переотраженионного потока от боковых стенок формируемой структуры и перенаправлении этого потока в углы донной части + локальная неоднородность потока пассивирующих частиц в донной части создаваемой структуры, **g** - травление проходит в режиме малой концентрации химически активных нейтральных частиц, что приводит к замедлению скорости травления в углах донной части структуры, **h** - заряд на поверхности не может быть удален во внешнюю электрическую цепь или нейтрализован.

На рисунке а) показан профиль травления, который во многих случаях можно считать «идеальным». В этом случае получены вертикальные стенки создаваемой структуры и плоское дно. В силу того, что в реальности во время травления результат процесса определяется комбинацией химического взаимодействия частиц плазмы с обрабатываемой поверхностью, ионно-стимулированных взаимодействий, включая ионно-стимулированные химические реакции и физическое распыление, а также процессов осаждения нелетучих продуктов (пленок) и пассивации поверхности, то такой профиль наблюдается достаточно редко. Понимание причин, вызывающих появление несовершенств профиля, которые могут проявляться во время травления, а также то, как они могут быть устранены являются весьма важными для разработчиков технологий плазменного травления. Существуют две основные причины появления нарушений формы профиля: индивидуальные особенности обрабатываемой поверхности и процессы, связанные с переотражением потоков заряженных и нейтральных частиц от стенок формируемой структуры.

На рисунке б) показан случай, когда режим плазменной обработки обеспечивает осаждение полимера на боковые стенки формируемой структуры. Это приводит к снижению скорости травления в углах донной части и наблюдается сужение формируемого профиля. Соответственно образуется «конусообразный» профиль. В ряде случаев такой профиль оказывается с технологической точки зрения более предпочтительный по сравнению с идеально прямоугольным, поскольку позволяет конформно осаждавать на поверхность структуры пленки последующих слоев УБИС. Однако, если процесс полимеризации при травлении протекает слишком интенсивно, травление структуры может остановиться и наблюдается эффект «остановки травления». (см. фото на следующем слайде.).

На рисунке в) показан случай, когда наблюдается избыточно интенсивное травление боковых стенок структуры (интенсивно проявляется химическая составляющая интегрального процесса травления), когда процессы пассивации боковых стенок слабы. Подтрав увеличивает ширину формируемого «окна» и уменьшает промежуток материала слоя между соседними «окнами» (структурами).

Если защищающие боковые стенки полимерные пленки сформированы нейтральными частицами с большой адгезионной способностью, то при травлении структур с высоким аспектным отношением, концентрация этих частиц вблизи дна структуры в процессе травления будет уменьшаться и начнется подтрав стенок вблизи дна.

На рисунке д) показан соответствующий профиль травления с отрицательным углом наклона боковых стенок.

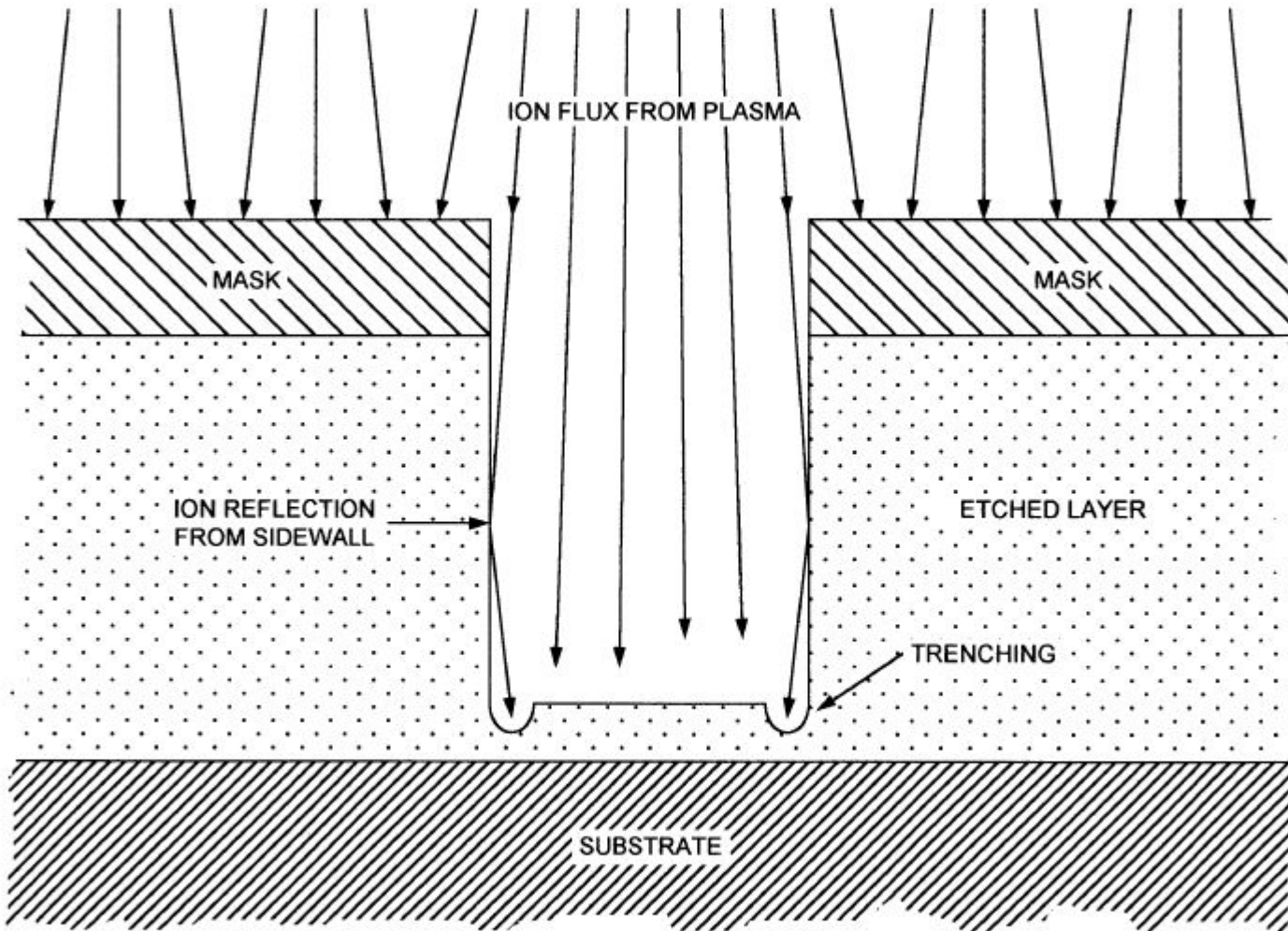
На рисунке е) показан профиль, который формируется, если боковые стенки профиля окна маски имеют наклон. В этом случае ионный поток, отражается от этих стенок и распыляет пассивирующую пленку на боковых стенках формируемой структуры. Это увеличивает вероятность химического взаимодействия частиц плазмы с материалом травимого слоя, что приводит к появлению бочкообразного профиля травления. К появлению данной формы профиля также может способствовать избыточное содержание в газовой смеси кислорода, который снижает вероятность образования защитной пленки на боковых стенках структуры и повышает концентрацию в газовой фазе разряда химически активных травящих частиц. (Например фтора при травлении слоев поликристаллического кремния во фторсодержащей плазме).

На рисунке f) показан профиль, который может образоваться при переотражении ионного потока от боковых стенок формируемой структуры и перенаправлении этого потока в углы донной части. Это приводит к интенсификации процесса травления в этих областях, что создает микроканавки в донной части. Данный профиль может наблюдаться также из-за локальной неоднородности потока пассивирующих частиц в донной части создаваемой структуры.

На рисунке g) показан случай, когда травление проходит в режиме малой концентрации химически активных нейтральных частиц, что приводит к замедлению скорости травления в углах донной части структуры и появлению эффекта закругления дна.

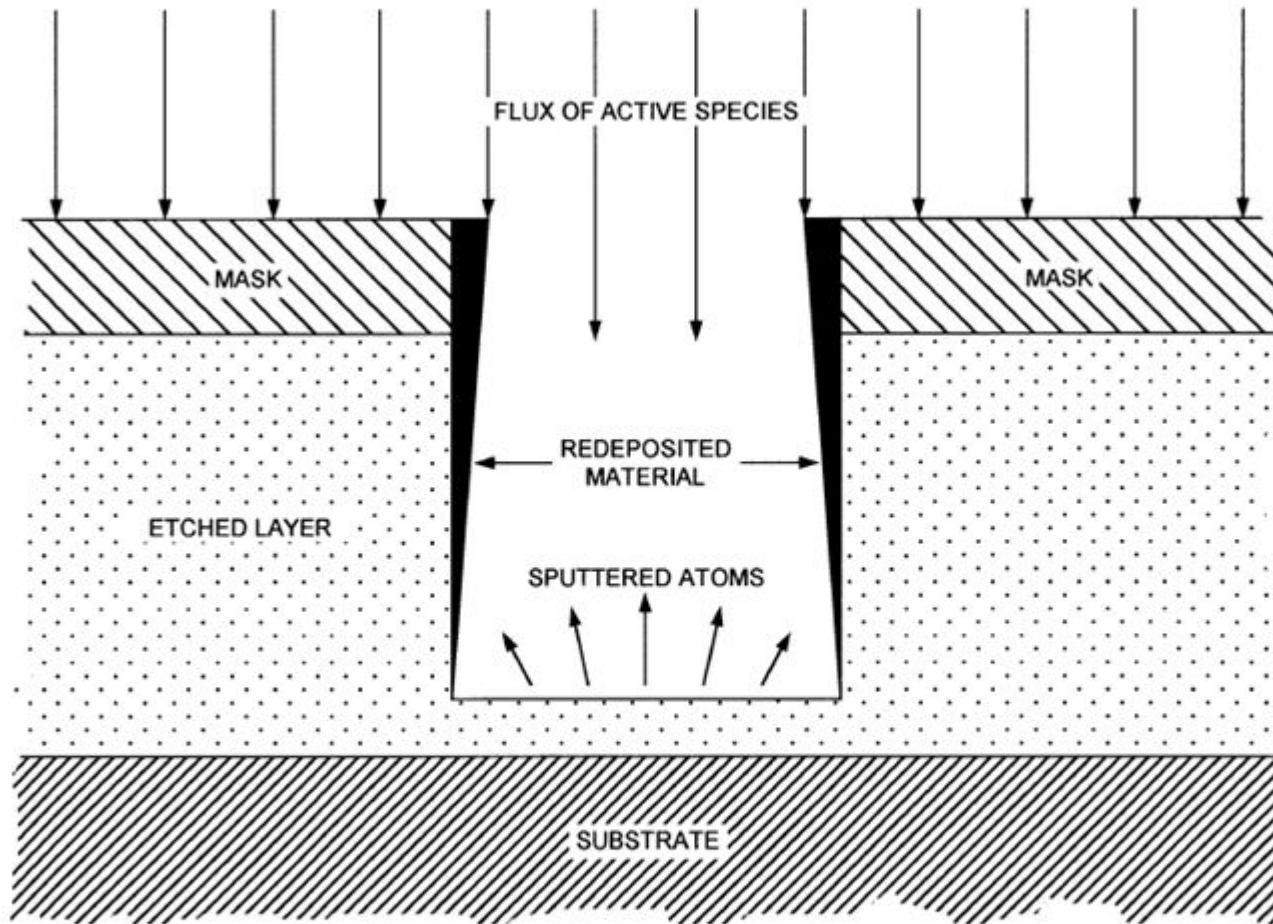
В силу своей природы плазма содержит заряженные частицы – положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные электроны. Эти заряженные частицы приходя на обрабатываемую поверхность могут приводить к появлению больших электрических полей, что наблюдается в случаях когда заряд на поверхности не может быть удален во внешнюю электрическую цепь или нейтрализован. Возникающие электрические поля могут приводить к искажению параметров формируемых в плазме структур. Например будет происходить искажение траекторий ионного потока внутри наноструктур. Это приводит к локальному вытравливанию участков профиля. Классическим примером данного эффекта является случай формирования **поликремниевых затворов**, когда **поликремний** полностью удален и на поверхности нижележащего слоя окисла происходит накапливание заряда, который не может быть нейтрализован. Появляющееся электрическое поле искажает траекторию ионного потока и возникает эффект «подрубания» в донной части структуры. Этот случай изображен **на рисунке h)** предыдущего слайда.

PATTERN TRANSFER BY PLASMA-RELATED ETCHING



Trenching, resulting from a small ion velocity component parallel to the surface of the wafer.

PLASMA ETCHING



An example of etching with a buildup of re-deposited material, which may be either a non-volatile reaction product or sputtered material from the bottom of the trench.

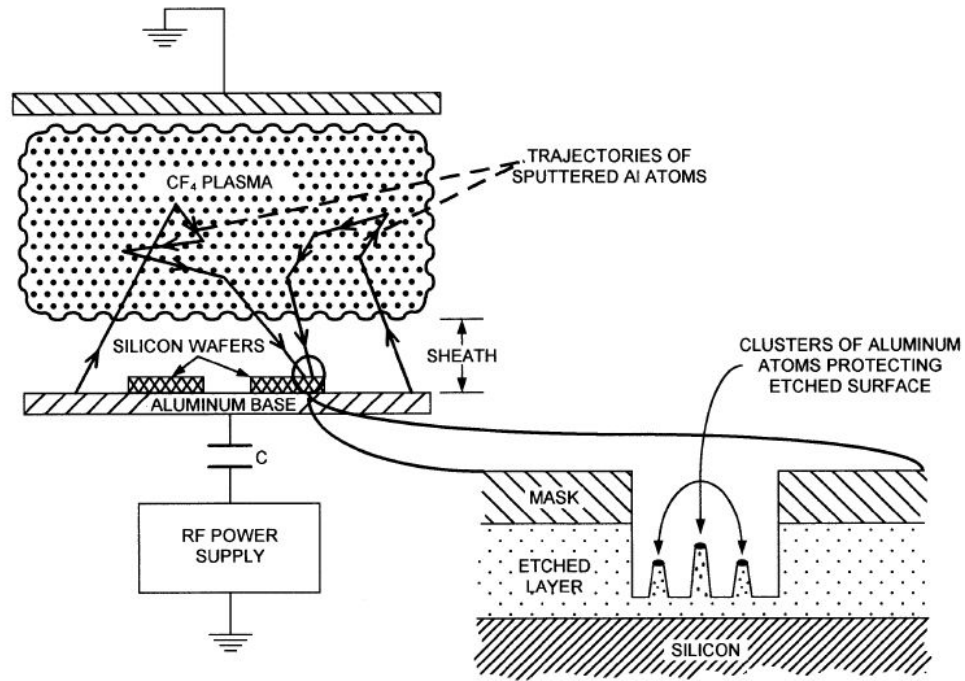
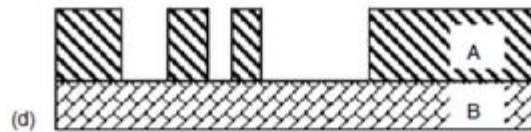
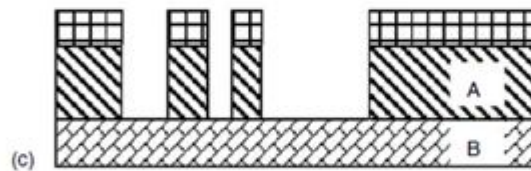
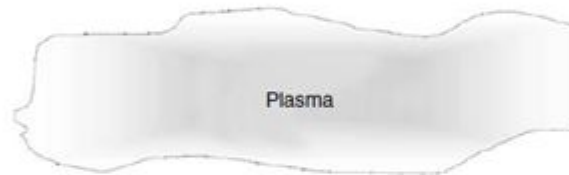
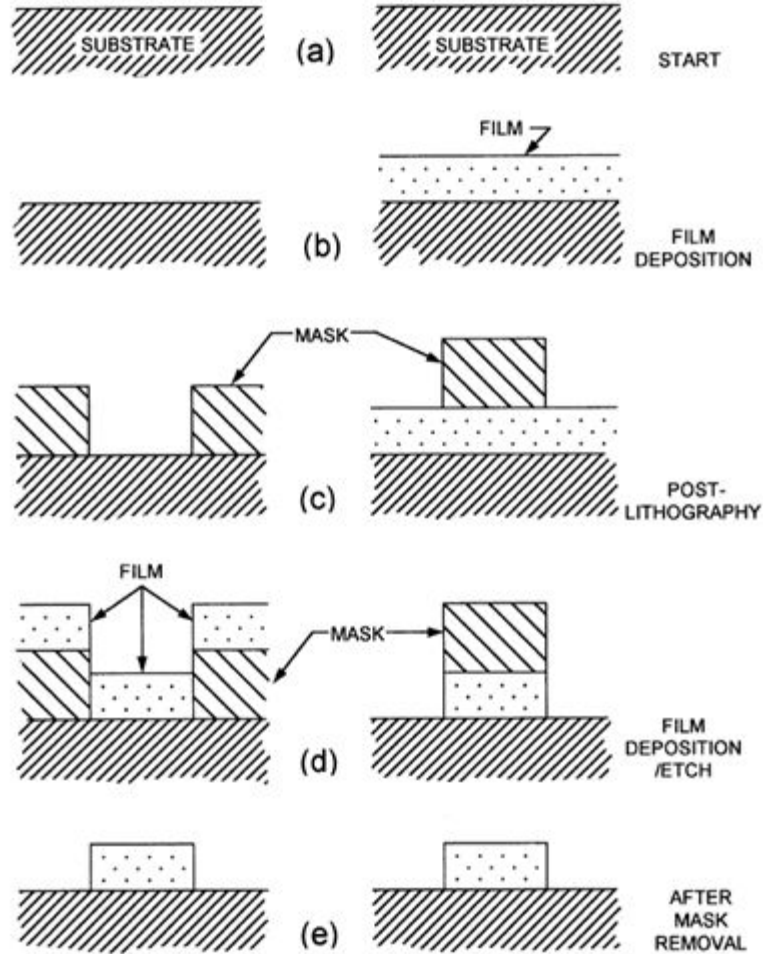
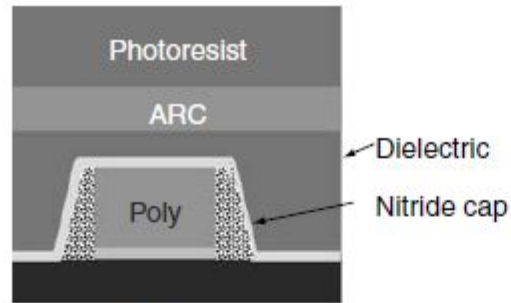


Illustration of sputtered aluminum atoms or clusters that can deposit on the surface of an etched layer to produce spikes and surface roughness.

