

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
Дисциплина «Технология интегральных микросхем»  
Модуль 7. «Формирование рельефа на поверхности кремния»

## Основные понятия и механизмы плазменного травления.

Классификация процессов плазменного травления. Оборудование для плазменного травления. Современное состояние технологии плазменного травления.

Лектор: Козлов Антон Викторович, к.т.н., доцент

# Лекция 7

# Содержание

Определения понятий травления и плазмы.

Назначение и виды химического травления.

Назначение физического травления.

Классификация процессов травления.

Назначение и проведение процесса ионного травления.

Ионно-химическое травление.

Плазмохимическое травление.

Лазерно-стимулированное травление.

Применение плазменных технологий в производстве УБИС.

Примеры конструкций установок.

- Под **травлением** понимают растворение и последующее удаление заданной части материала с поверхности в целях полировки, изменения формы, очистки от загрязнений, а также для выявления структуры поверхности материала. Первые процессы из перечисленных выше относят к *технологическим*, а вторые – к *структурным*. В микроэлектронике используют процессы *технологического травления*, которые делят на химические, физические и физико-химические методы.
- **Плазма** – частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности отрицательных и положительных зарядов практически одинаковы.

## Определения травления и плазмы

- *Химическое травление* основано на процессах растворения исходных материалов. Травление может осуществляться как в жидких, так и в газообразных средах. При этом обрабатываемый материал частично претерпевает химические изменения.
- Различают следующие виды химического травления:
  - – изотропное растворение полупроводника с одинаковой скоростью травления по всем направлениям, которое применяют для удаления нарушенного слоя или полирования поверхности (а);
  - – анизотропное травление – растворение полупроводника с различной скоростью по разным направлениям монокристалла (б);
  - – селективное травление – растворение полупроводника с различной скоростью на разных участках поверхности с различным химическим составом;
  - – локальное травление – удаление материала со строго ограниченных и заданных участков полупроводника, которое обеспечивает получение заданного рельефа поверхности;
  - – послойное травление – равномерное последовательное снятие тонких поверхностных слоев.

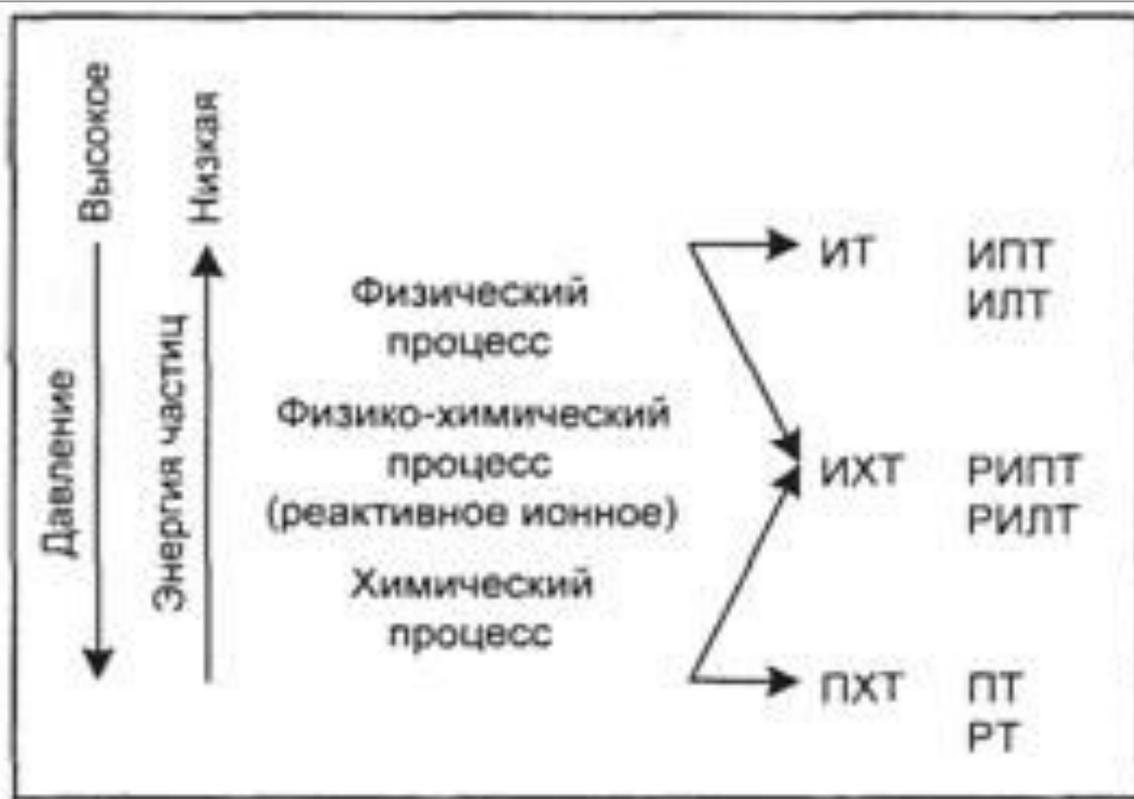


Изотропный с боковым подтравом (а) и анизотропный характер травления (б)

## Назначение и виды химического травления

- К физическим процессам травления относятся процессы травления, в которых удаление ненужного материала происходит путем физического распыления с помощью ионов газа.
- Этот процесс называют *сухим травлением* и основан на использовании компонентов низкотемпературной газоразрядной плазмы – ионов, электронов, возбужденных атомов.

## Назначение физического травления



Характер процессов меняется от чисто физического процесса расплавления до химического процесса сухого травления.

К процессам травления предъявляются требования высокой селективности, отсутствия деградирующего влияния на свойства и размеры защитных масок, низкого уровня загрязненности поверхности материала и искажения полученного рельефа, высокой воспроизводимости и равномерности травления, минимального уровня загрязнения окружающей среды.

**Классификация процессов в зависимости от сочетания давления и энергии ионов плазмы**

- *Ионное травление* осуществляется ионами плазмы, не реагирующими с обрабатываемым материалом. Этот процесс также называют травлением-распылением.
- Ионное травление полупроводниковых структур осуществляется в реакторах со встроенными ВЧ-системами. Конструктивное решение таких реакторов может быть самым разнообразным с использованием диодной (а) и триодной системы (б), с распылителем магнетронного типа (в) и т. д. Для обеспечения процесса ионного травления необходимо соблюсти следующие условия:
  - – травление структур должно осуществляться без существенной деградации электрофизических характеристик;
  - – травление большого количества подложек желательно максимального размера с высокой скоростью и достаточной равномерностью;
  - – минимальное загрязнение образцов инородными материалами;
  - – максимальная эффективность использования подводимой мощности;
  - – контроль скорости травления с возможностью фиксации границ слоев в многослойных структурах.