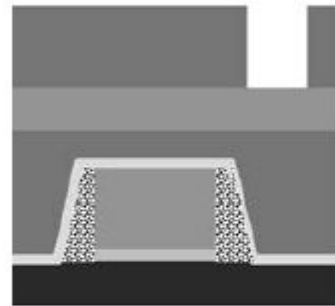


Steps involved in a typical patterning process: (a) film stack deposition, (b) photoresist deposition, imaging and development, (c) plasma etching, and (d) photoresist removal.

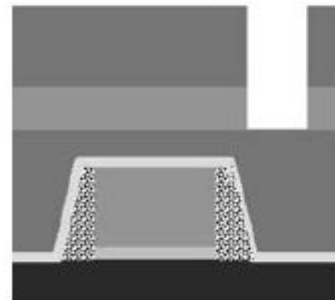




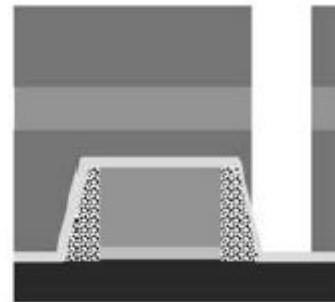
1. Develop



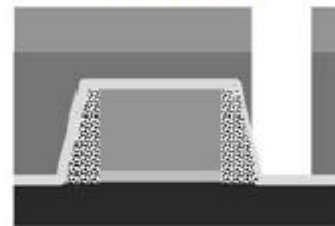
2. ARC Open



3. Dielectric etch + Clean



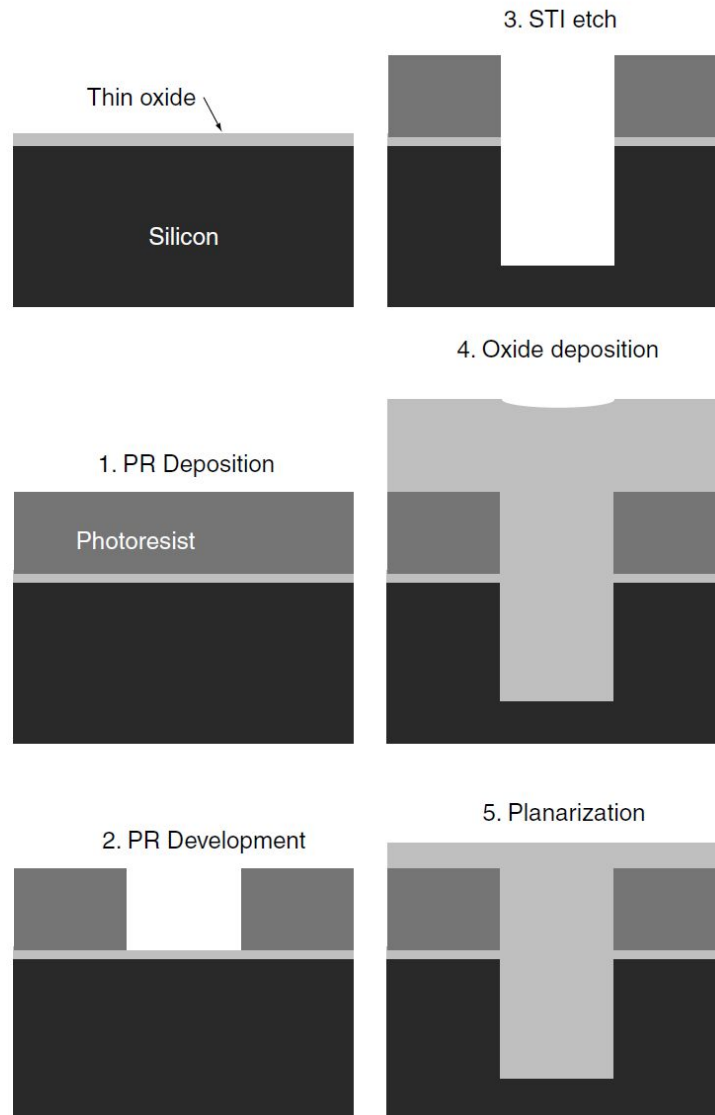
4. PR Strip



5. Nitride open



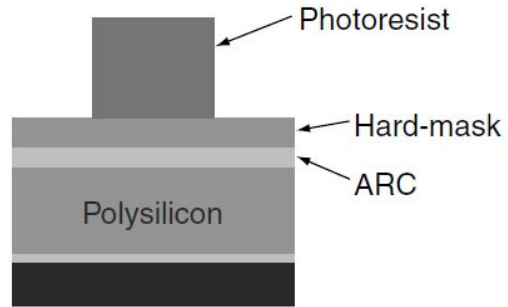
Steps in a typical contact etch process.



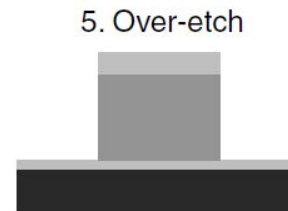
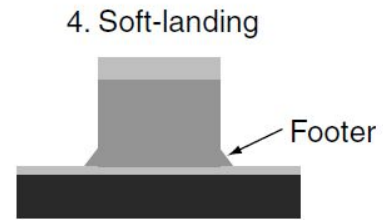
Steps in a typical shallow trench isolation (STI) etch process.



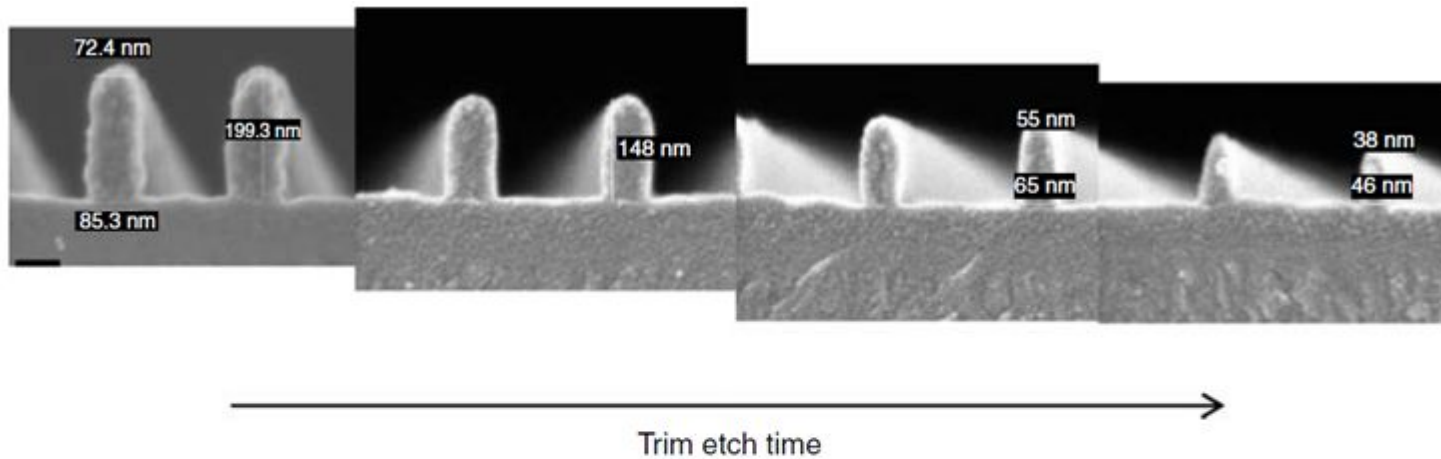
1. PR deposition, development, trim



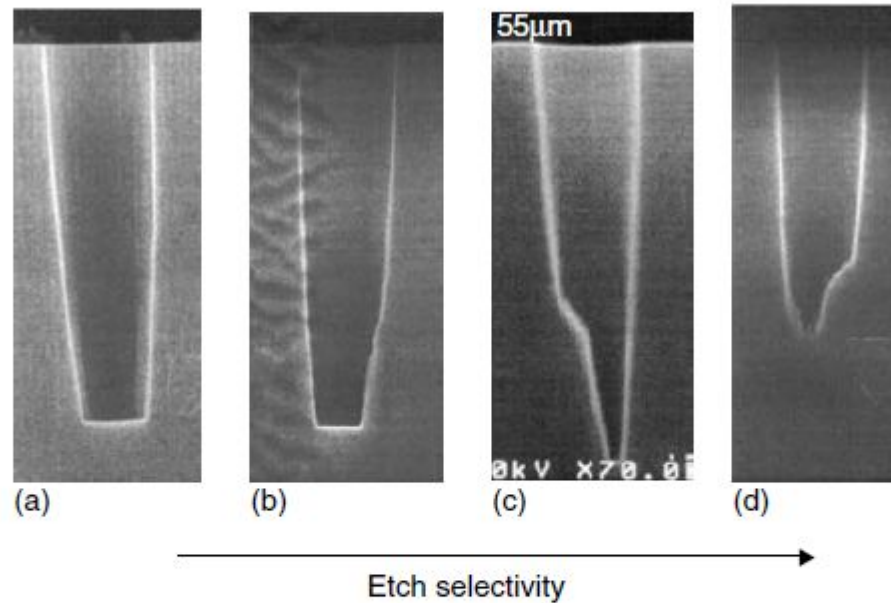
2. Hard-mask, pattern, break-through



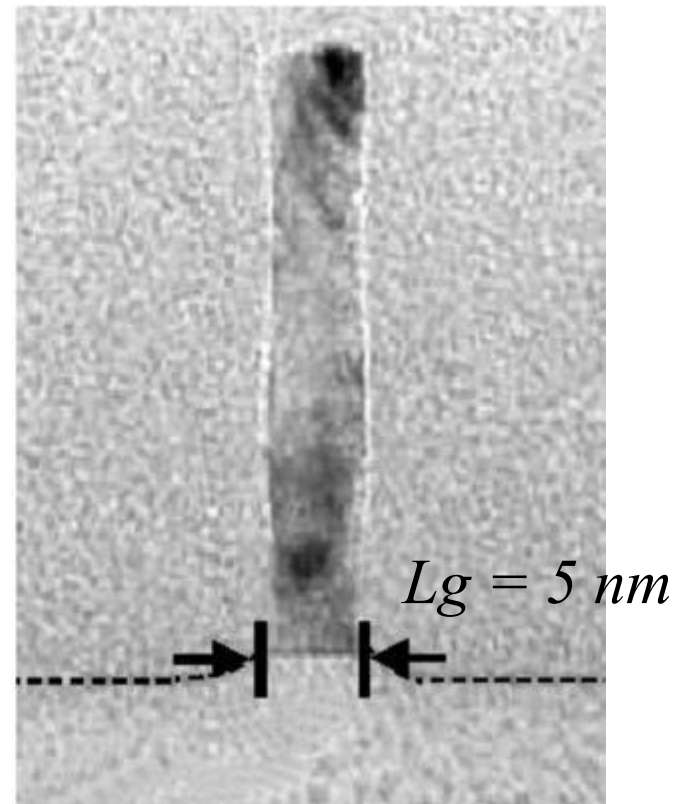
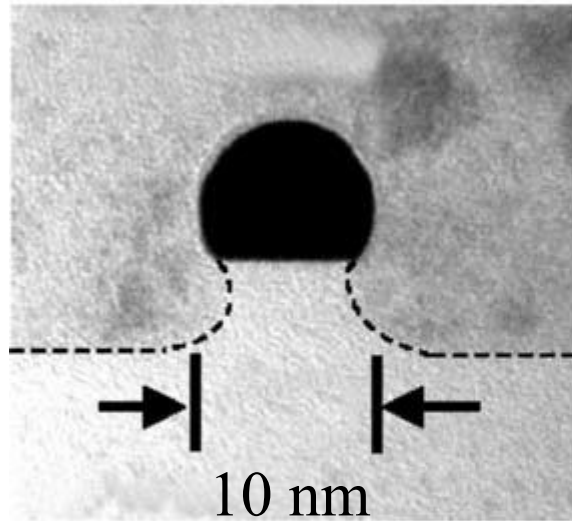
Steps in a typical polysilicon gate etch process.



Evolution of photoresist line during trim etch. The left most photoresist stump represents a starting condition. Moving from left to right, the photoresist experiences more trim time.

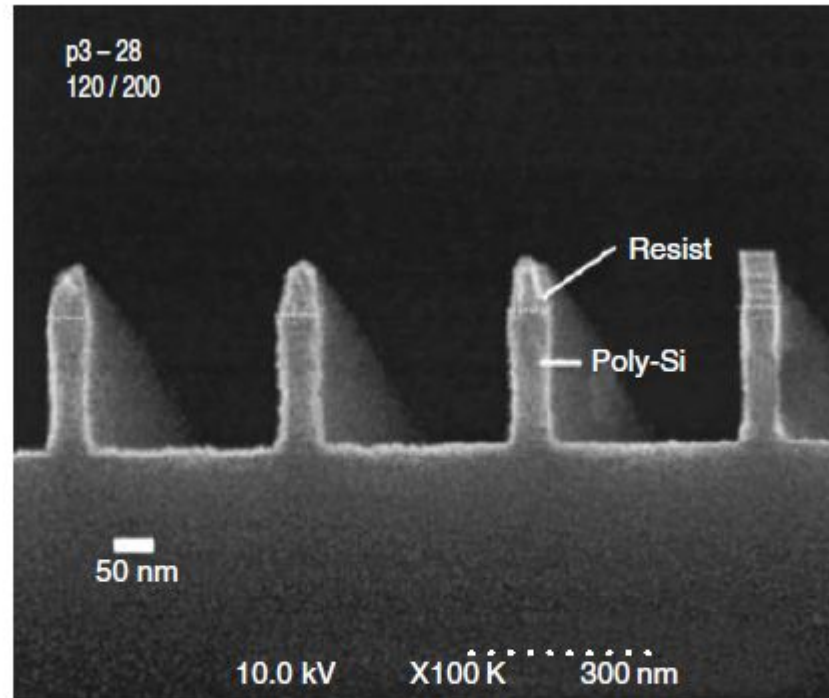


Variations in etch selectivity illustrating compromise of the spacer to etch stop: (a) represents a non-selective process in which the spacer is compromised, (b) and (c) represent more selective processes whereas (d) illustrates etch stop. (Reprinted from Qiao, J., Jin, B., Phatak, P., Yu, J., and Geha, S., *J. Vac. Sci. Technol. B*, 17, 2373, 1999. With permission. Copyright 1999, American Institute of Physics.)



Transmission electron microscopy cross-sections of nanowire structure. (Reprinted from Yang, F.-L., Lee, D.-H., Chen, H.-Y., Chang, C.-Y., Liu, S.-D., Huang, C.-C., Chung, T.-X. et al., IEEE

Symposium on VLSI Technology, 196, 2004. With permission. Copyright 2004 IEEE.)



Polysilicon profiles using Cl_2/SF_6 neutral beam etch. (Reprinted from Noda, S., Nishimori, H., Ida, T., Arikado, T., Ichiki, K., Ozaki, T., and Samukawa, S., *J. Vac. Sci. Technol. A*, 22, 1507, 2004. With permission. Copyright 2004, American Institute of Physics.)

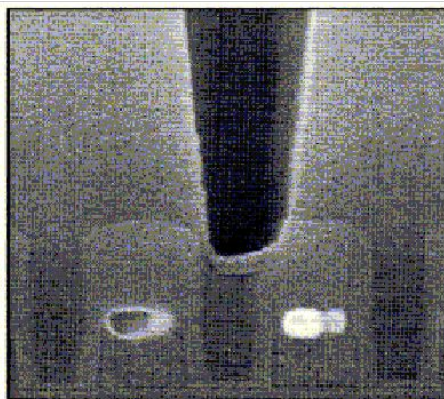
Микрофотография профиля щелевой структуры с осажденными тонкими слоями TaN/Ta/Cu.

Возможные повреждения структур, присущие плазменным процессам.

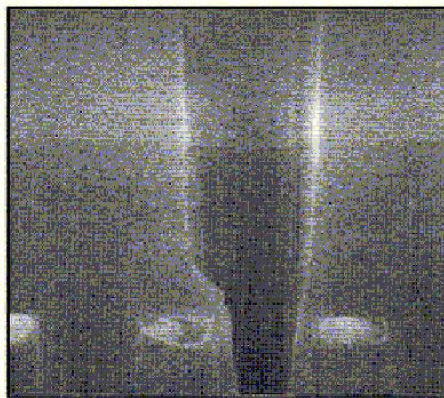
Тип повреждений	Основная причина	Присутствие эффекта при травлении или осаждении	Затрагиваемые материалы
Осадочные загрязнения	Воздействие плазмы	Обычно только при травлении благодаря реакции взаимодействия побочных продуктов на поверхности	Все
Образование новых химических соединений в результате взаимодействия элементов обрабатываемой структуры между собой или с плазменными частицами.	Образование под воздействием плазмы при поверхностного реакционного слоя, насыщенного распыленными элементами структуры, вступающими во взаимодействие между собой и элементами плазмы.	Травление, осаждение	Все

<p>Вызванное плазмой проникновение частиц</p>	<p>Воздействие плазмы</p>	<p>Травление, осаждение</p>	<p>Диэлектрики и полупроводники</p>
<p>Разрушение связей</p>	<p>Бомбардировка фотонами и частицами плазмы</p>	<p>Травление, осаждение</p>	<p>Диэлектрики и полупроводники</p>
<p>Токовые повреждения</p>	<p>Токи, возникающие в течение плазменной обработки из-за образования зарядов или индуцированные токи</p>	<p>Травление, осаждение</p>	<p>Диэлектрики</p>

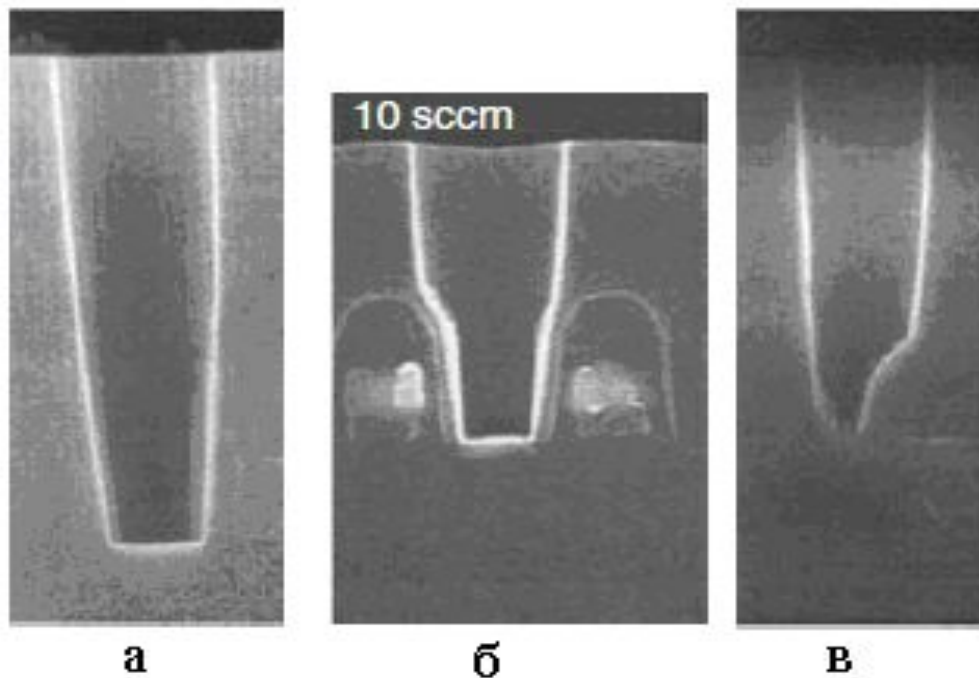
Остановка травления при травлении окисла в результате интенсивной полимеризации при травлении в смеси C_4F_8 во время формирования самосовмещенного контакта. (б) – исключение эффекта «стоп-травления» при добавке кислорода.



(а)

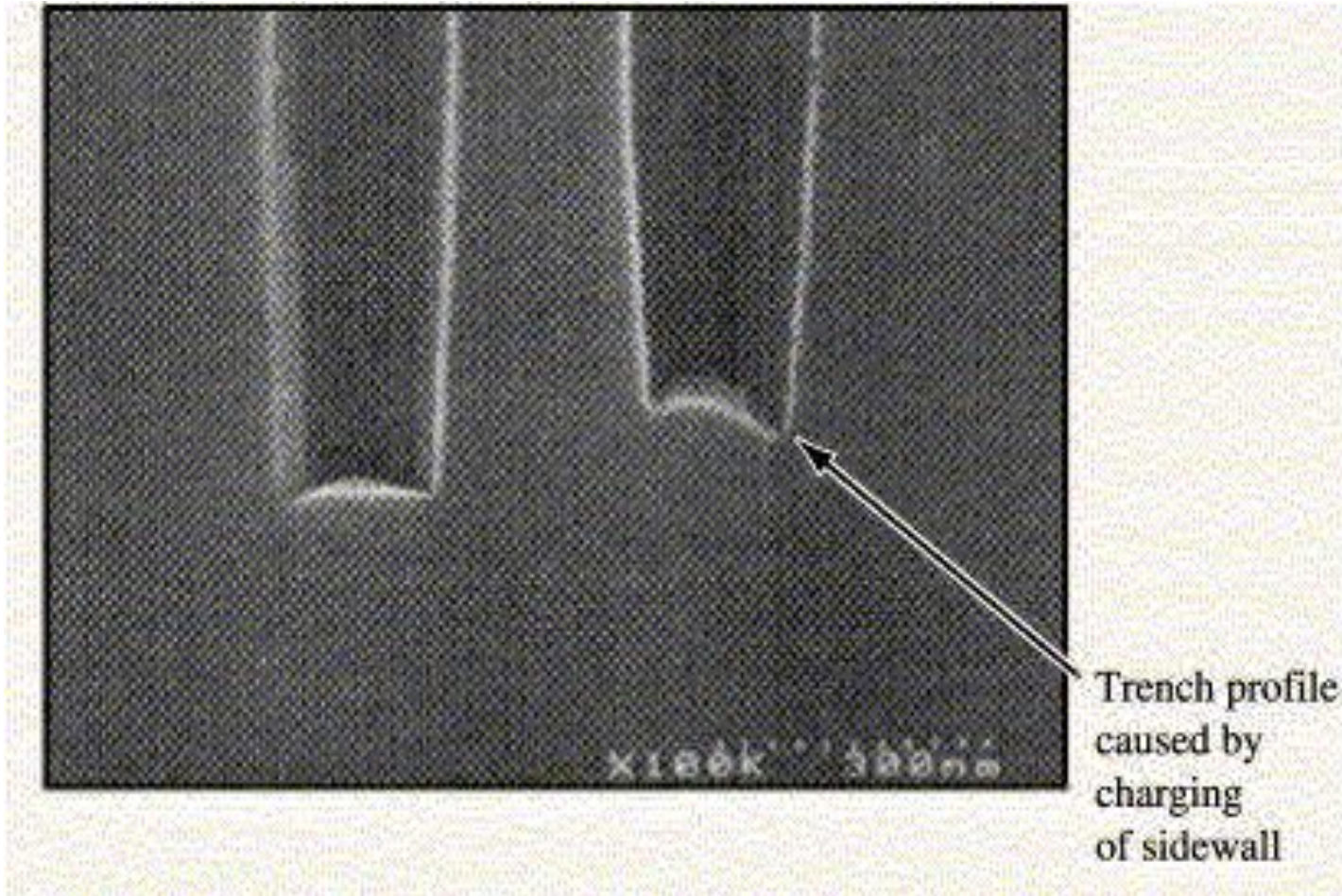


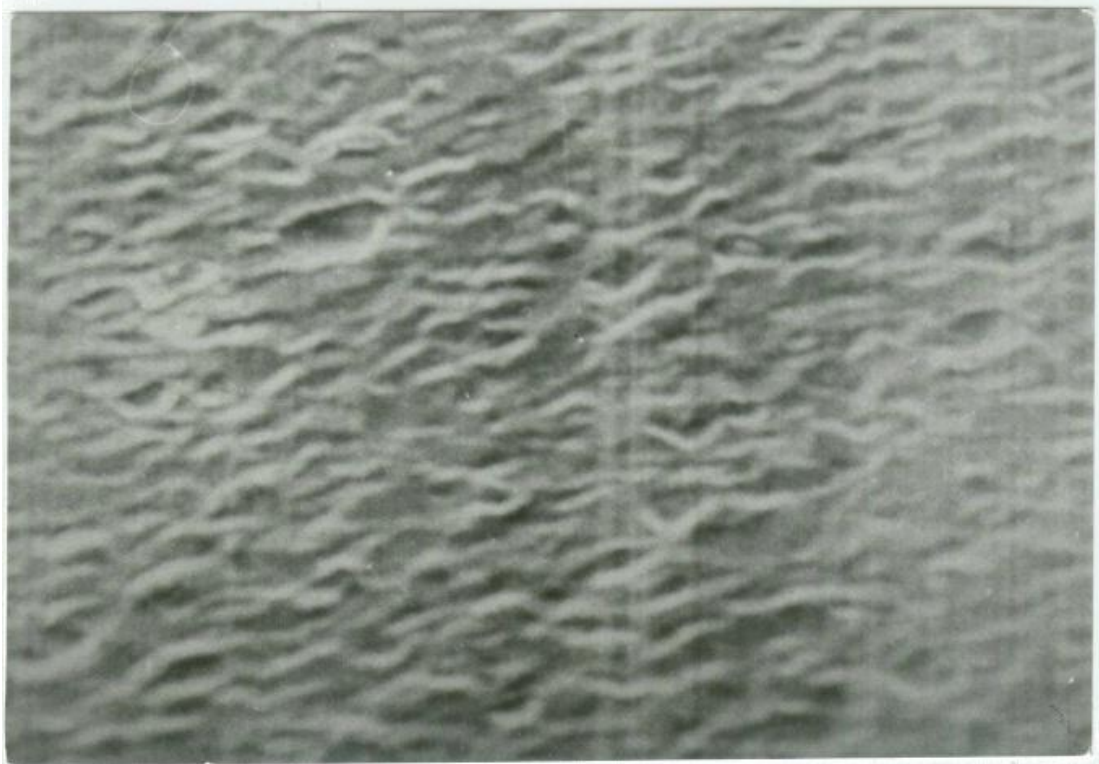
(б)

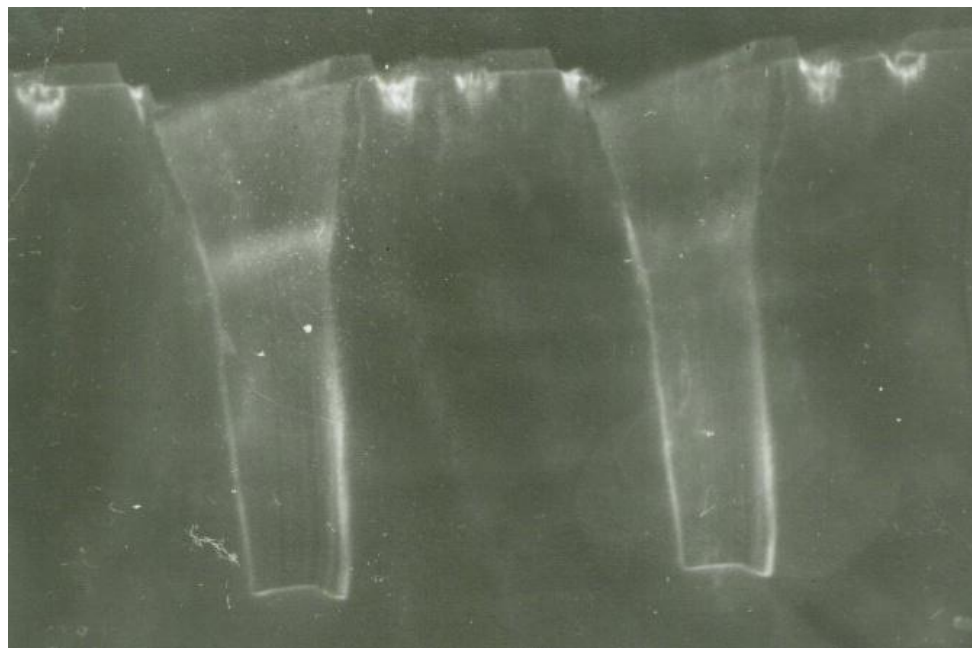
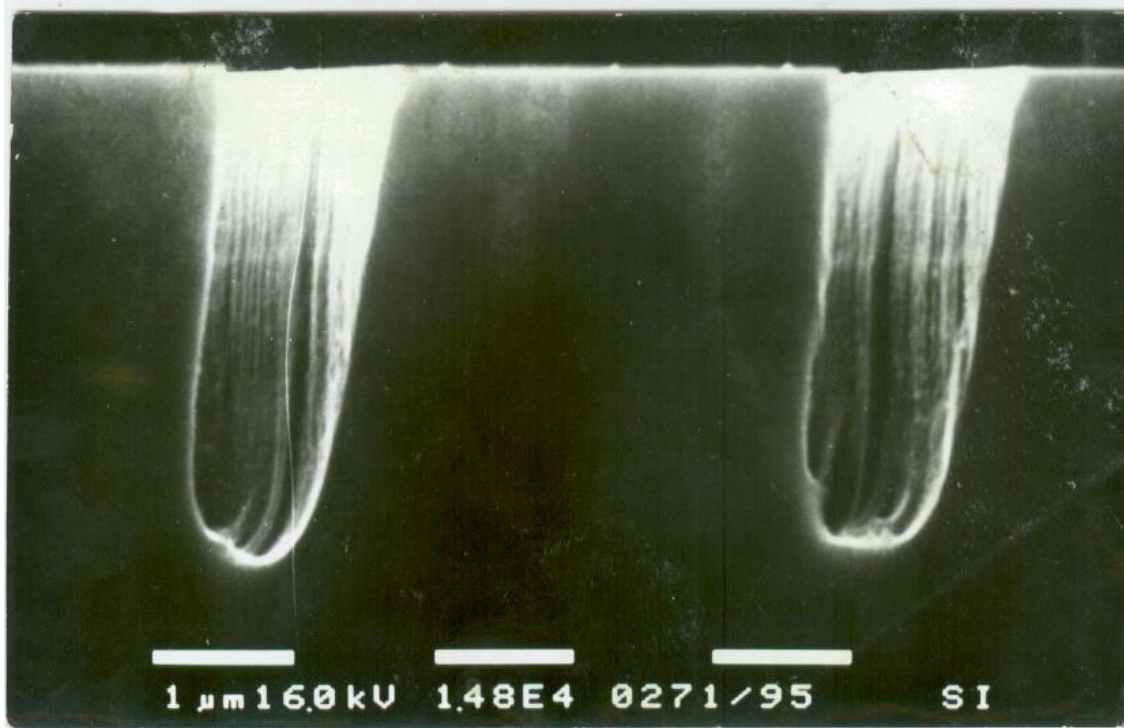


Увеличение селективности S ($\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$)

Поперечное сечение нижней части канавки с подтравом, вызванным переотражением ионов от заряженных стенок.