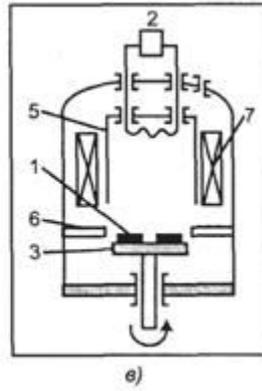
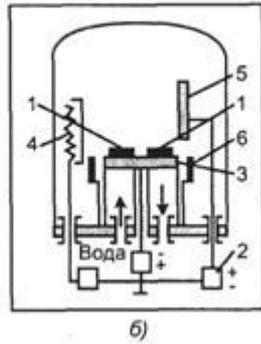
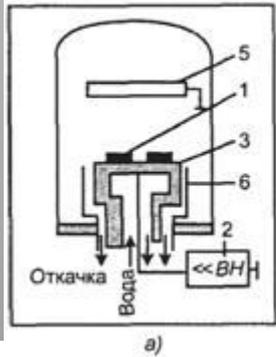


Схема конструктивного решения установок ионного травления и распыления:

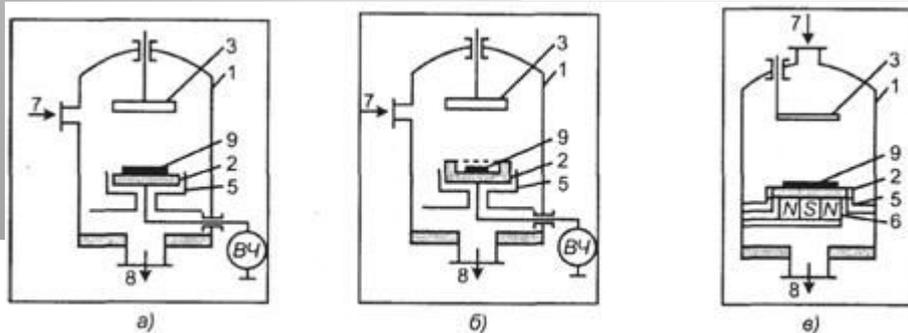
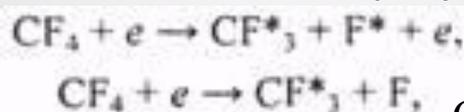
- 1 – мишень, в которой формируются статические неоднородности;
- 2 – источник питания, в т. ч. ВЧ-источники;
- 3 – мишень; 4 – термокатод; 5 – анод;
- 6 – экран; 7 – электромагнит.

## Назначение и условие проведение ионного травления

- Отсутствие селективности травления, к. с. ограничивается глубиной травления, которая должна быть соизмерима с толщиной маски;
- Разогрев пластин, в результате чего маска либо "задубливается", либо разрушается вообще;
- Процесс не позволяет получать субмикронные неоднородности в слоях рабочих материалов толщиной 0,1 – 0,3 мкм через органические маски.

## Недостатки процесса ионного травления

- **Ионно-химическое травление (ИХТ)** представляет собой физико-химический процесс, который происходит при достаточно высоком давлении газов и значительной энергии частиц.
- Поверхностные слои материала удаляются с помощью физического распыления ионами, а также в результате химической реакции между активными частицами и поверхностными атомами. В этом процессе различают *реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ)*, в процессе которого обрабатываемый материал находится в области плазмы, и *реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ)*, при проведении которого материал помещают в вакуумной зоне обработки. В первом случае химически активные частицы могут доставляться к поверхности из плазмы разряда и образовываться на поверхности при ударной диссоциации молекулярных ионов или нейтрализации атомарных ионов. Во втором случае на поверхность воздействуют только молекулярные или атомные ионы, способные образовывать химически активные частицы при ударной диссоциации или нейтрализации. В процессах ИХТ используются различные фреоны: CF<sub>4</sub>, CClF<sub>3</sub>, CClF<sub>2</sub>, CHClF<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> и т. д. В высокочастотном разряде молекулы фреона переходят в возбужденное состояние и образуют реакционноспособные радикалы, например:



Схемы установок для ионно-химического травления: 1 – камера; 2 – ВЧ-электрод; 3 – заземленный электрод; 4 – третий электрод; 5 – экран, 6 – магнитная система; 7 – натекатели; 8 – откачка; 9 – образец.

- **Плазмохимическое травление** (ПХТ) происходит в результате химических реакций между химически активными частицами и поверхностными атомами материала.
- Если обрабатываемый материал находится в области плазморазряда, то процесс травления называется плазменным (ПТ). В этом процессе химические реакции травления будут активизироваться низкоэнергетической бомбардировкой как электронов, так и ионов.
- Если же материал находится в вакуумной (реакционной) зоне обработки, то травление производят только химически активные частицы без дополнительной электронной или ионной бомбардировки. Это так называемый процесс радикального травления (РТ).

## Плазмохимическое травление

- В плазменном травлении химически активные частицы (свободные атомы и радикалы) вступают в химическую реакцию с поверхностными атомами образца и удаляют поверхностные слои в результате образования летучих продуктов реакции. Роль электронов и ионов, присутствующих в плазме, заключается в увеличении скорости травления. Активирующее действие электронов и ионов определяется их энергией.
- Генерация энергетических и химически активных частиц для процесса плазменного травления осуществляется в реакторе диодного типа (рис.1). Плазменное травление осуществляется при энергиях ниже 100 эВ. В реакторах, использующих процессы радикального травления, подложки вынесены из области плазмы, и обработка идет по механизму гетерогенной химической реакции. При этом реакция не осложняется воздействием загрязненных частиц.

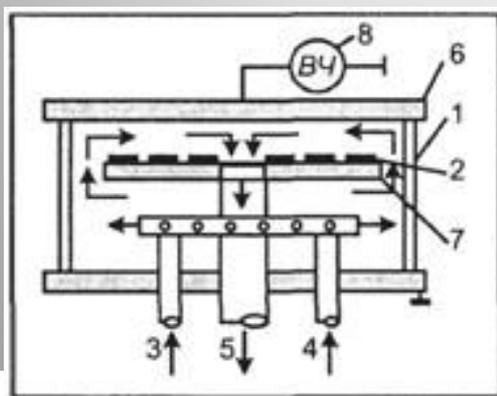


Схема конструкций для плазменного травления:  
 1 – вакуумная камера; 2 – образцы; 3 – газ-травитель;  
 4 – газ; 5 – откачка продуктов реакции;  
 6 – верхний электрод; 7 – нижний электрод и стол;  
 8 – генератор ВЧ.

## Назначение ПХТ и конструкция реактора

- Лазерно-стимулированное травление – перспективный метод травления поверхности, в котором используется лазерное излучение с энергией фотонов от 0,1 эВ (ИК-излучения) до 6 эВ (УФ-излучения) для активизации травящих частиц на поверхности твердого тела.
- Такие возбужденные частицы способствуют разрыву поверхностных связей или десорбции в газовую фазу. Они также способствуют ускорению химического воздействия между различными адсорбатами, адсорбатом и адсорбентом. Все это позволяет использовать процессы травления с возбуждением и нагревом поверхности для проекционного травления металлов и диэлектриков.
- Процессы лазерно-стимулированного травления представляют собой качественно новый вид обработки материалов. Эти процессы основаны на управлении локальными химическими реакциями и фазовыми изменениями на границах раздела "твердое тело – газ" и "твердое тело – жидкость" с помощью лазерного излучения.
- Этот метод позволяет получать требуемый рисунок с топологическими нормами субмикронных размеров.

## Лазерно-стимулированное травление

Поперечное сечение структуры самосовмещенного контакта

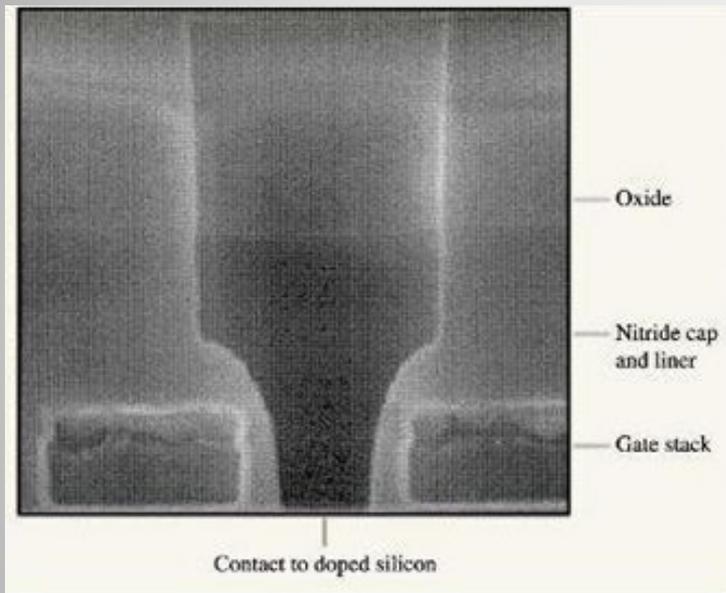
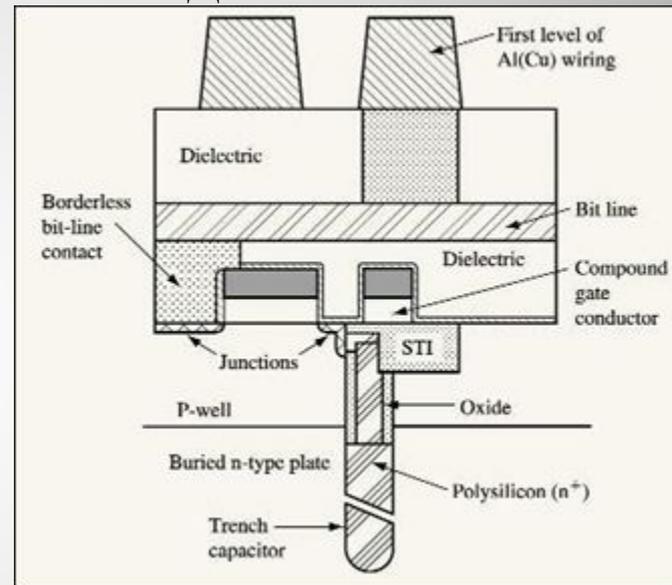