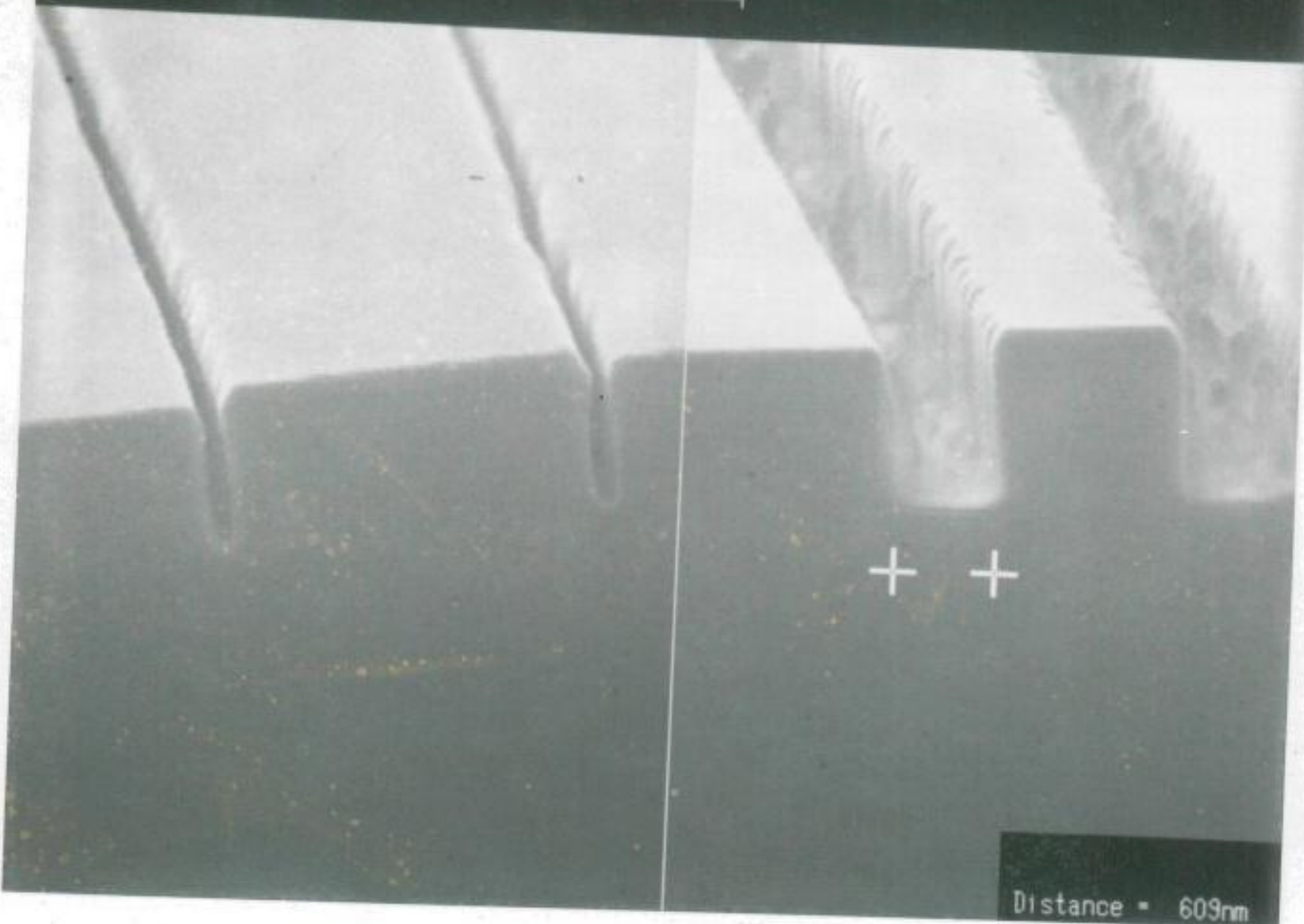


L- SE1

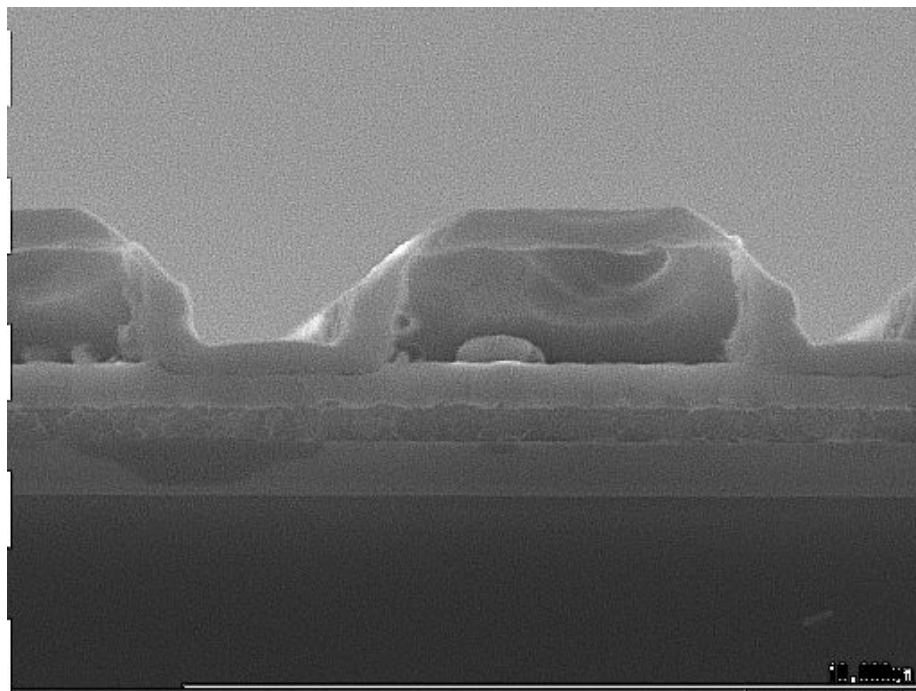
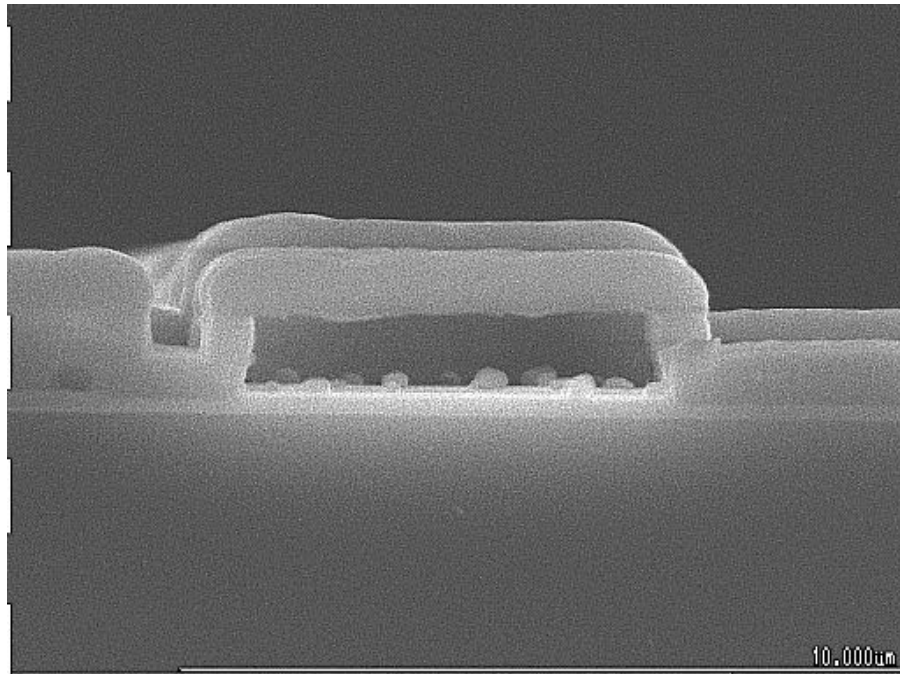
EHT= 22.5 KV
2.00 μ m

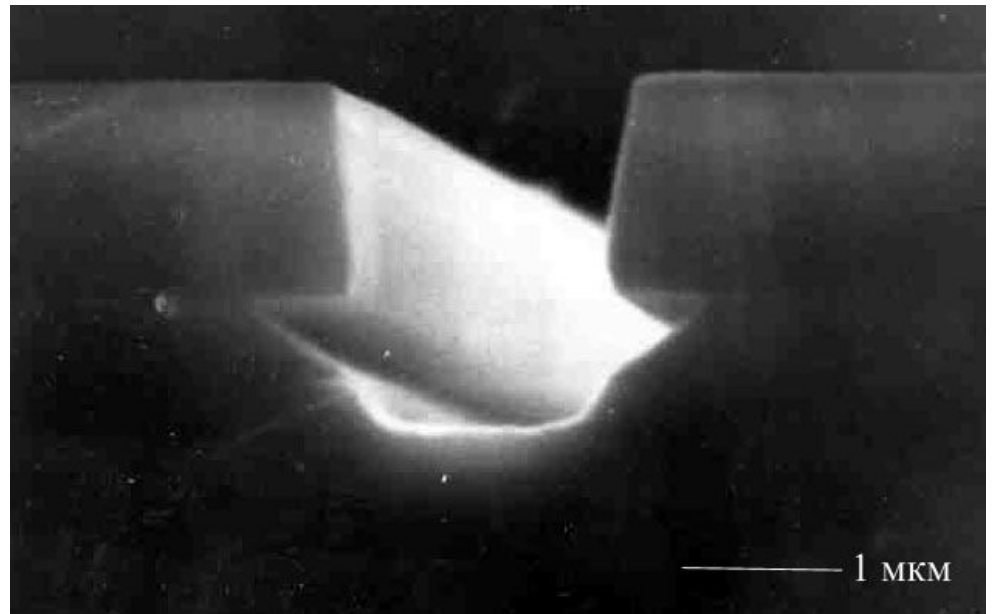
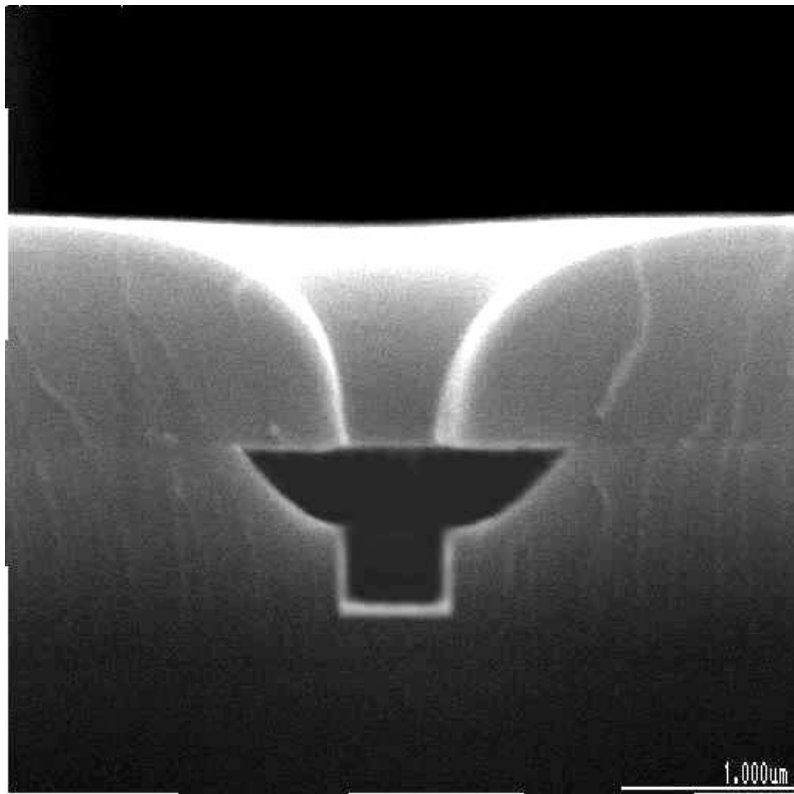
WD= 6 mm

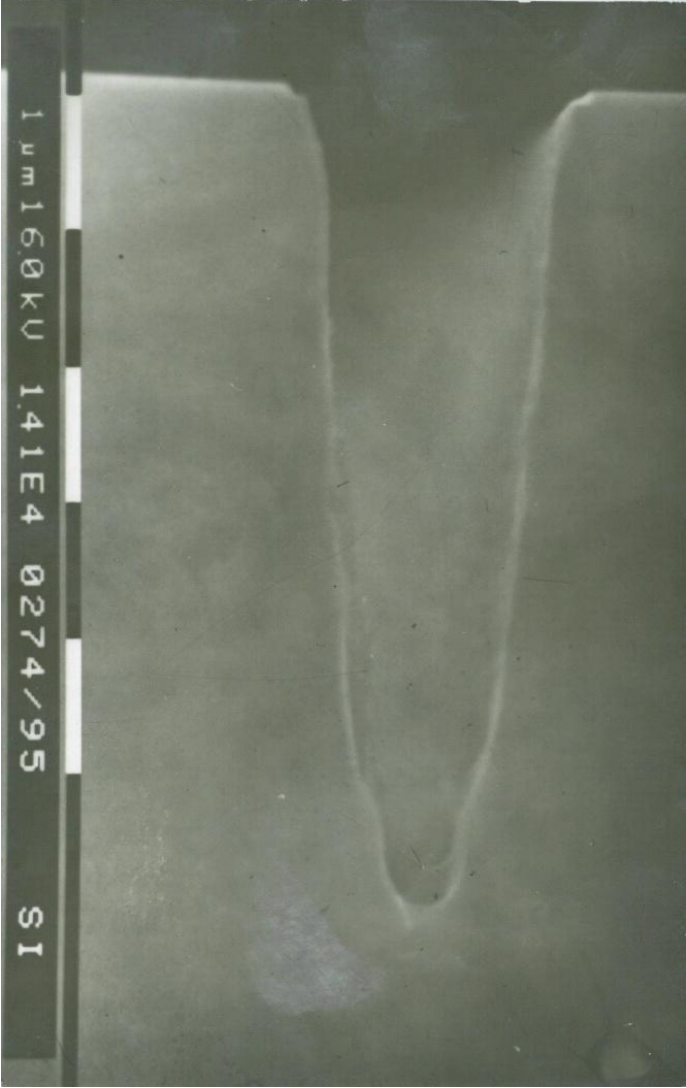
MAG= X 15.0 K PHOTO= 5



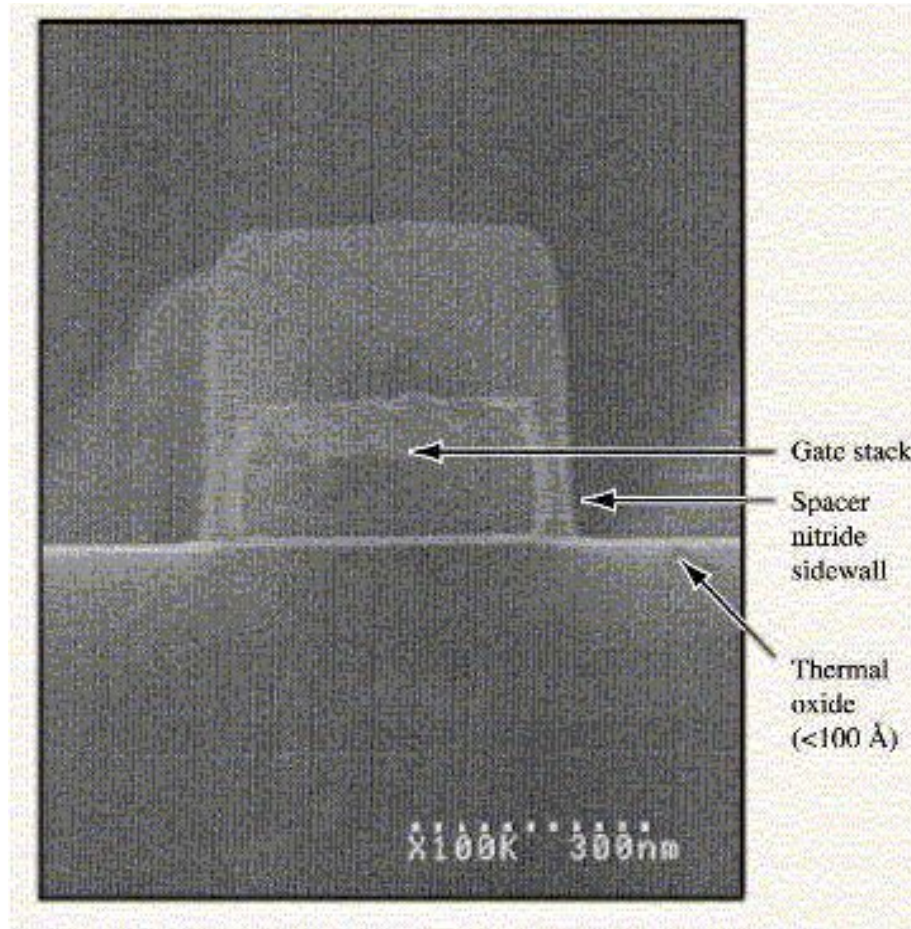
Distance = 609nm



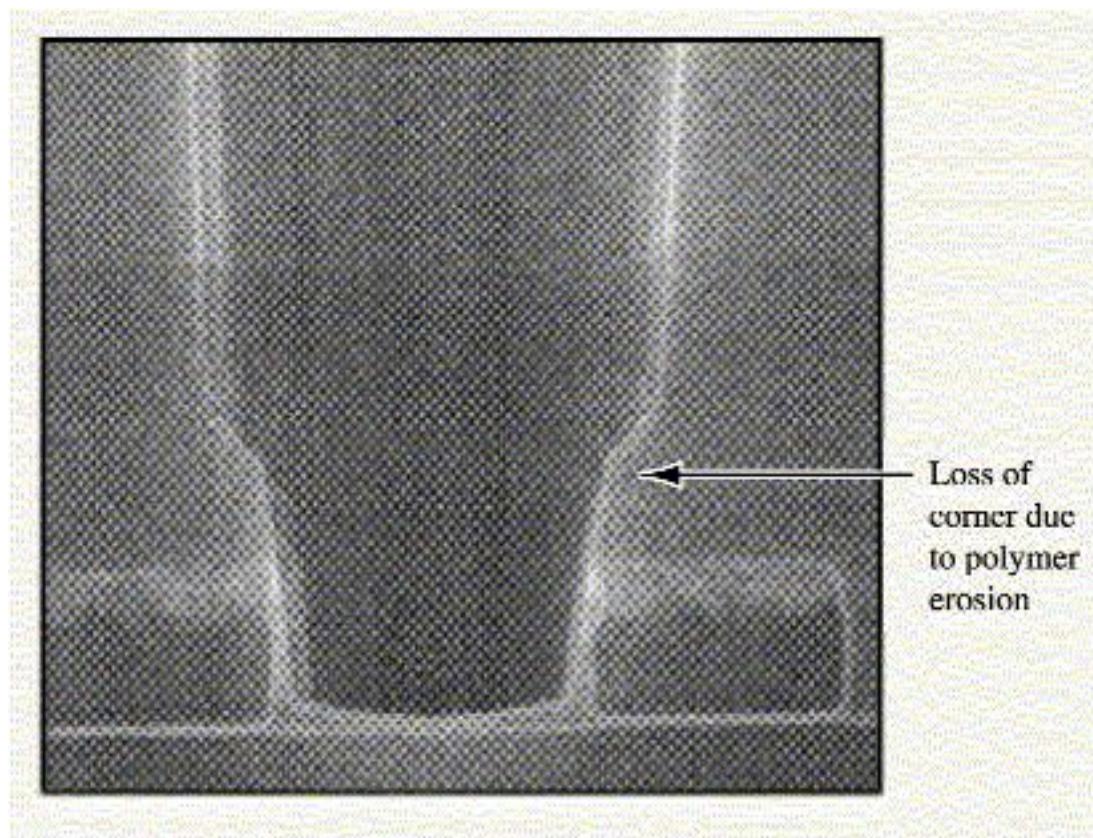




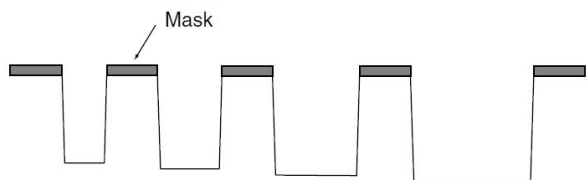
Селективное плазменное травление нитрида для формирования нитридного спейсера.



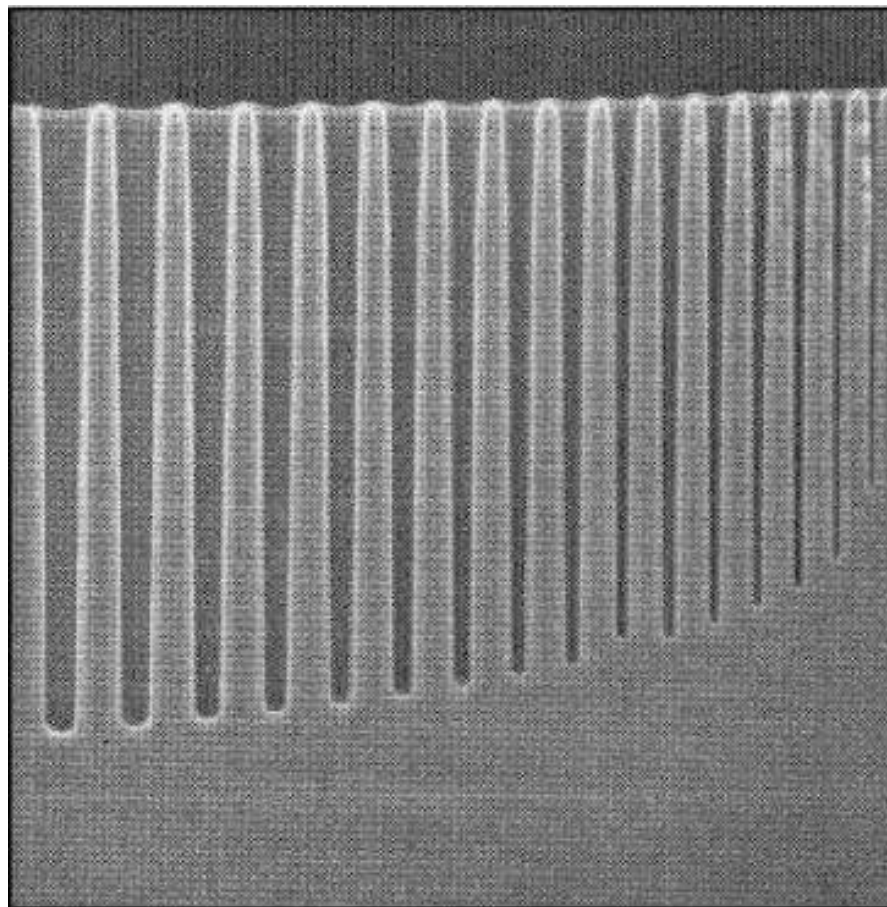
Микрофотография самосовмещенного контакта, вытравленного в системе высокоплотной плазмы, иллюстрирующая низкую селективность на углах структуры при понижении концентрации C_4F_8 .

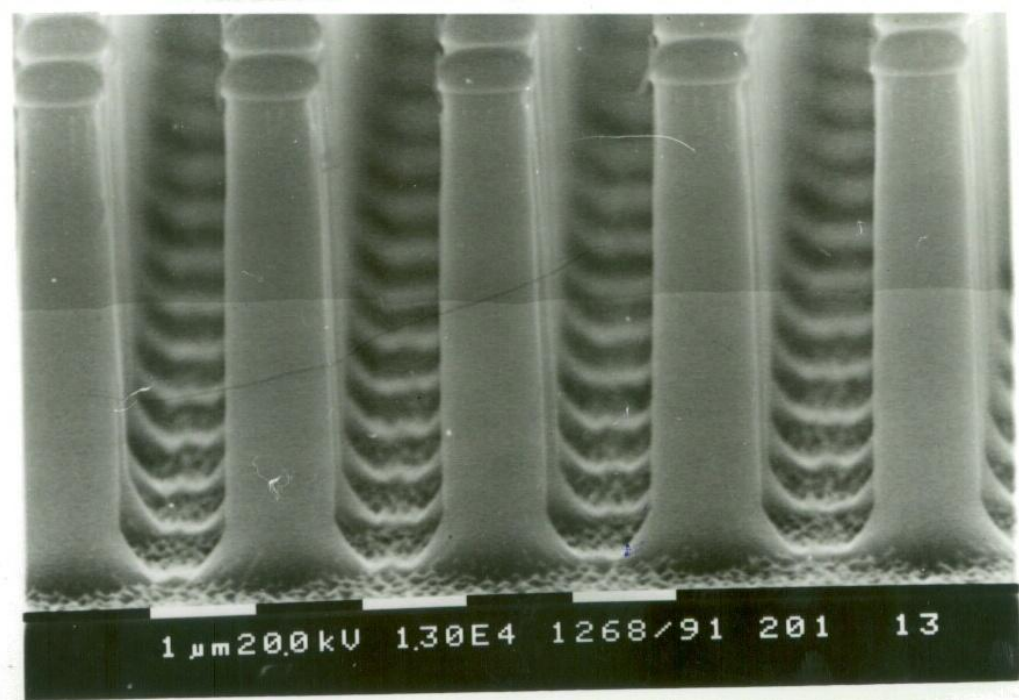
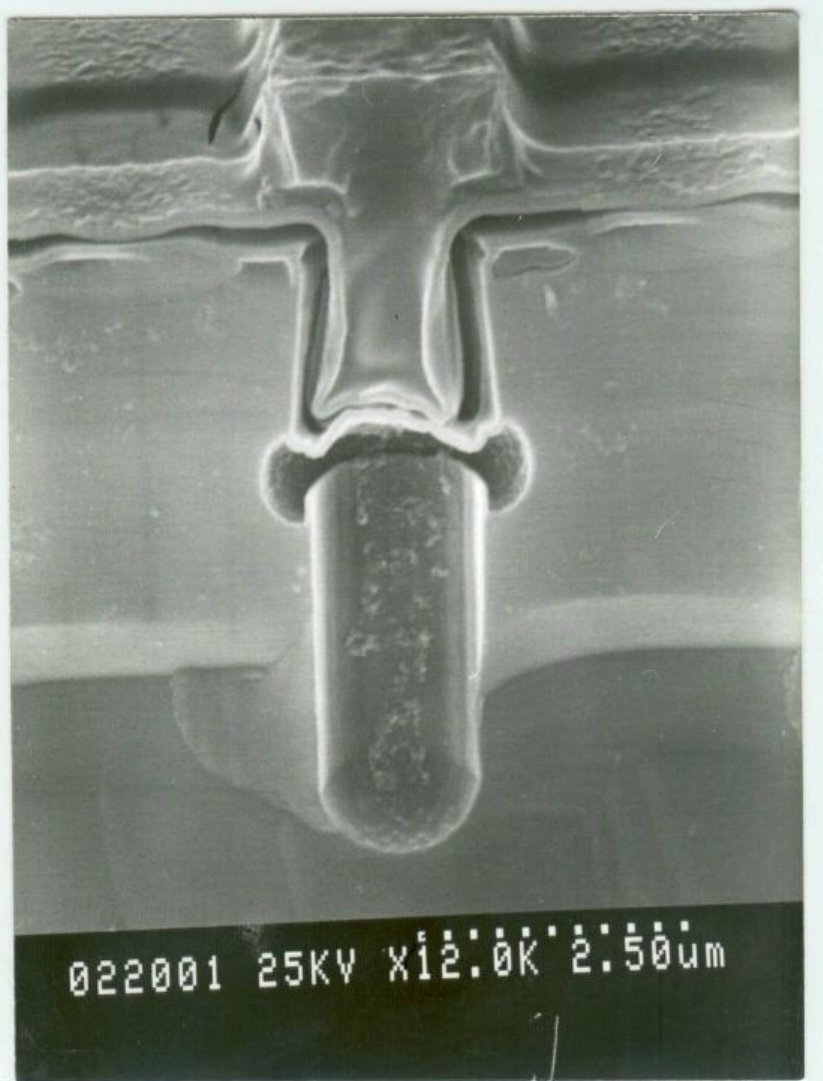


Микроснимок поперечного сечения щелей различной ширины, протравленных в DRM системе в течение восьми минут. Наблюдается снижение глубины щелей с высоким аспектным соотношением из-за эффекта «задержки РИТ».

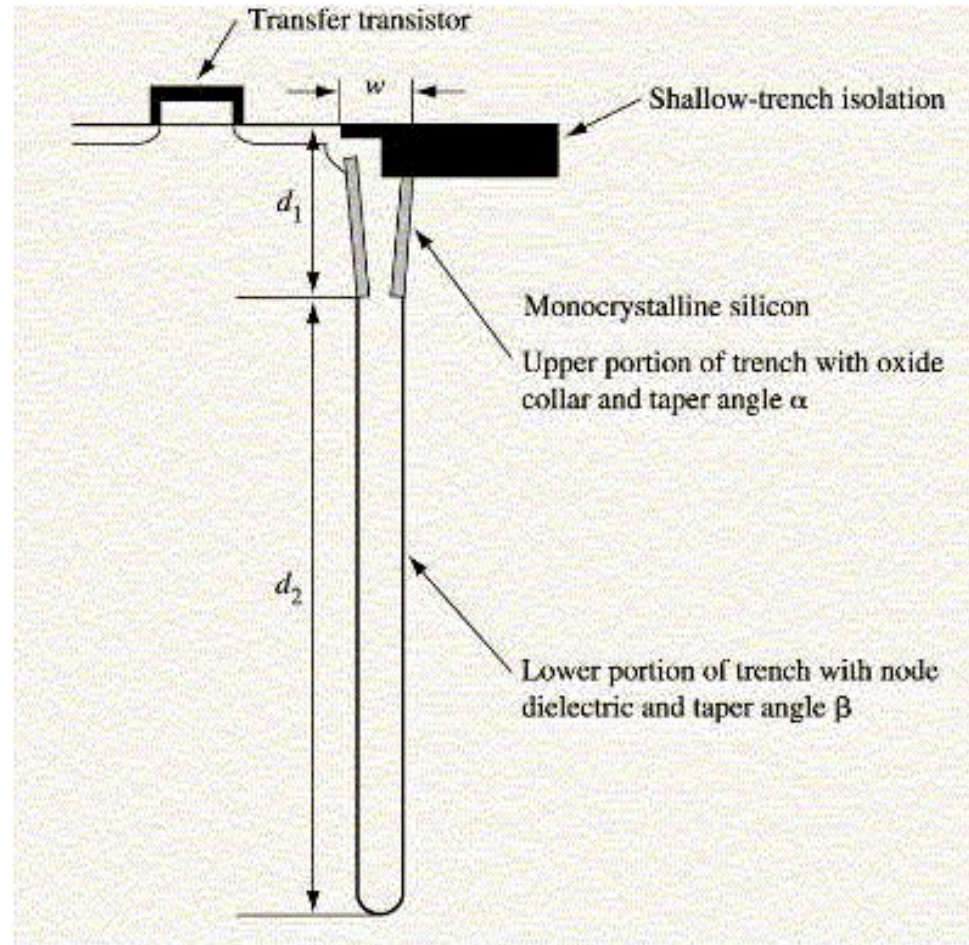


Impact of feature size on etch rate.



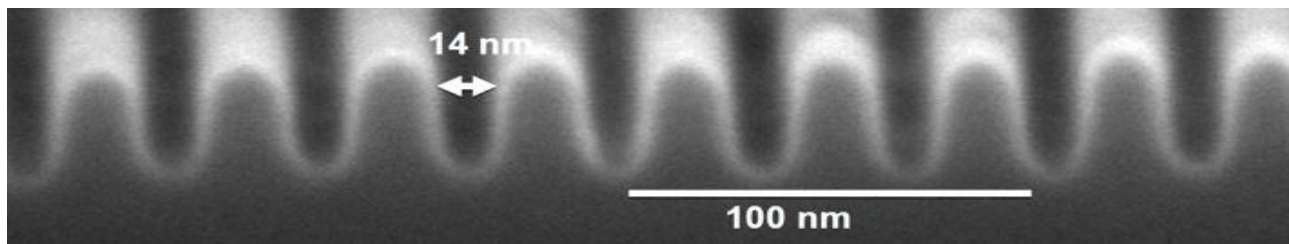


Схематичное изображение щелевого конденсатора,
используемого в 256 Мгб ДОЗУ.

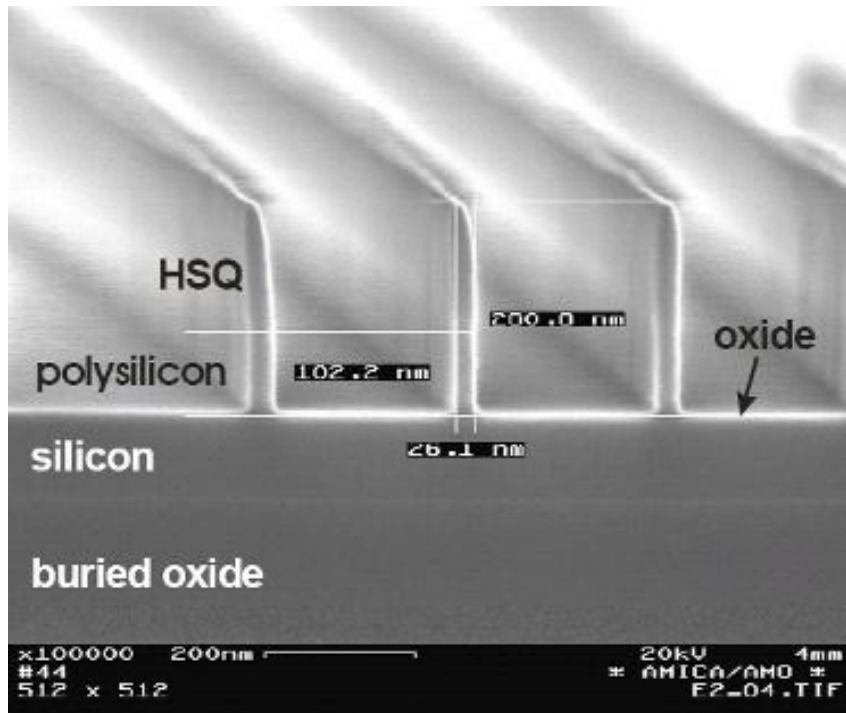


Вариации формы канавки для различных поколений ДОЗУ, приводящие к 10% изменениям площади конденсатора, вызываемым отклонением параметров от их номинальных величин. Экстраполированные величины показаны для 1 Гб. и 4 Гб. ДОЗУ.

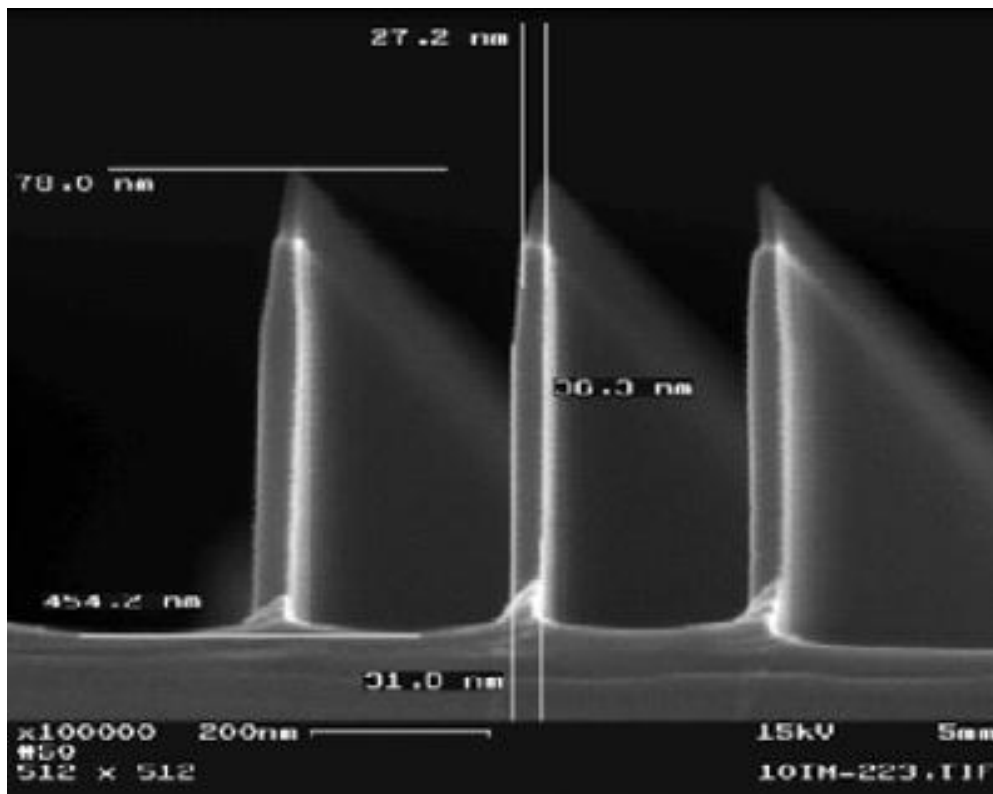
Поколение ДОЗУ	Параметр	Ширина w, нм	Глубина d ₂ нижней части, мкм	Верхний конусный угол α, град	Нижний конусный угол β, град	Площадь нижней части, мкм ²	C, fF	C, fF
256 Мб.	Номинальное отклонение	380±26	6,2±0,75	88,4±0,5	89,65±0,24	6,84±10%	47	62
1 Гб.	Номинальное отклонение	269±20	5,94±0,72	88,65±0,54	89,75±0,19	4,89±10%	34	45
4 Гб.	Номинальное отклонение	190±14	5,85±0,71	88,8±0,55	89,8±0,14	3,44±10%	24	31



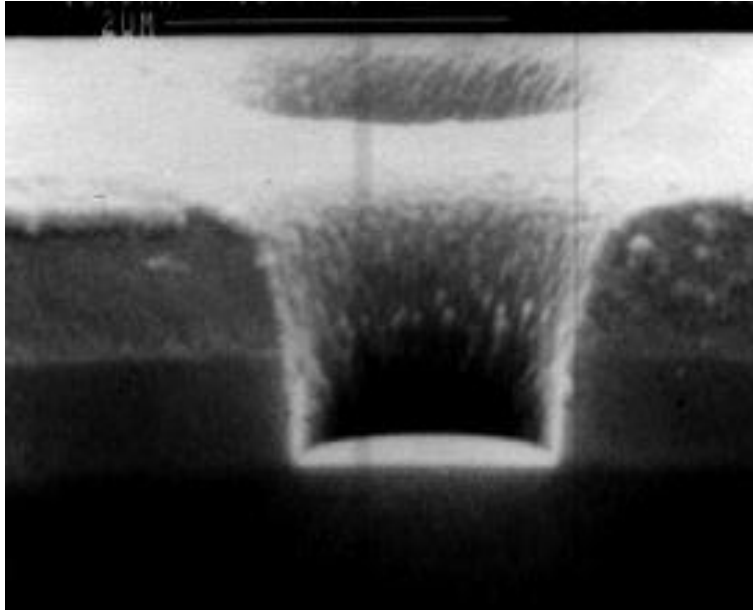
SF_6/O_2 крио процесс с использованием
наноимпринт литографии. Суб-20 нм область.