Схема типичного 0,25 мкм щелевого конденсатора ячейки ДЗУ



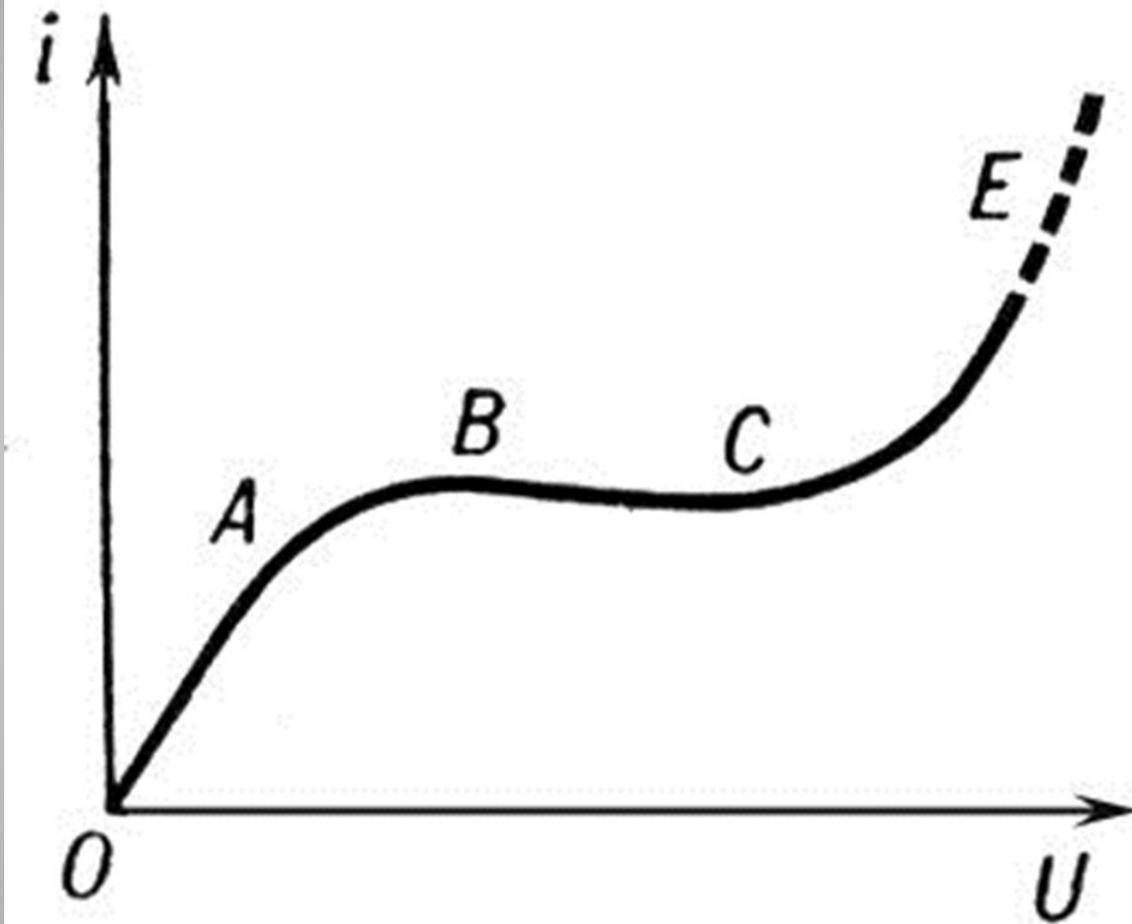
**Применение плазменных технологий в производстве УБИС**

- **Плазмой** называют квазинейтральный газ заряженных и нейтральных частиц, концентрация которых достаточно 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  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная вакуума,  $k_B$  -  $T_e, T_i$  - температуры электронов и ионов,  $e, e_i$  - заряды электронов и ионов,  $n_i, n_e$  - ионная и электронная концентрации).

- Газы становятся электропроводными при их ионизации.
- Если электрический разряд в газах (Э. р. в г.) происходит только при вызывающем и поддерживающем ионизацию внешнем воздействии (при действии т. н. внешних ионизаторов), его называют несамостоятельным газовым разрядом.
- Э. р. в г., продолжающийся и после прекращения действия внешнего ионизатора, называется самостоятельным.

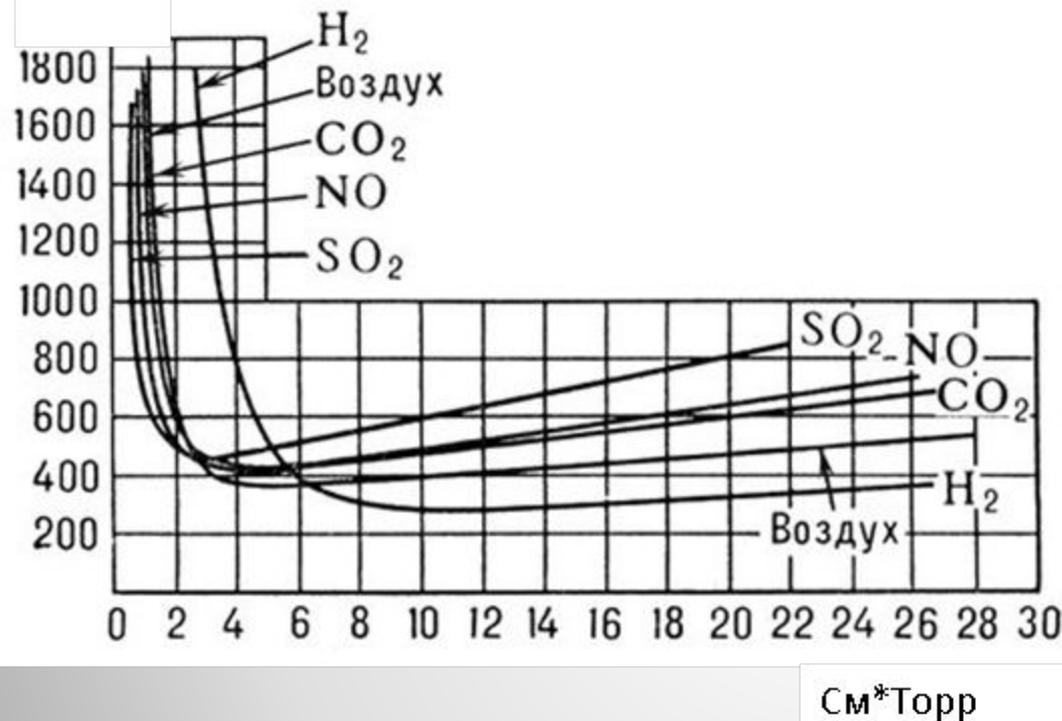
## Условия несамостоятельного и самостоятельного э.р. В г.