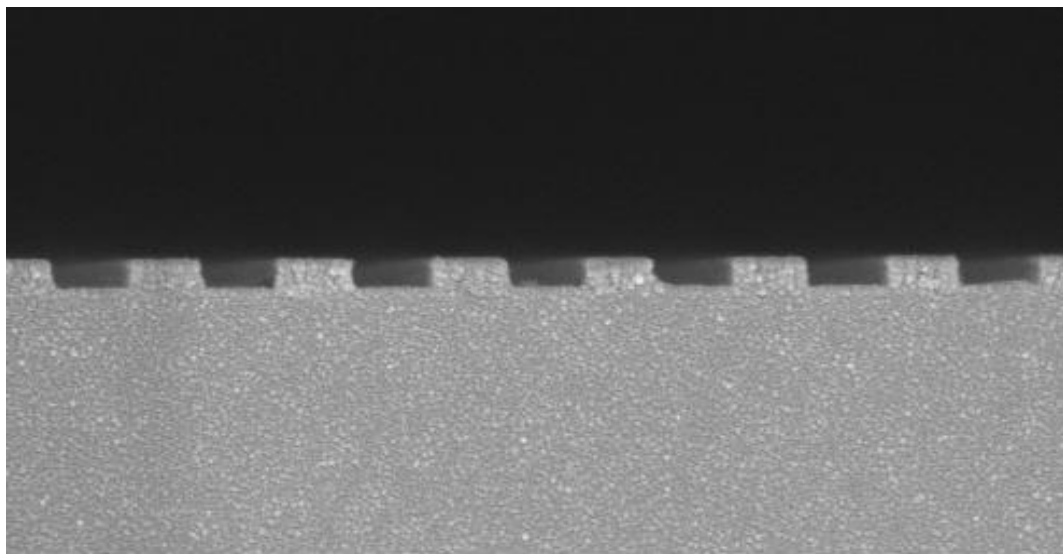
26 нм элемент поликремния, протравленный с высокой селективностью по отношению к подзатворному окислу. 3 стадии травления: «пробивание окисла», анизотропная стадия, высокоселективный дотрав. 50нм/мин.



27 нм линии в кремнии глубиной 450 нм.

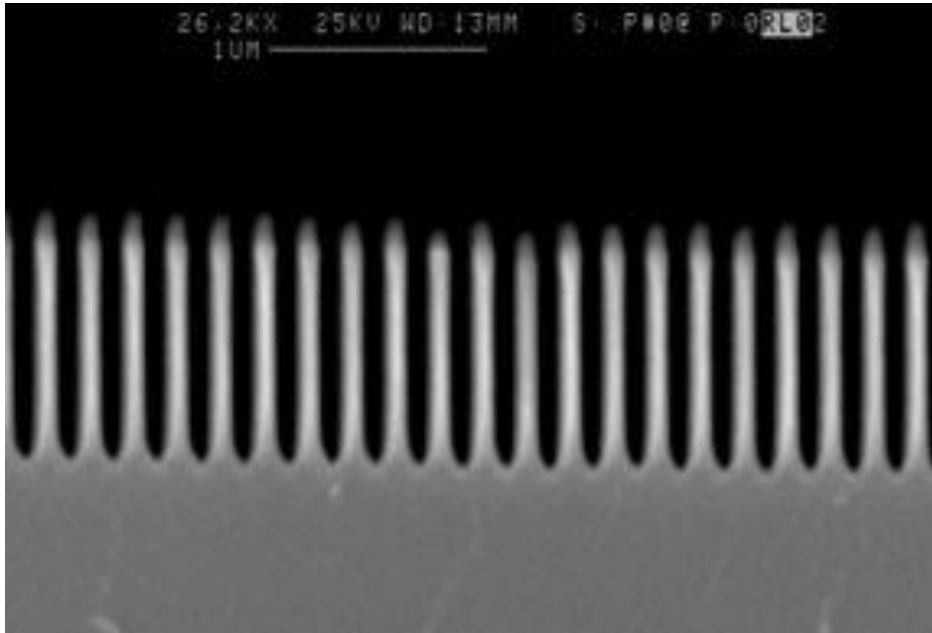


1 мкм переходные контактные отверстия в окисле кремния

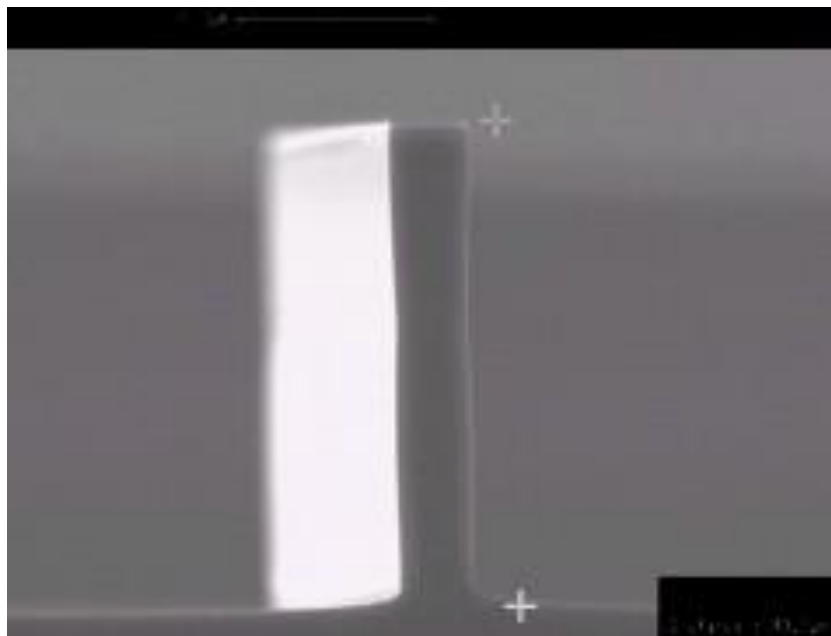


Mag = 100.00 K X 300nm' EHT = 5.00 kV Signal A = InLens Date :7 Sep 2005
WD = 6 mm Photo No. = 5853 Time 15:02

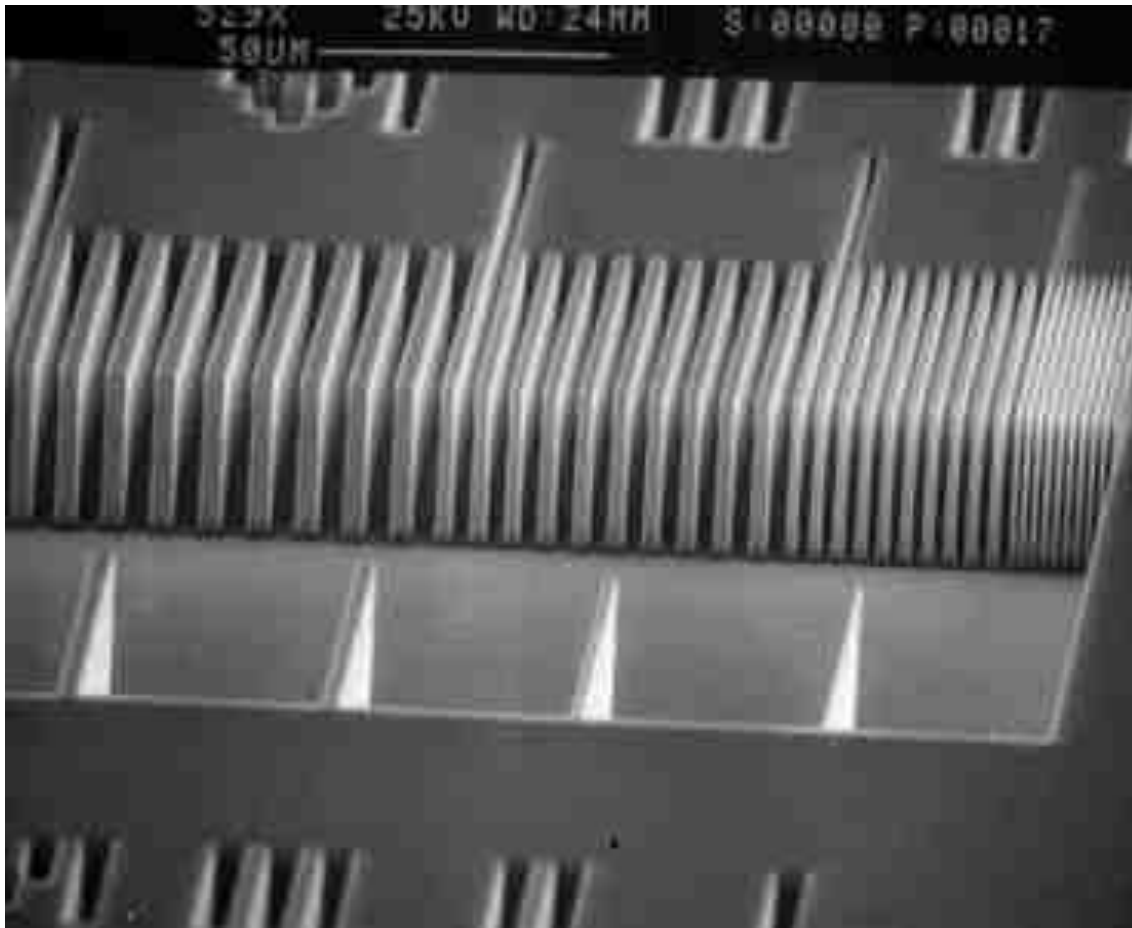
110 нм линии хрома.



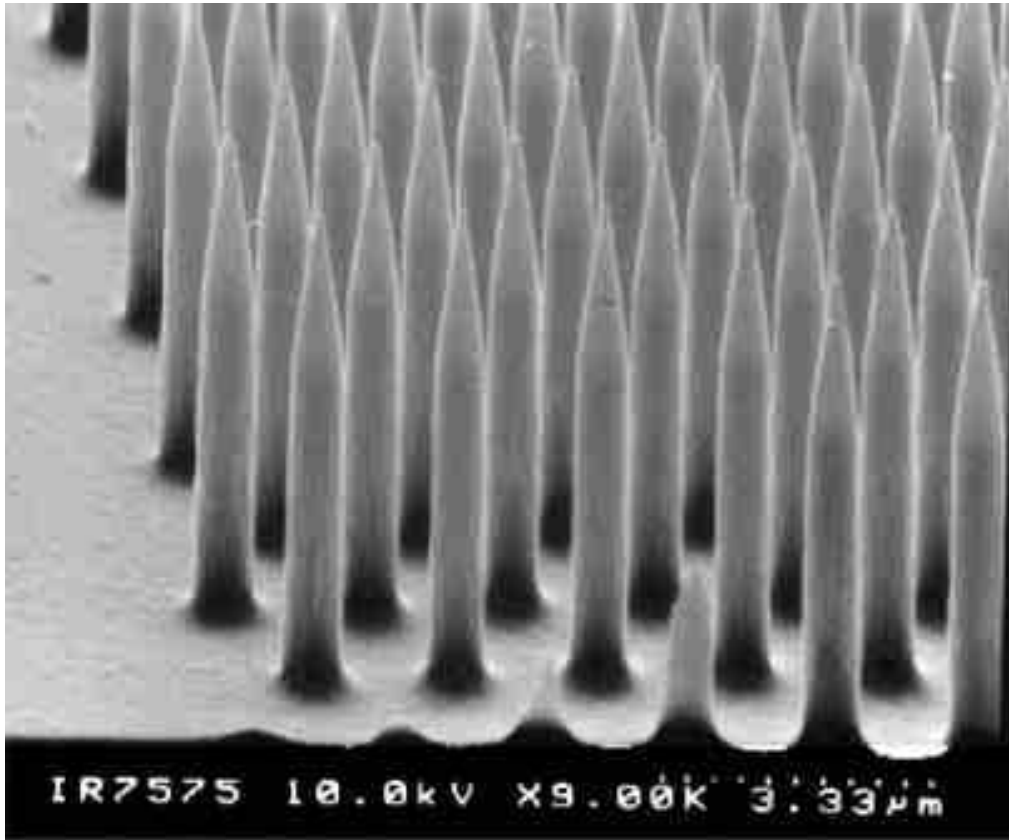
100 нм линии. Аспектное отношение 10:1.



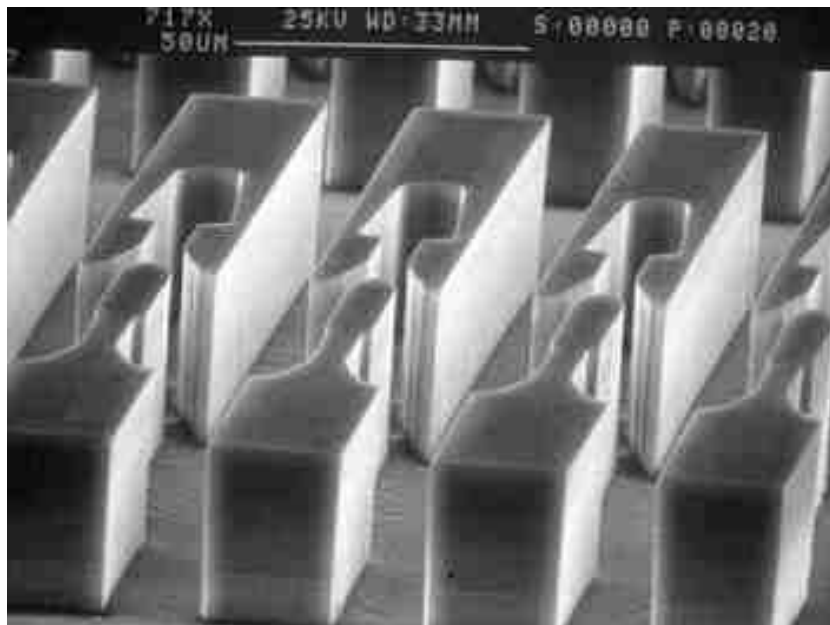
50 мкм элемент кремния.