**Зависимость тока заряда от напряжения (рис.1)**

- Когда ионизация газа происходит при непрерывном действии внешнего ионизатора и малом значении разности потенциалов между анодом и катодом в газе, начинается «**тихий разряд**».
- При повышении разности потенциалов (напряжения) сила тока тихого разряда сперва увеличивается пропорционально напряжению (участок кривой OA на рис. 1), затем рост тока с ростом напряжения замедляется (участок кривой AB), и когда все заряженные частицы, возникшие под действием ионизатора в единицу времени, уходят за то же время на катод и на анод, усиления тока с ростом напряжения не происходит (участок BC).
- При дальнейшем росте напряжения ток снова возрастает и тихий разряд переходит в несамостоятельный лавинный разряд (участок CE на рис. 1). В этом случае сила тока определяется как интенсивностью воздействия ионизатора, так и газовым усилением, которое зависит от давления газа и напряжённости электрического поля в пространстве, занимаемом разрядом.
- Переход несамостоятельного Э. р. в г. в самостоятельный характеризуется резким усилением электрического тока (точка E на кривой рис. 1) и называется электрическим пробоем газа. Соответствующее напряжение  $U_3$  называется **напряжением зажигания**.

В

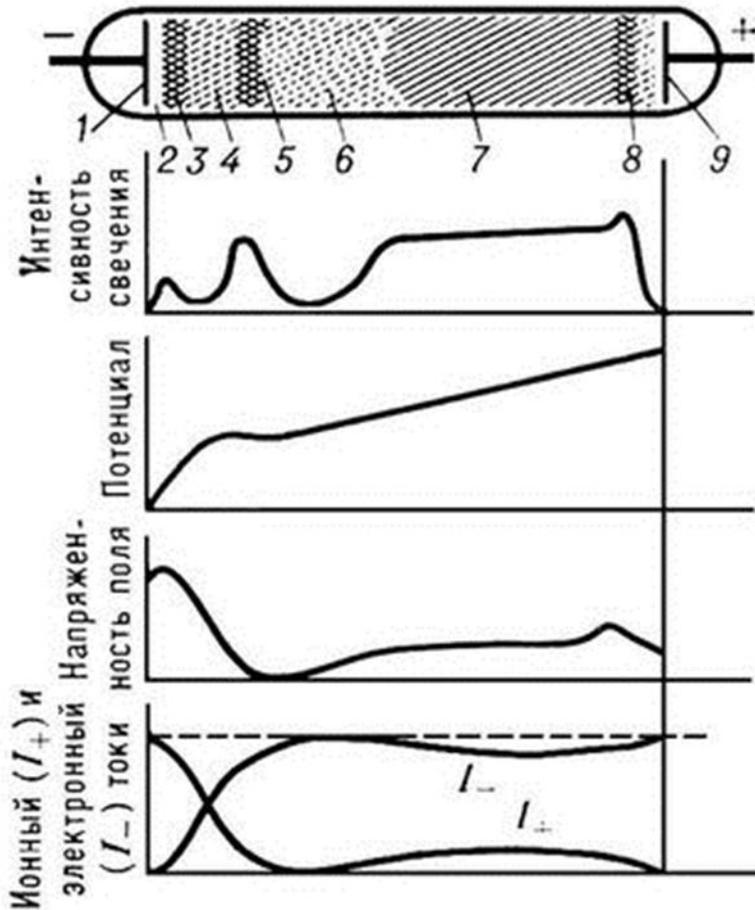


Закон Пашена, устанавливает, что наименьшее напряжение зажигания газового разряда между двумя плоскими электродами (в однородном электрическом поле) есть величина постоянная (и характерная для данного газа) при одинаковых значениях  $pd$ , где  $p$  — давление газа,  $d$  — расстояние между электродами.

## Кривые Пашена для различных газов



**Вольтамперная характеристика  
тихого разряда**



Обозначения:

1 — астоново тёмное пространство;

2 — катодное свечение;

3 — катодное тёмное пространство;

4 — отрицательное свечение.

5- фарадеево темное пространство,

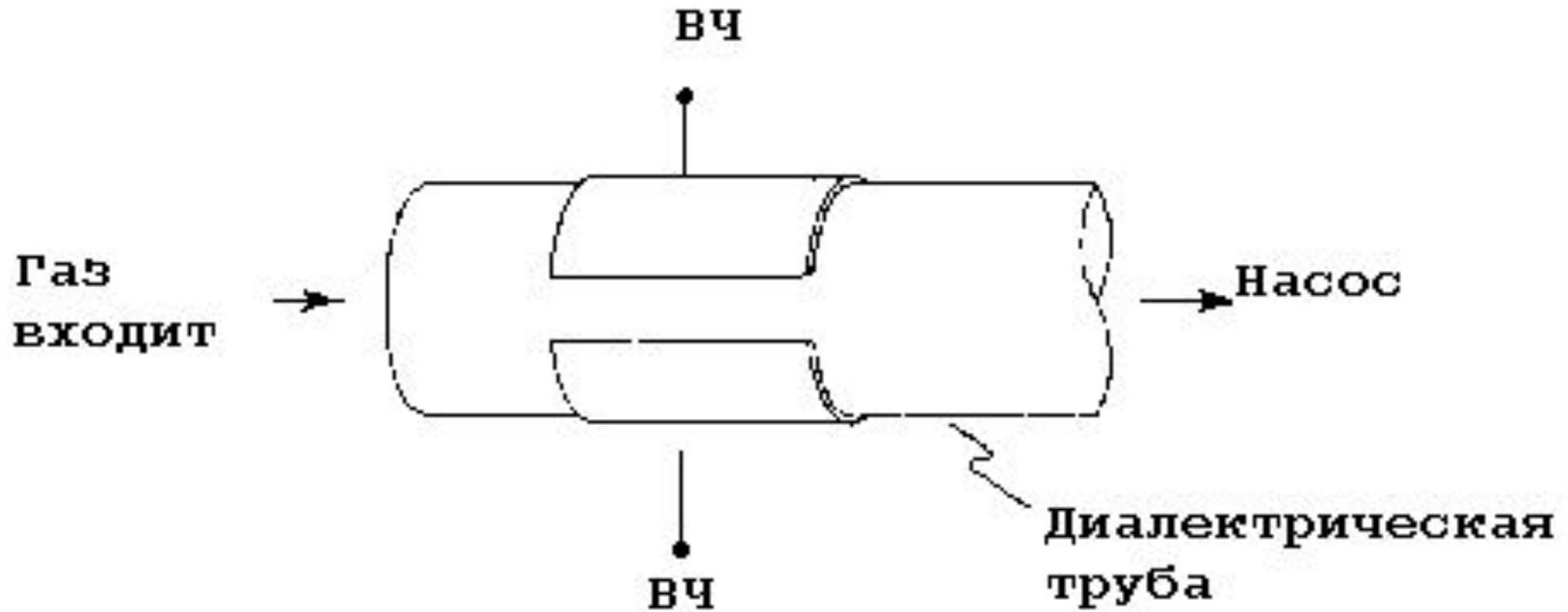
6- положительный столб,

7-анодное темное пространство,

8 – анодное свечение.

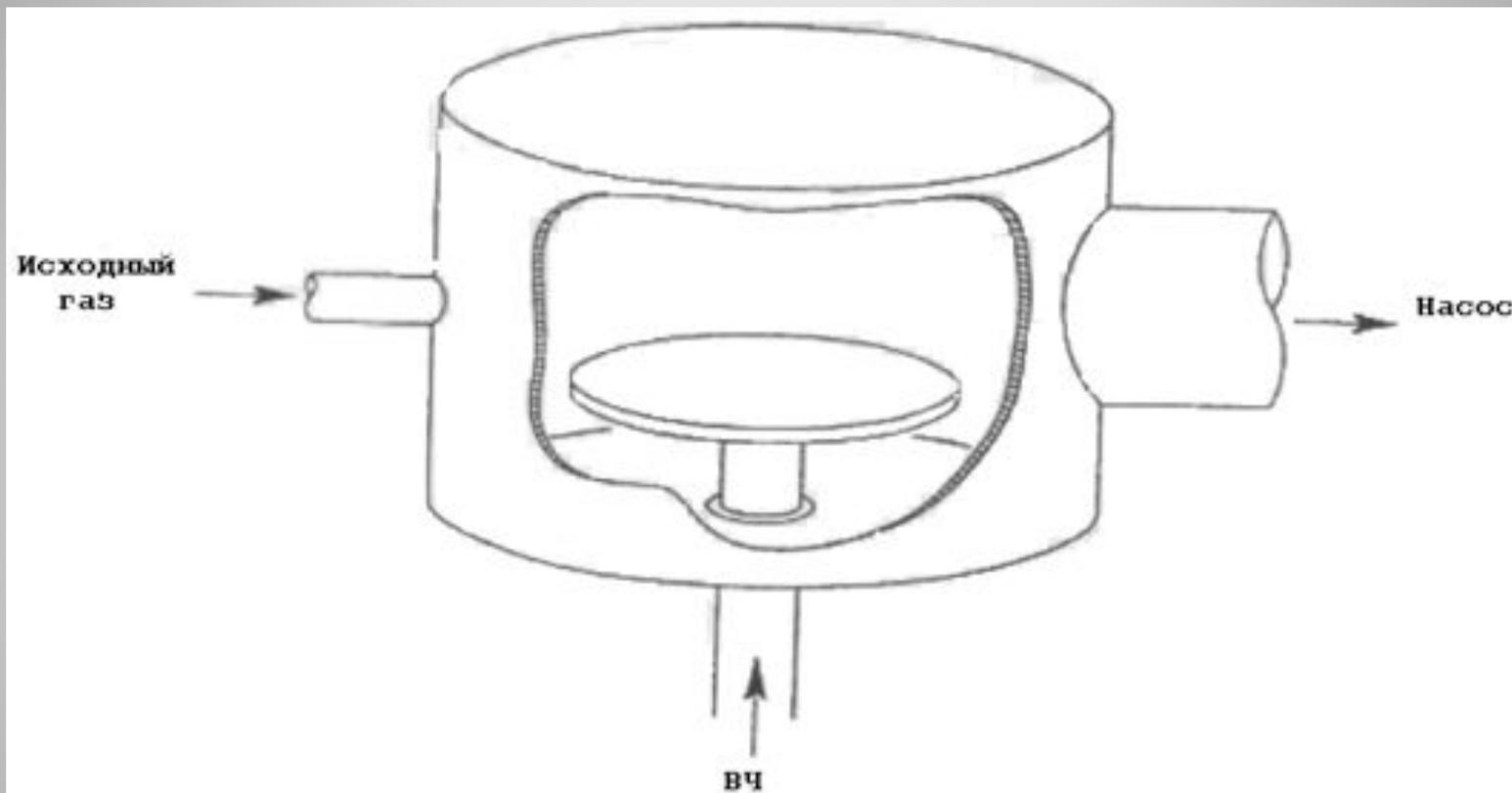
**Внешний вид и распределение параметров в нормальном тлеющем разряде**

- 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 функция распределения электронов (ФРЭ) определяется всем распределением электрических полей в разряде. Такой режим наблюдается при  $P L < 1$  Торр\*см.



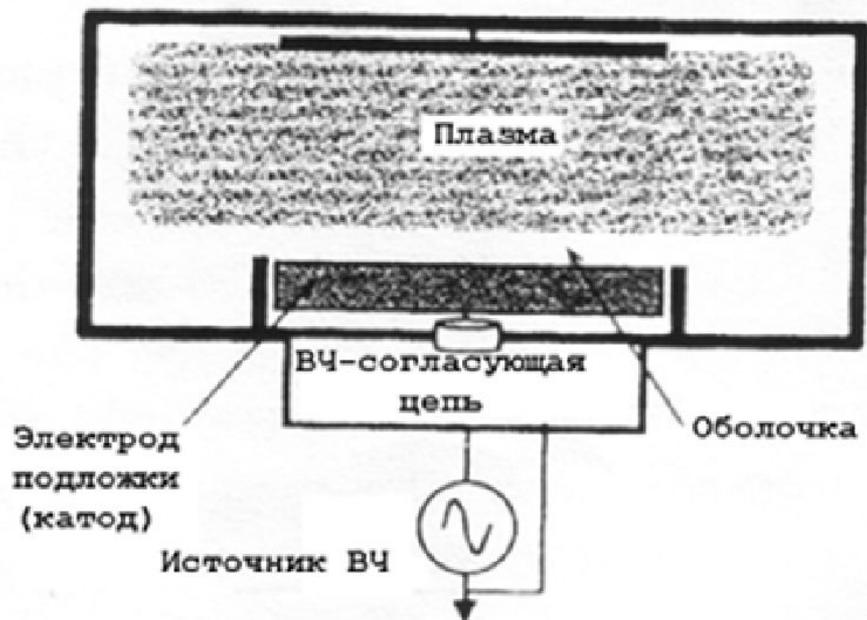
Конфигурация объемно-цилиндрического реактора использовалась для обработки поверхностей в случаях, где не требовалась бомбардировка энергетических ионов

## Системы возбуждения ВЧ - разрядов

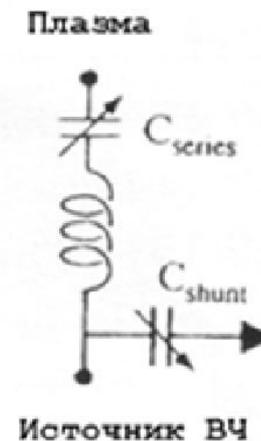


## Конфигурация плоского диода

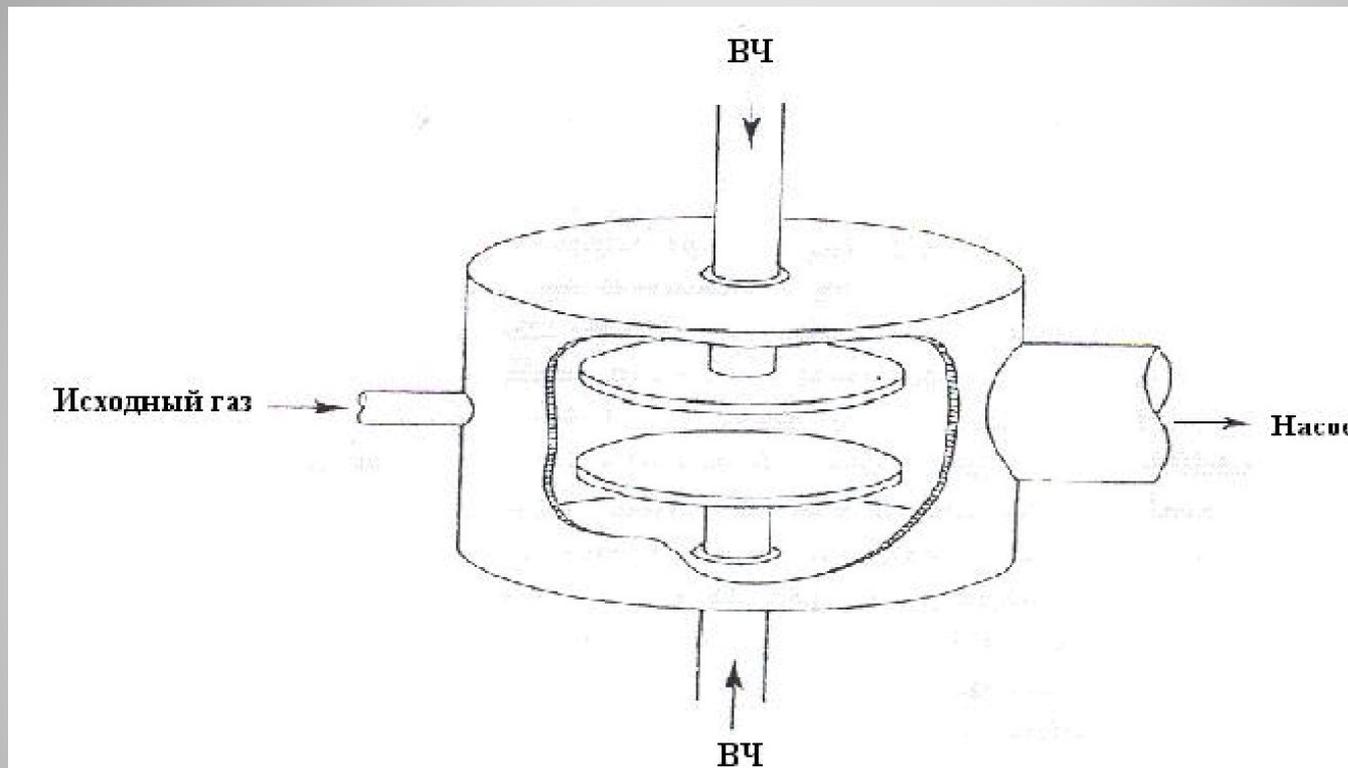
Емкостный источник плазмы.