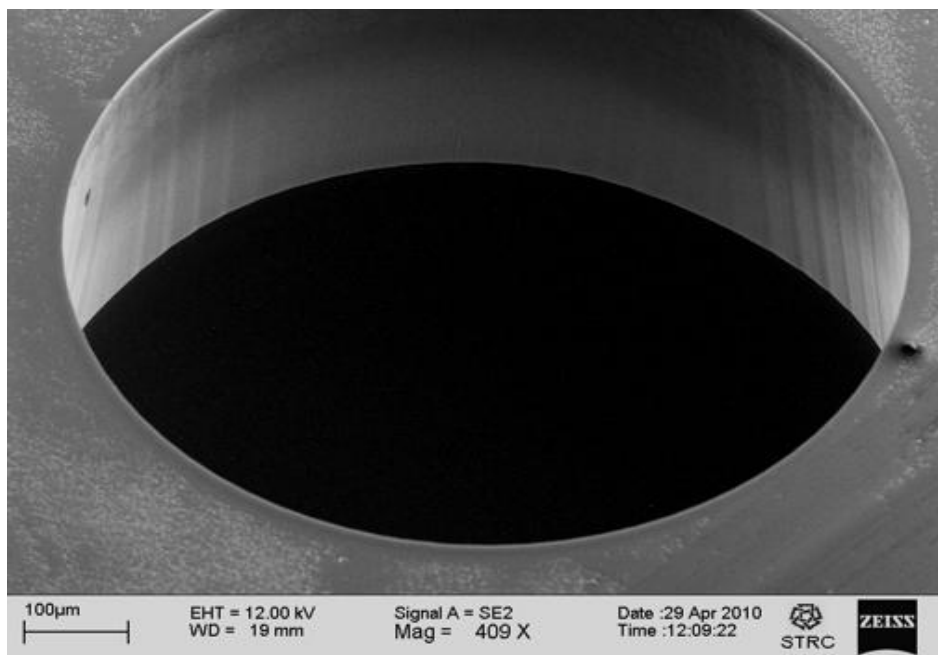
50 мкм травление кремния с использованием Bosch Process при изготовлении микромеханических устройств



Травление кремния по РИТ технологии в анизотропно-изотропном процессе для формирования кантиливеров АСМ

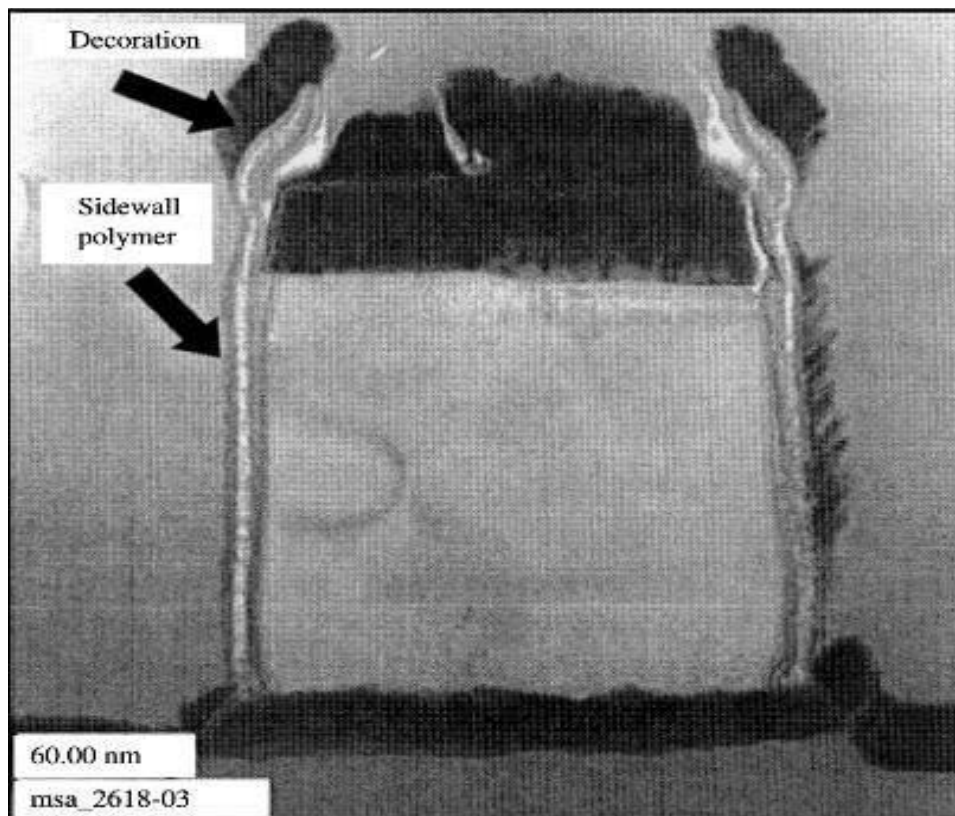


75 мкм травление кремния

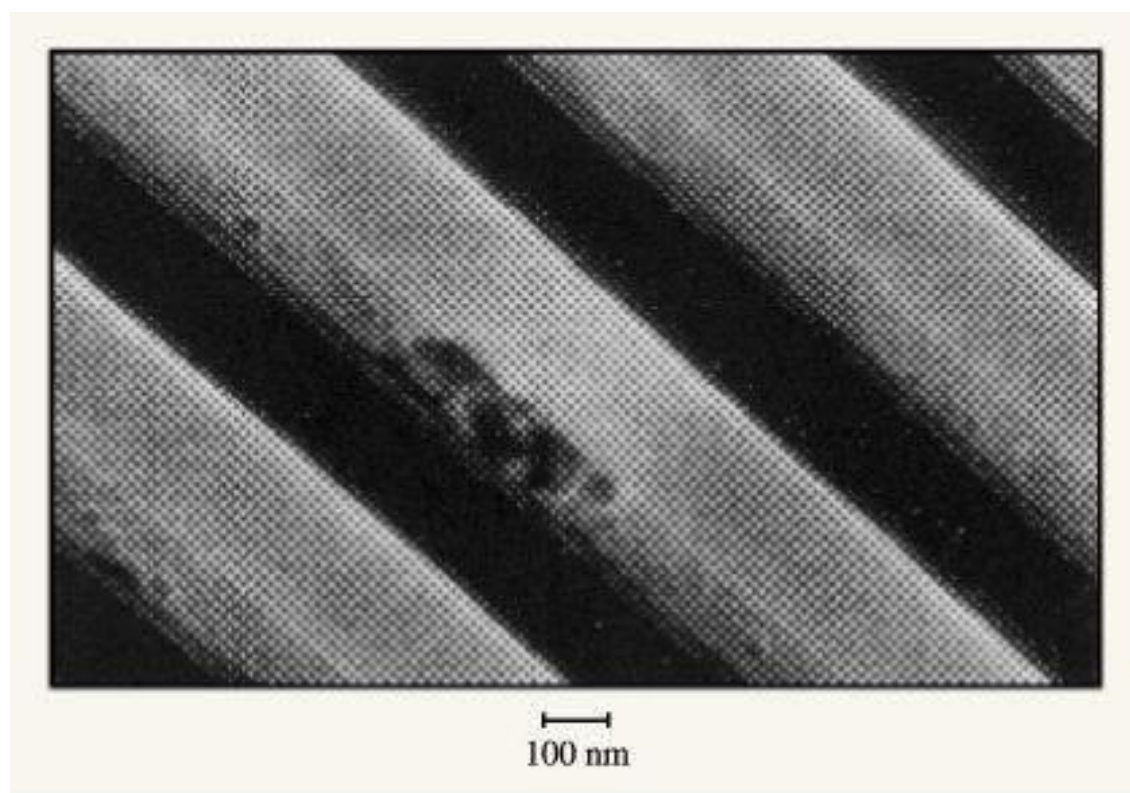


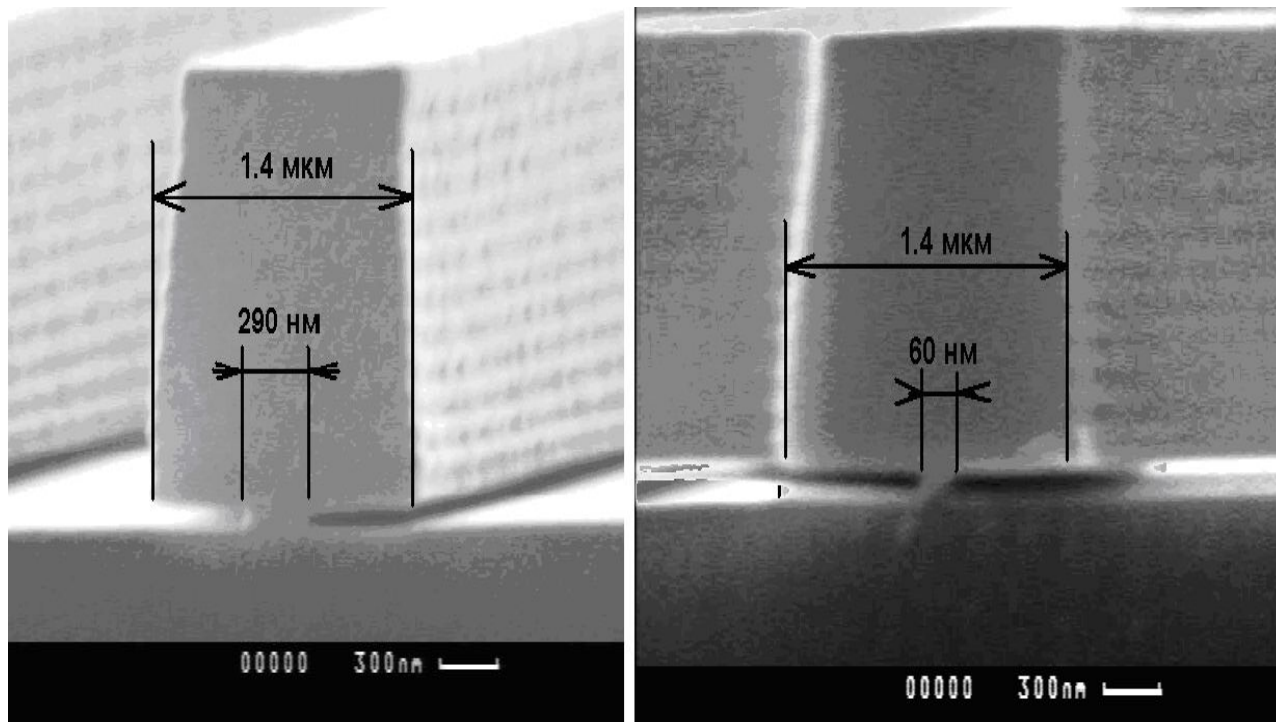
400 мкм отверстие в кремнии, полученное по технологии криогенного РИТ

Микрофотография поперечного сечения с трансмиссионного электронного микроскопа (ТЕМ) Al(Cu) проводника после травления Cl_2/HCl плазмой, сопровождаемой удалением резиста и промывкой.

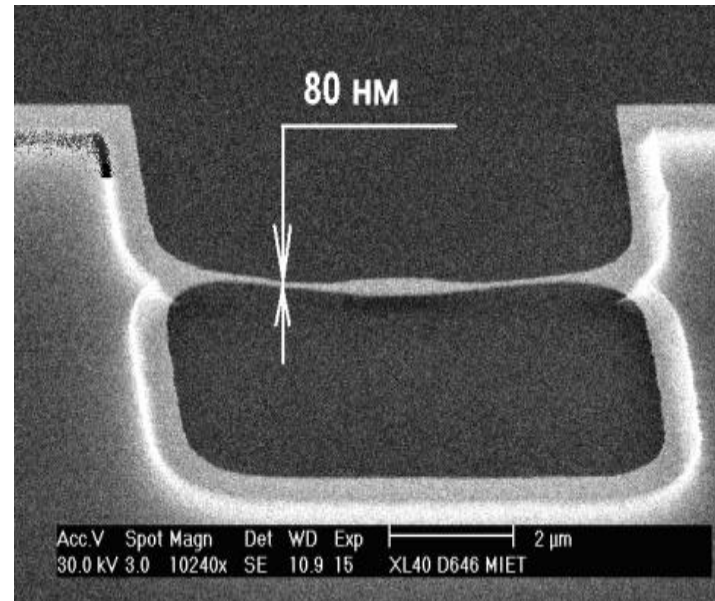
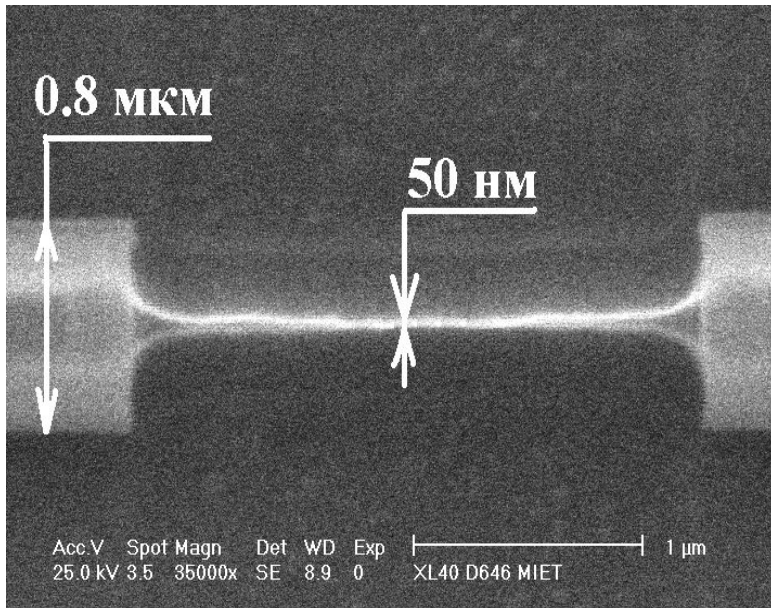


Фотография полости в проводнике ("укус мыши") вызванной коррозией проводника из Al(Cu).



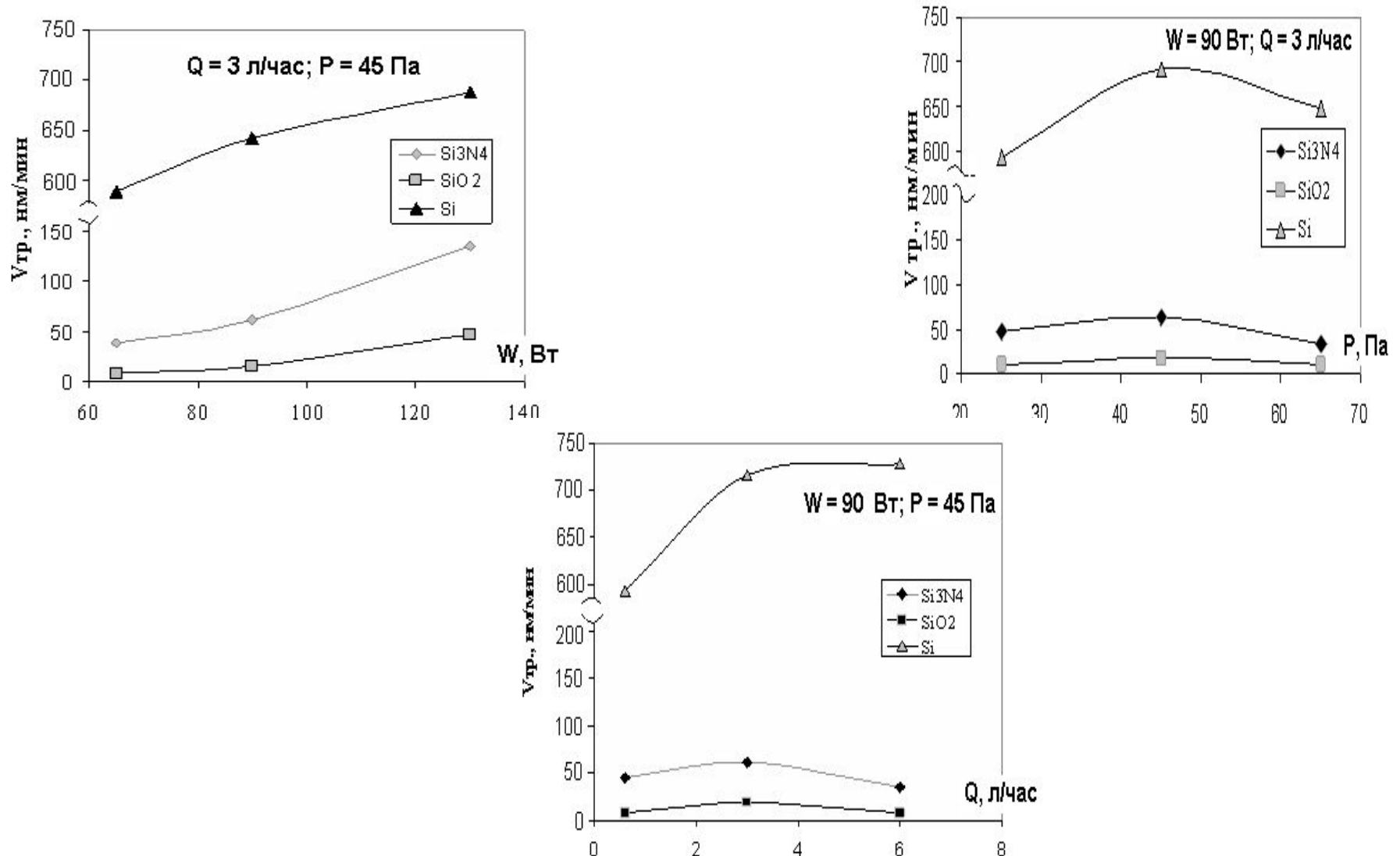


Микрофотографии изотропных профилей травления Si*: а) - $W = 90$ Вт, $P = 45$ Па, $Q_{\text{SF}_6} = 3$ л/ч, $t = 40$ с; б) - $W = 90$ Вт, $P = 45$ Па, $Q_{\text{SF}_6} = 3$ л/ч, $t = 55$ с.