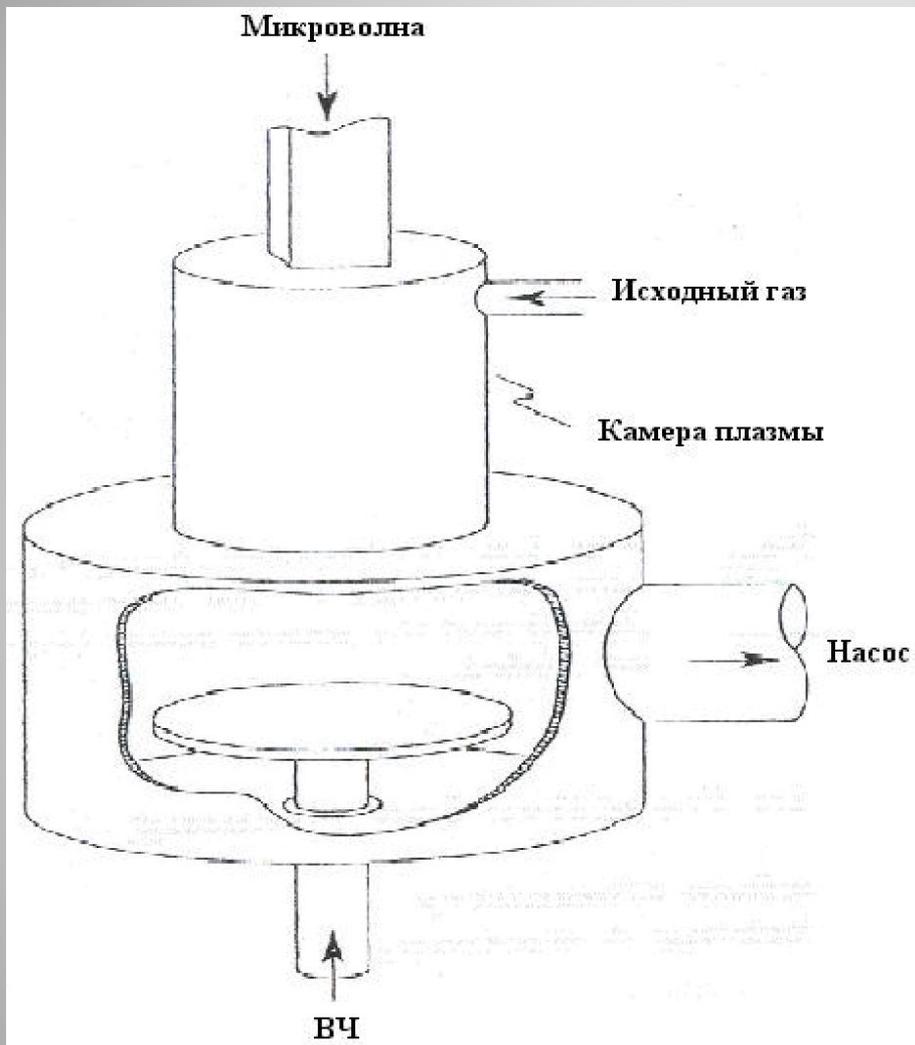
Согласующая цепь "L"



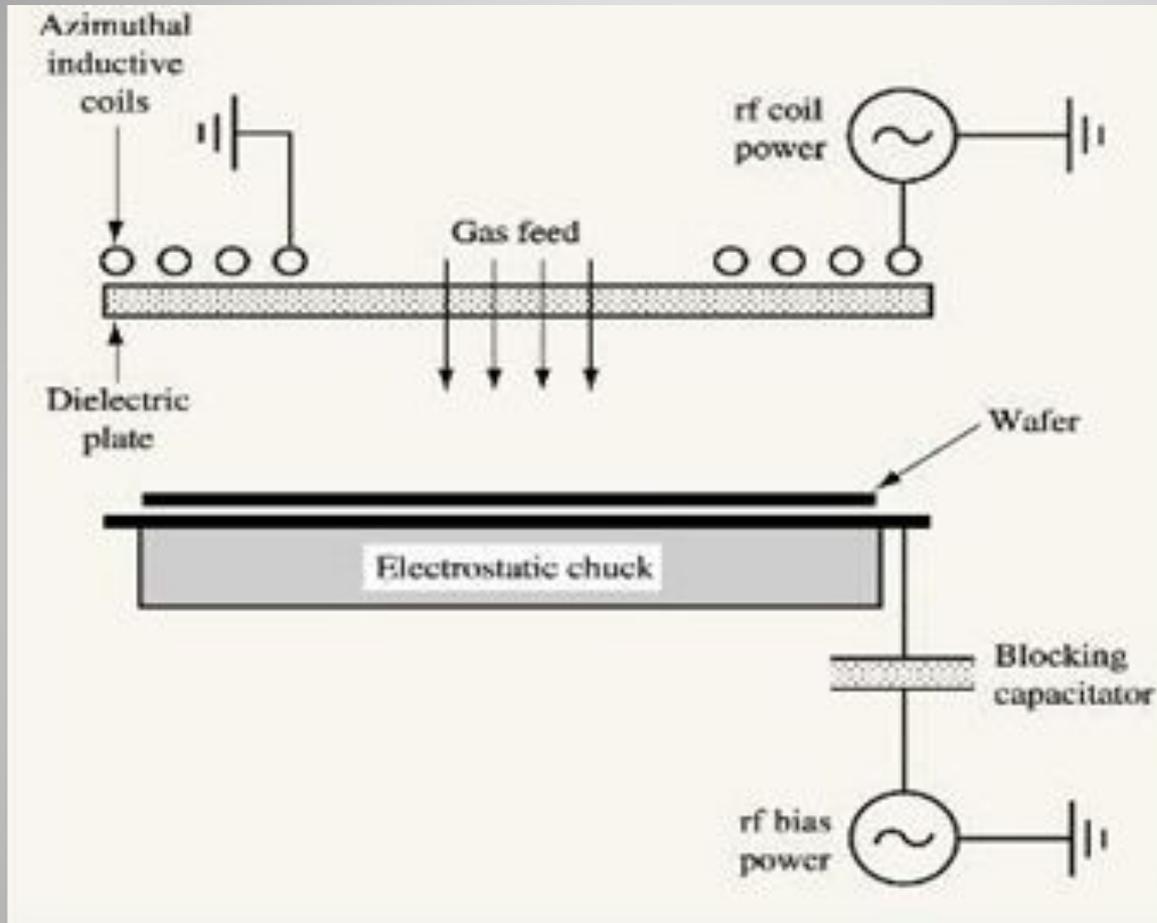
**Емкостной источник и ВЧ-согласующая цепь**



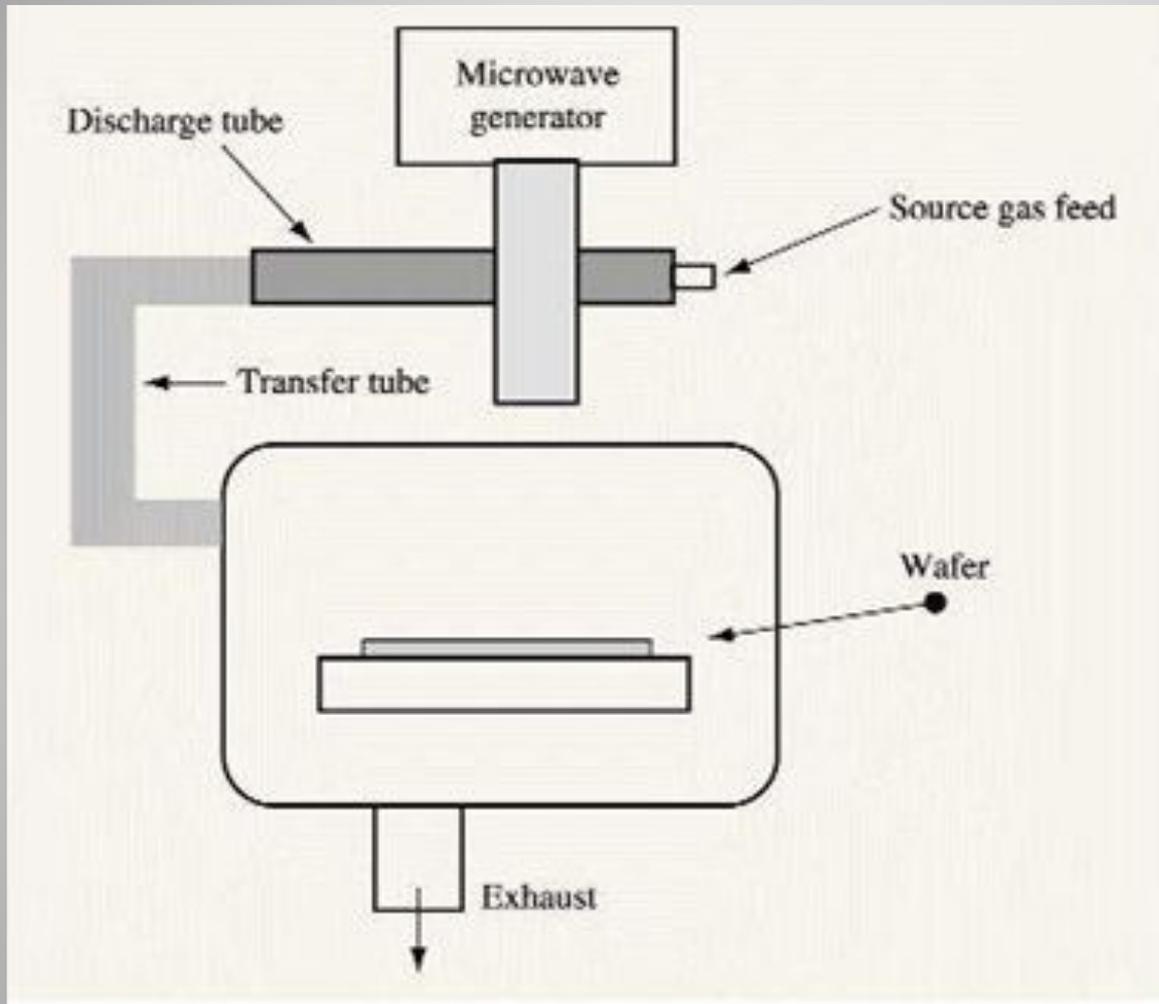
**Геометрия плоского триода, в котором ВЧ напряжения приложены на два электрода и, в которой заземленная стенка служит третьим электродом**



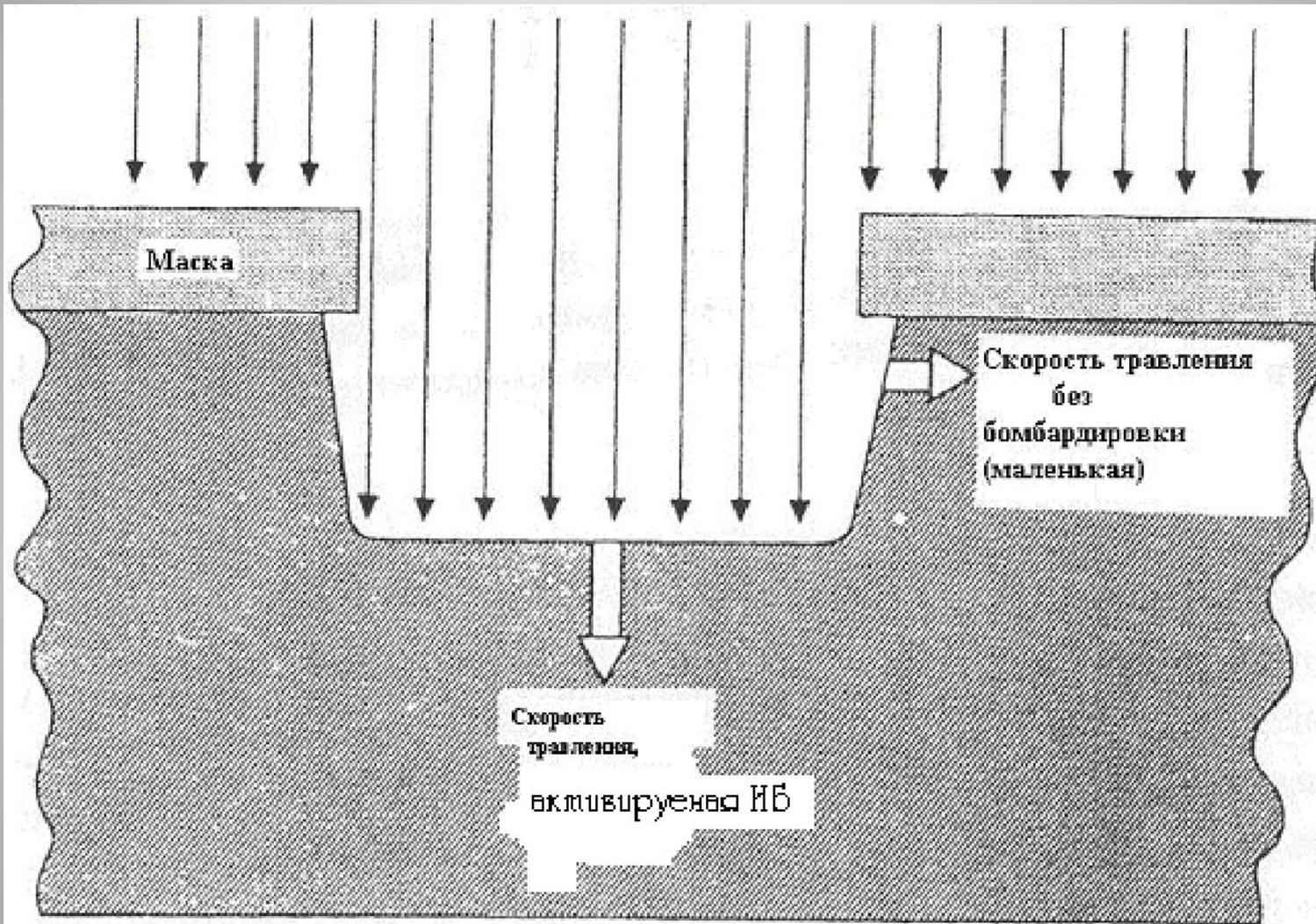
**Один из вариантов СВЧ - системы**

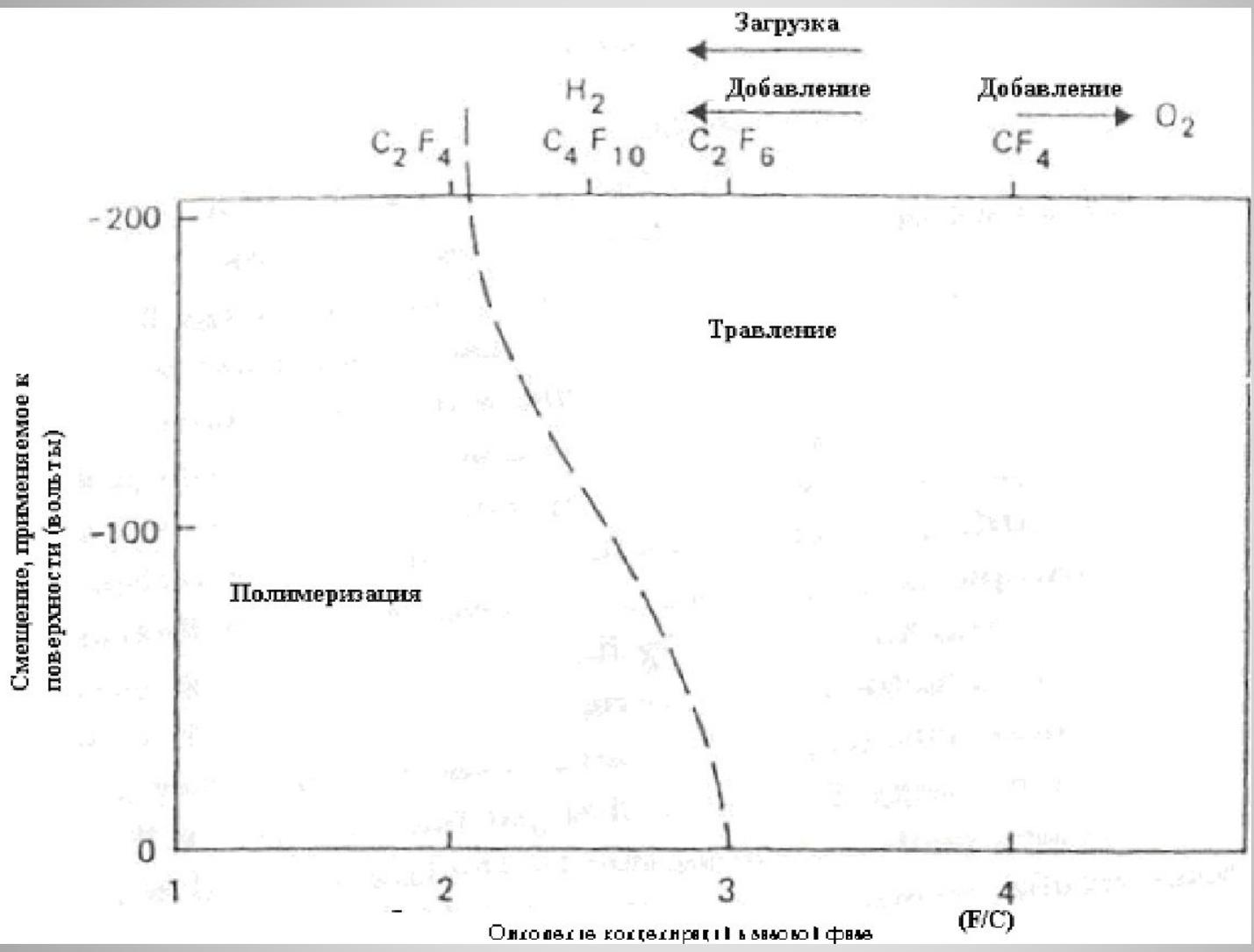


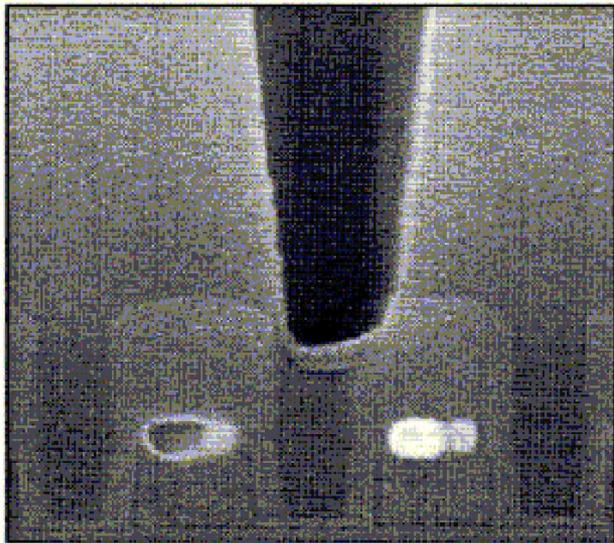
## Типичный реактор индукционно связанной плазмы (ИСП)



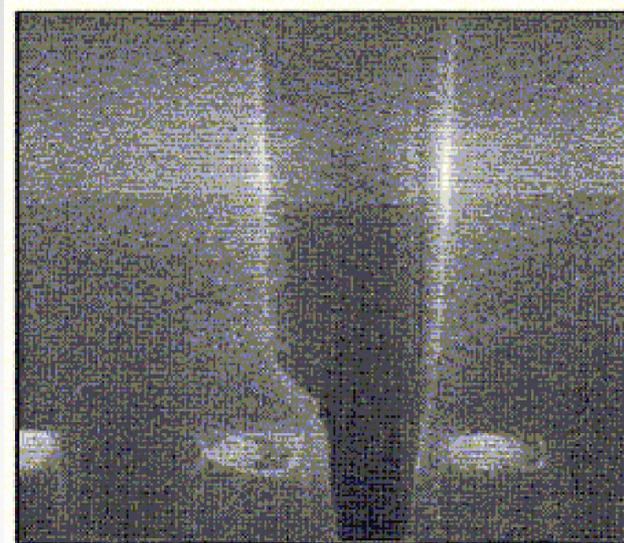
## Схемное решение CDE реактора







(a)



(b)

**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.**

## Контрольные вопросы по четвертой теме:

1. Дайте определения понятий травления и плазмы?
2. Укажите назначение и виды химического травления?
3. Укажите назначение физического травления?
4. Проведите классификация процессов травления?
5. Дайте назначение процесса ионного травления?
6. Дайте назначение ионно-химическому травлению?
7. Укажите особенность плазмохимического травления?
8. Дайте определение лазерно-стимулированному травлению?
9. Укажите применение плазменных технологий в производстве УБИС?
10. Приведите примеры конструкций установок?

## Список источников литературы по теме:

1. Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; Под ред. Ю. А. Чаплыгина. - 3-е изд., электронное. - М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2015. - 400 с.
2. Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 2 : Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М. А. Королев; Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - 3-е изд., электронное.
3. А.А. Голишников, А.Ю. Красюков, С.А. Поломошнов, М.Г. Путря, В.И. Шевяков / Лабораторный практикум «Основы технологии электронной компонентной базы, под ред. Ю.А. Чаплыгина, М., МИЭТ, 2013. 176 с.
4. ru.wikipedia.org
5. <http://3ys.ru>
6. <http://window.edu.ru/resource/529/69529/files/vppt.pdf>
7. А.В. Волков / Исследование технологических режимов плазменного ионно-химического травления на установке “Caroline PE15” // Самара 2013, электронное учебно-методическое пособие.
8. А.М. Ефремов, В.И. Светцов, В.В. Рыбкин / Вакуумно-плазменные процессы и технологии // Иваново 2006, учебное пособие.

# Спасибо за внимание!

Козлов Антон Викторович

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