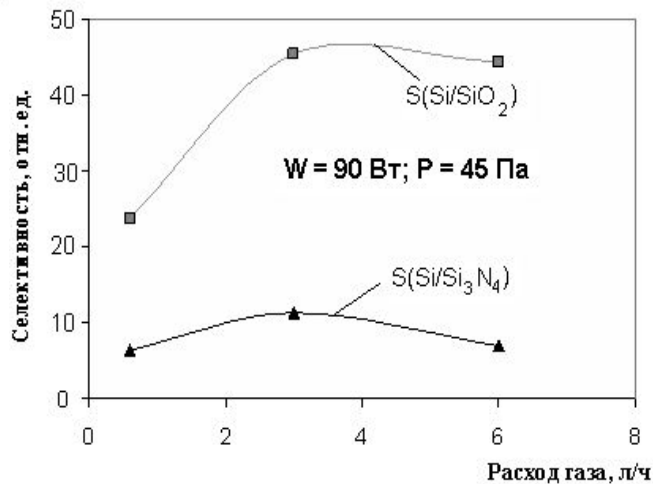
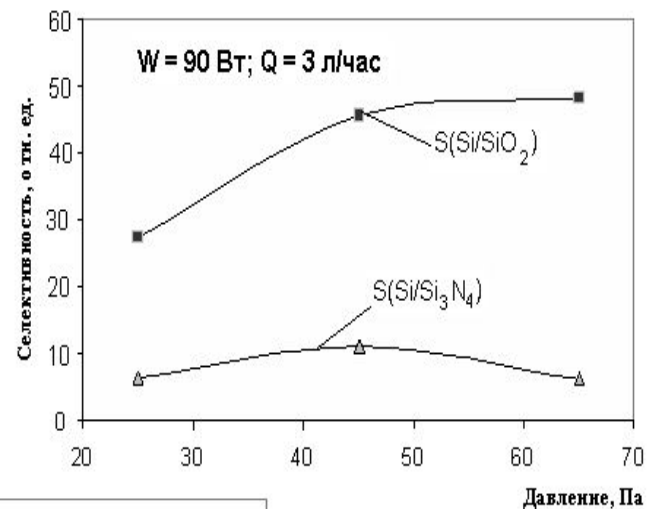
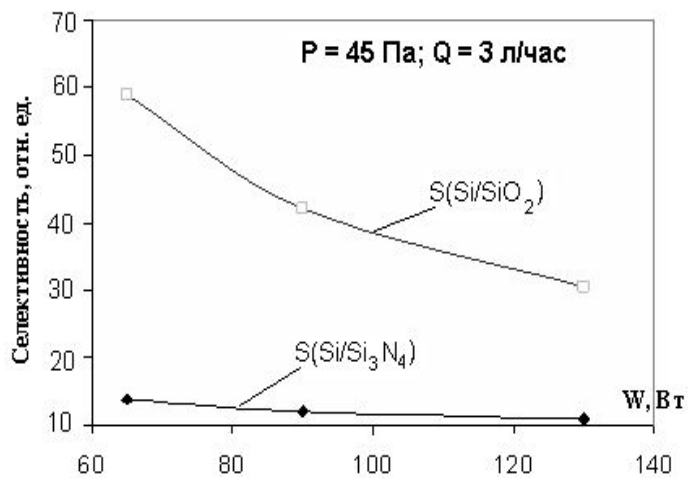
Микрофотографии нанопроволочной кремниевой структуры (а) и чувствительного виброрезонансного нанозлемента для атомных весов (б).

Получение нанопроволочных структур

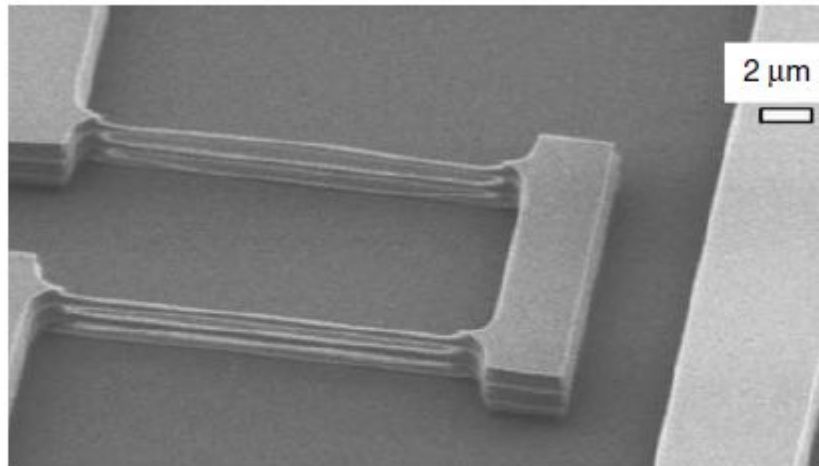


Зависимости скоростей травления Si^* , SiO_2 и Si_3N_4 от операционных параметров процесса: а) - от ВЧ-мощности; б) – от давления; в) – от расхода SF_6 .

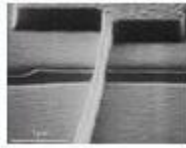
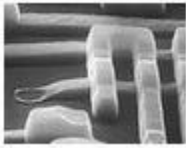
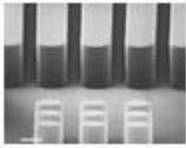
Получение нанопроволочных структур



Зависимости селективностей травления Si*/SiO₂ и Si*/Si₃N₄ от операционных параметров процесса: а) от ВЧ-мощности; б) – от давления; в) – от расхода SF₆.

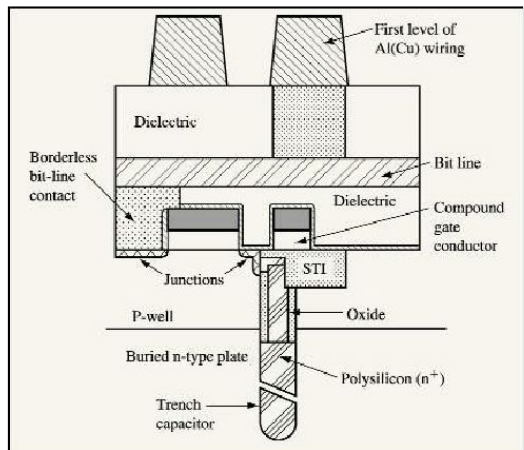


— Example of a 3D nanowire structure fabricated using isotropic etch. (Reprinted from Milanovic, V. and Doherty, L., In *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, 33392, 2002. With permission. Copyright 2002, ASME.)

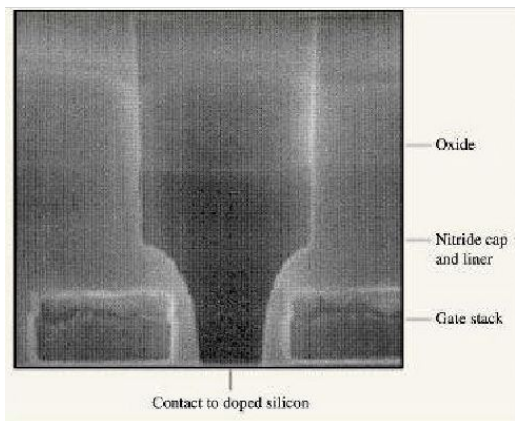


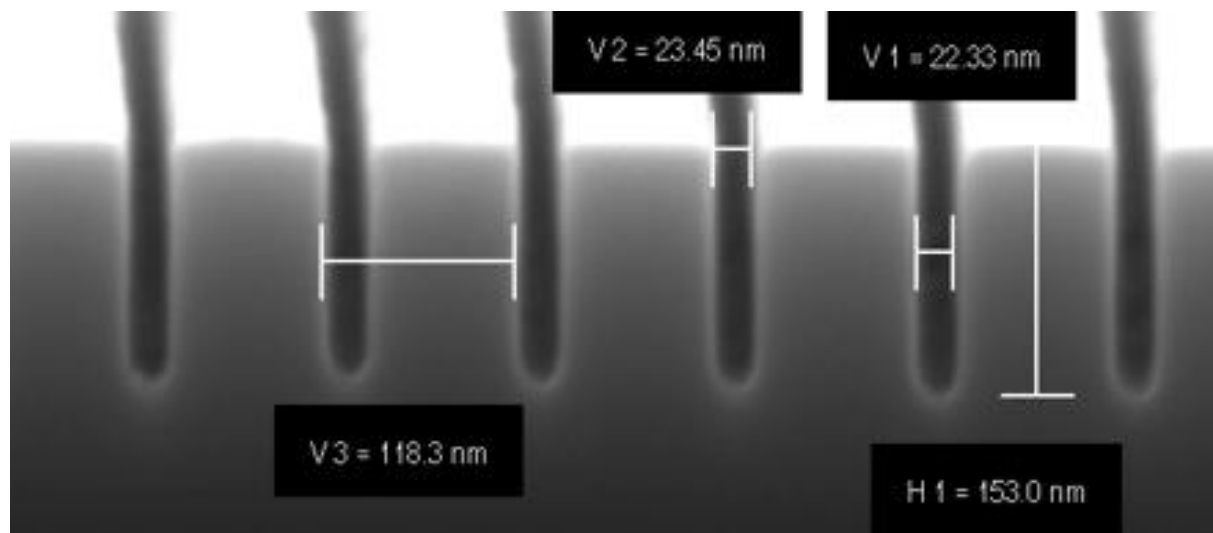
Technology Node	130 nm (2004)	65 nm (2007)	22 nm (2016)
Dynamic random access memory (DRAM) contact in resist (nm)	165	80	30
DRAM contact after etch (nm)	150	70	21
DRAM overlay (nm, 3σ)	46	23	8.8
Microprocessor unit (MPU) half pitch (nm)	150	65	22
MPU gate in resist (nm)	90	35	13
MPU gate length after etch (nm)	65	25	9
MPU gate critical dimension (CD) control (nm, 3σ)	5.3	2.2	0.8
Line edge roughness (LER) (nm, 3σ)	7	2	0.7

Схема типичного 0,25 мкм шелевого конденсатора ячейки ДОЗУ.



Поперечное сечение структуры самосовмещенного контакта.





Линии шириной 22 нм протравленные в кремнии через электронно-лучевой резист. Аспектное отношение 7:1

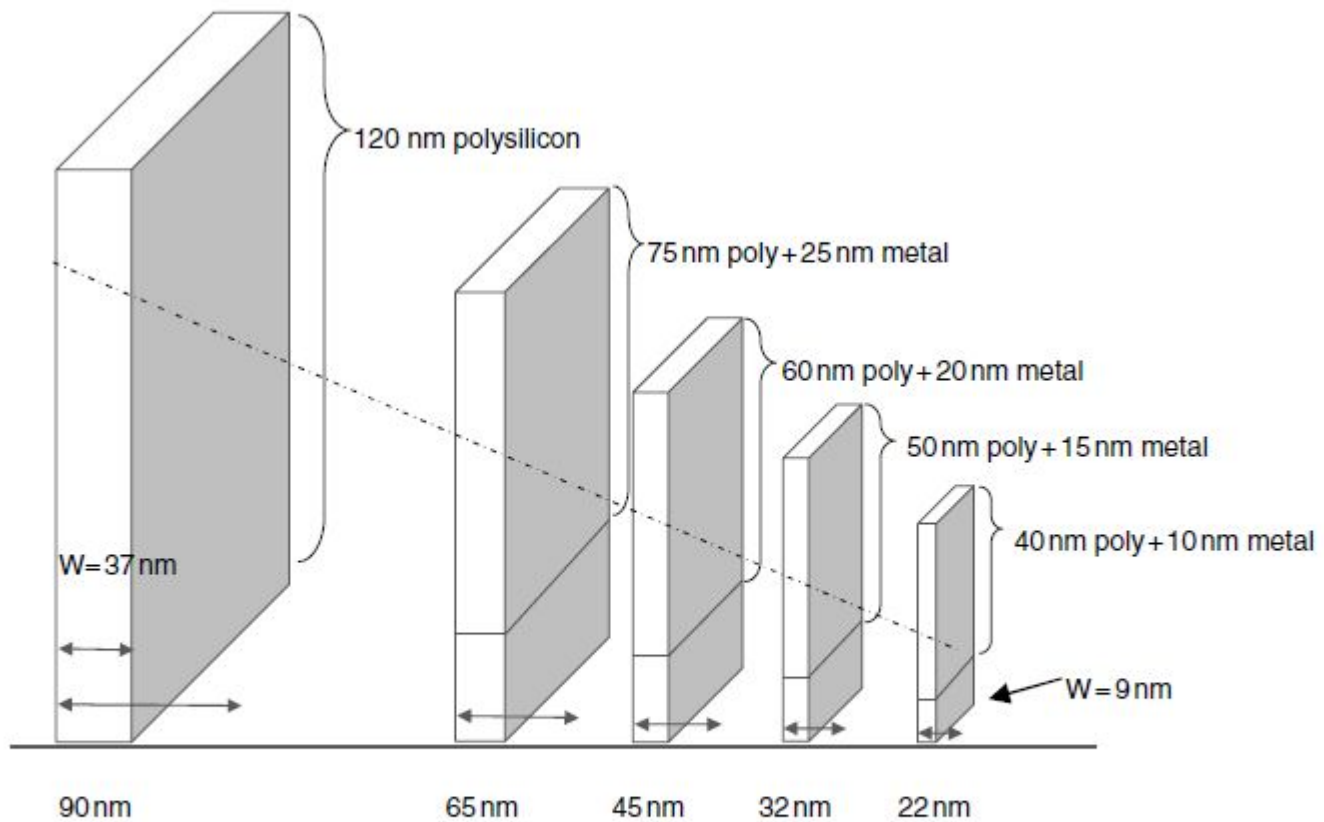
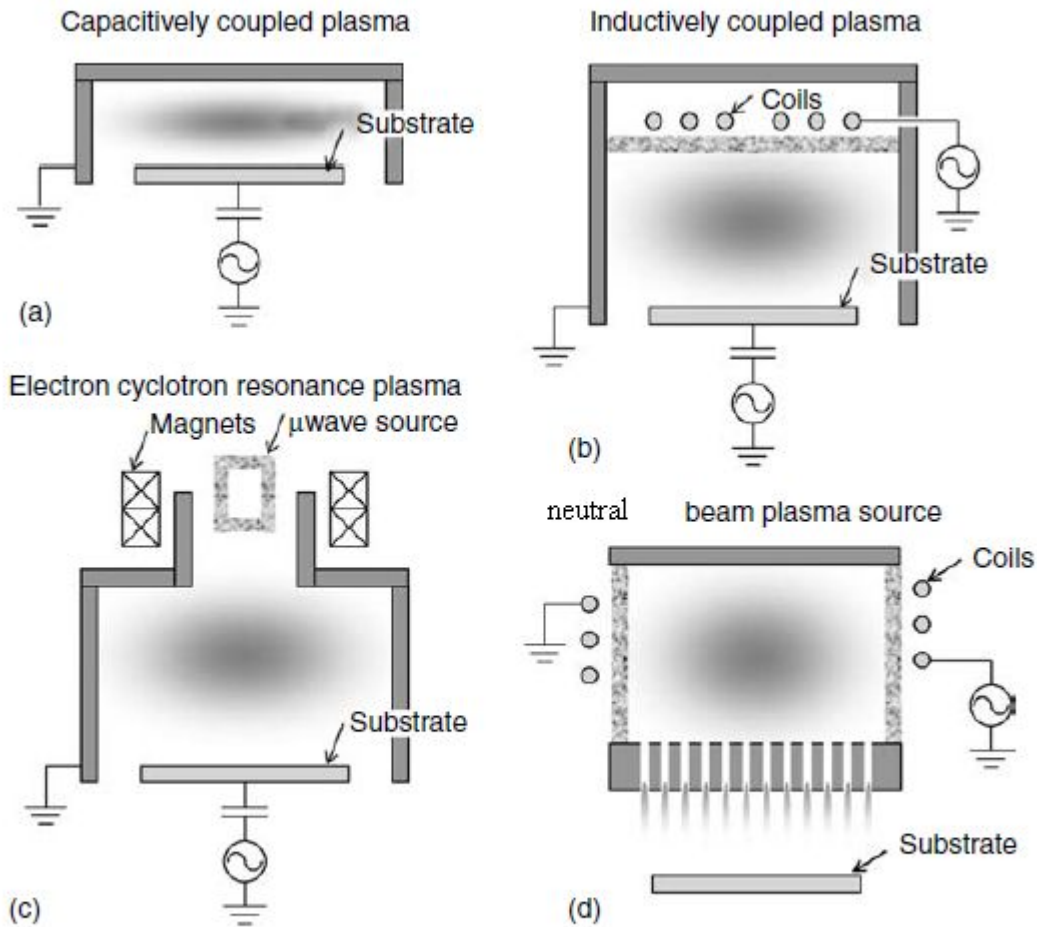


Illustration of the impact of International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) gate electrode scaling on the feature aspect ratio. The dashed line represents the 120 nm aspect ratio.



Plasma etching reactors: (a) capacitively coupled plasma etcher, (b) inductively coupled plasma source, (c) electron cyclotron resonance (ECR) plasma, and (d) neutral beam plasma etcher.

Темы для рефератов:

1. Физико-химические свойства низкотемпературной плазмы. Методы диагностики.
2. Физико-химическое воздействие НГП на обрабатываемую поверхность.
3. Методы контроля окончания процесса травления
4. Влияние операционных параметров процесса травления на результаты травления
5. Системы получения и контроля вакуума.
6. Состав и структура оборудования для травления функциональных слоев ИМС в НГП .
7. Особенности травления: а) полупроводниковых, б) диэлектрических и в) металлических слоев в НГП.

1. Разрешающая способность фоторезиста это:
2. Критерий Рэля для проекционной литографии
3. Как будет меняться скорость плазменного травления материалов с увеличением энергетической составляющей процесса?
4. Какой минимальный размер на сегодняшний день можно получить с помощью фотолитографии?
5. Антиотражающие покрытия применяют начиная с уровня технологии:
6. Чувствительность фоторезиста это:
7. Контраст фоторезиста это:
8. Какой метод обеспечивает более высокую анизотропию травления кремния?
9. Что понимают под селективностью травления?
10. Перечень базовых операций фотолитографии
11. «Lift –off» процесс
12. «паразитные» оптические эффекты, снижающие разрешающую способность
13. Фазосдвигающая маска
14. Формула расчета толщины материала для сдвига по фазе на π
15. Что такое фотолитографический процесс с двойной экспозицией
16. Что такое «эффект близости»
17. Схема литографического процесса с двойным резистом разной полярности
18. РИТ это...
19. ПХТ это...
20. ИТ это
21. Разряд относят к ВЧ, если...
22. К разрядам низкого давления относят разряды, в которых...
23. Регулируемые параметры процессов травления:
24. Закон Пашена
25. Основные выходные параметры процесса травления: