

# Системы создания плазмы

Полосаткин Сергей Викторович, тел.47-73

пятница, 10.45 – 12.20

<http://www.inp.nsk.su/students/plasma/sk/tpe.ru.shtml>

# Системы создания плазмы

Современные плазменные установки требуют создания начальной (мишенной) плазмы

Поверхностная ионизация – Q машина

Ионизация излучением (фотоионизация)

Ионизация электронами (газовый разряд)

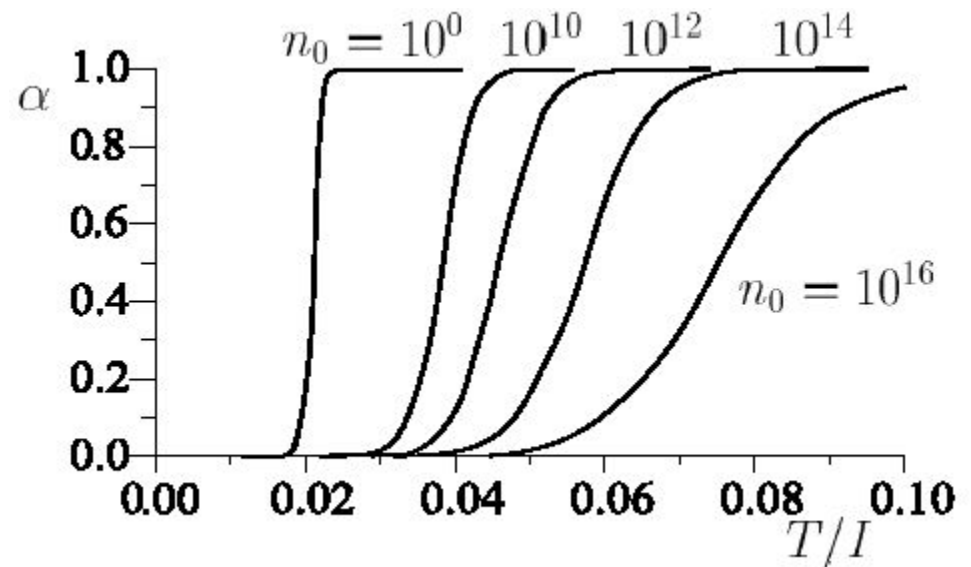
# Q - машина

Термическая ионизация

Формула Саха: 
$$\frac{n_i^2}{n_a} \sim \frac{1}{\lambda_{dB}^3} e^{-I/KT}$$

Водород – 13,6 эВ

Цезий – 3,89 эВ



# Q - машина

Термическая ионизация

Формула Саха-Ленгмюра:

$$\frac{n_i}{n_a} = \frac{g_i}{g_a} e^{(\varphi - I)/KT}$$

$I$  – потенциал ионизации

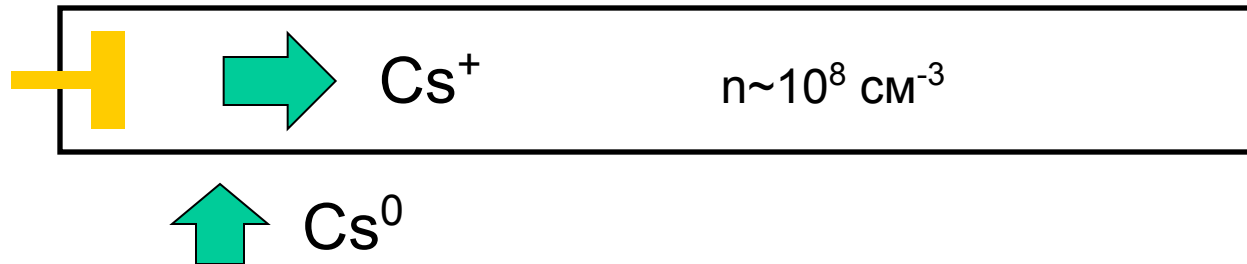
Водород – 13,6 эВ

Цезий – 3,89 эВ

$\varphi$  – работа выхода

Вольфрам  $\varphi = 4,5$  эВ

$T = 2500$  К

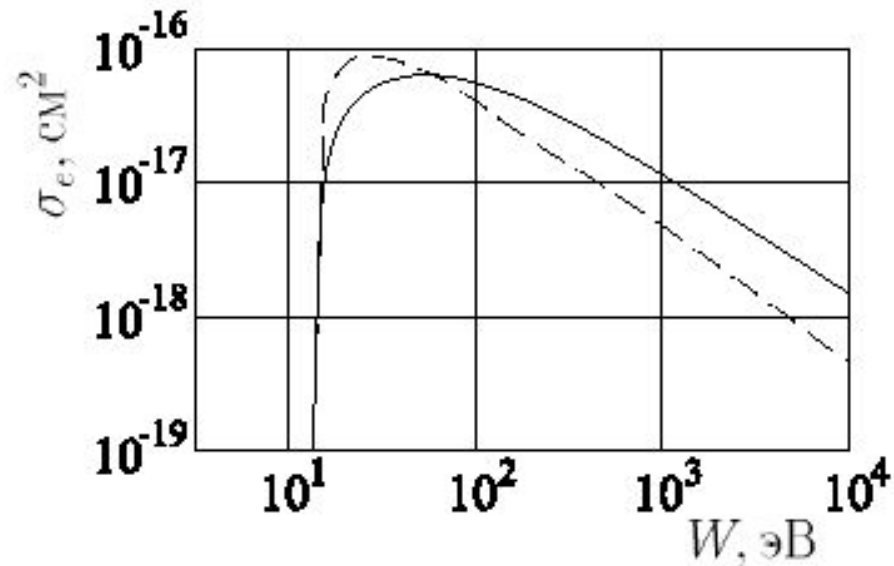


# Ионизация излучением

Однофотонная ионизация  $h\nu > I \sim 13 \text{ эВ}$  – вакуумный ультрафиолет ( $\lambda \sim 100 \text{ нм}$ )

Многофотонная ионизация – пробой в поле излучения  
Требуется источник излучения с большой плотностью энергии (лазер)

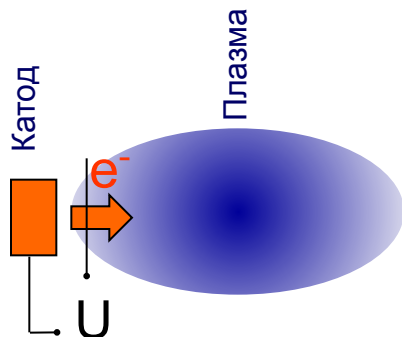
## Ионизация электронным ударом



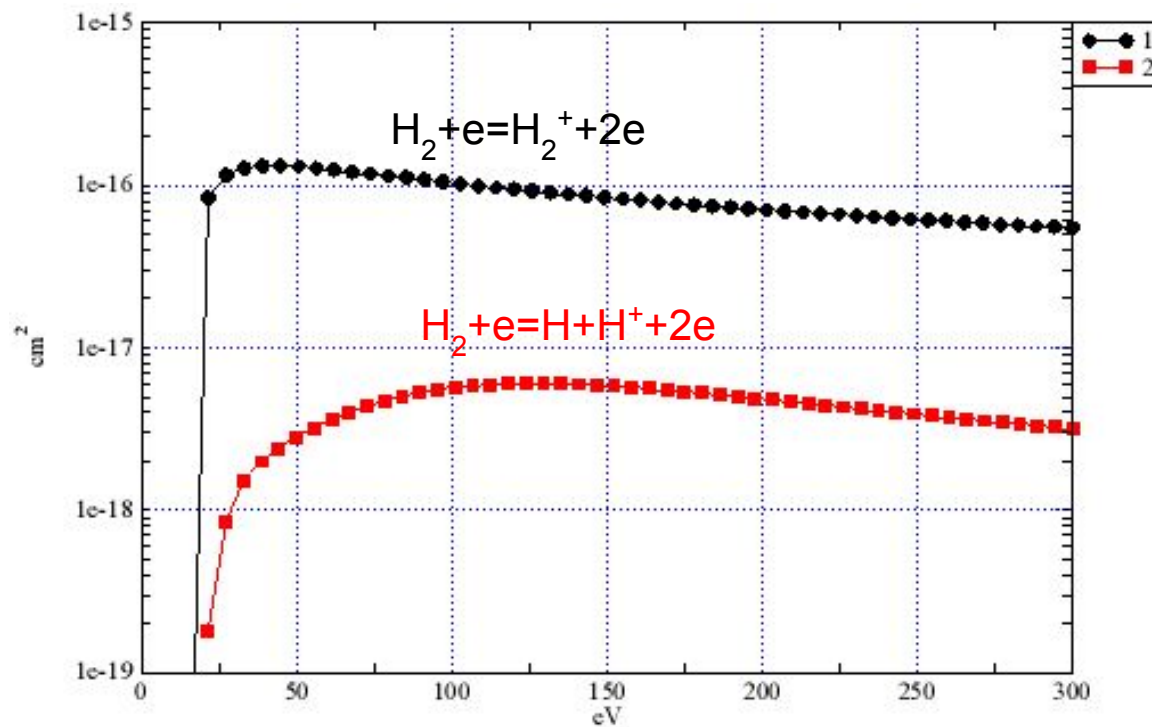
$$\sigma_e = \pi a_b^2 \frac{4I(W - I)}{W^2}$$

Сечение ионизации (формула Томсона)

# Ионизация внешними электронами (несамоподдерживающийся разряд)



Сечение ионизации молекулярного водорода



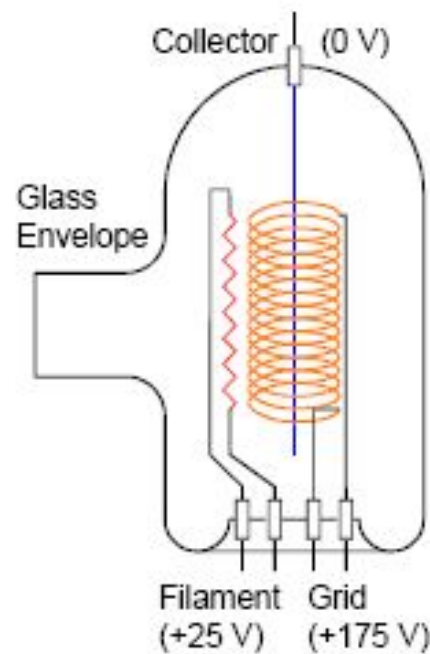
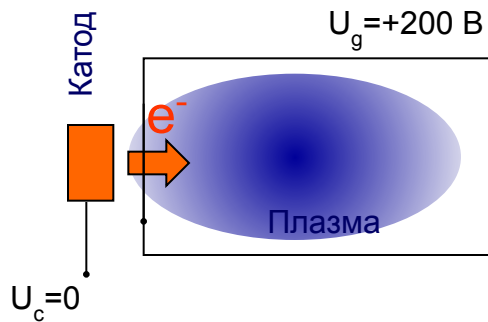
(база данных ALADDIN: <http://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>)

Доля атомарного водорода 3-6%

# Ионизация внешними электронами

## Разряд с осциллирующими электронами

При концентрации газа  $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$  необходимо многократное прохождение электронов через рабочий объем



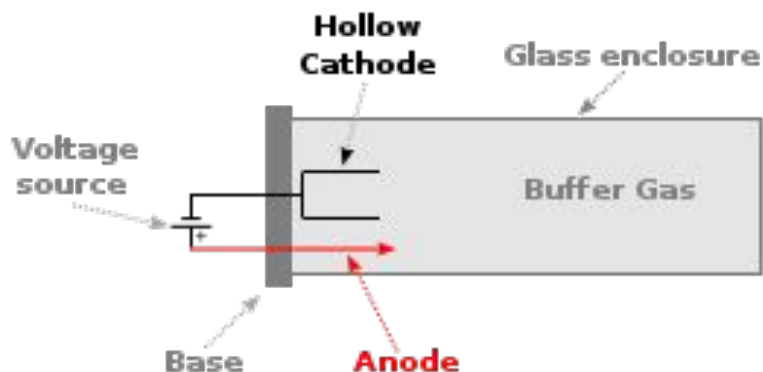
Ионизационная лампа Байарда-Альперта



# Разряд с осциллирующими электронами

## *Разряд с полым катодом*

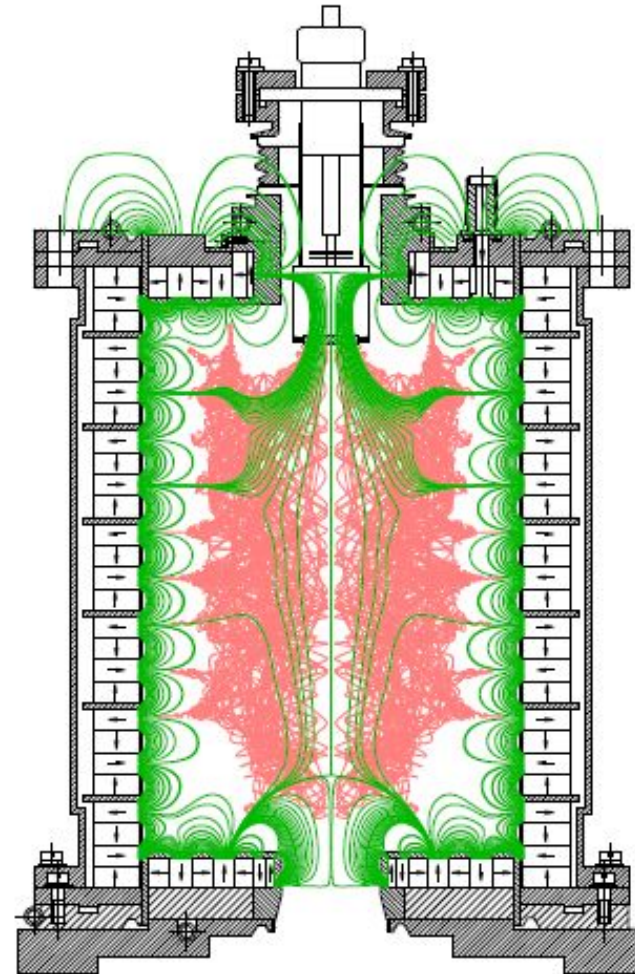
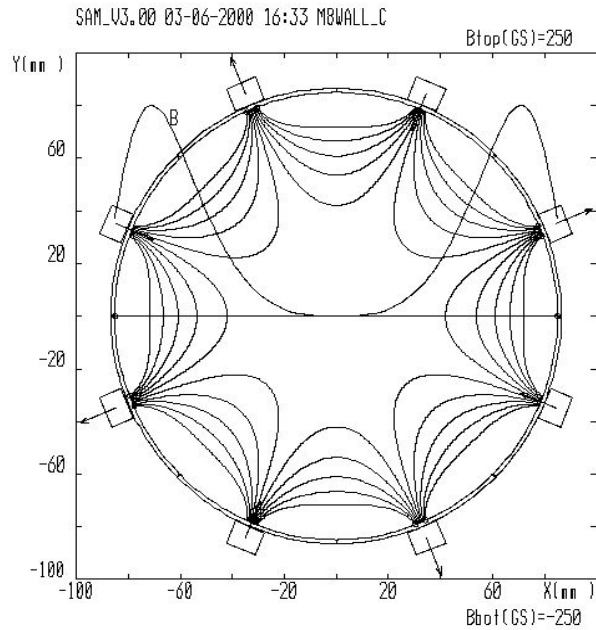
Электронны осциллируют в области полого катода  
Ионы распыляют поверхность катода



Лампа с полым катодом для спектрального анализа

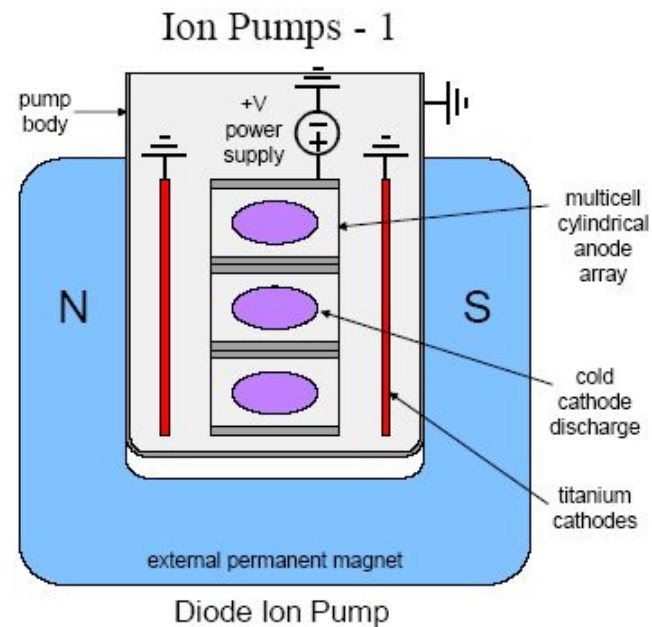
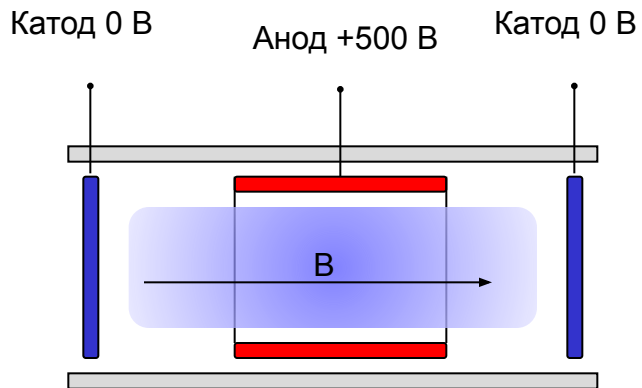
# Разряд с осциллирующими электронами

## Мультипольная магнитная стенка



# Разряд с осциллирующими электронами

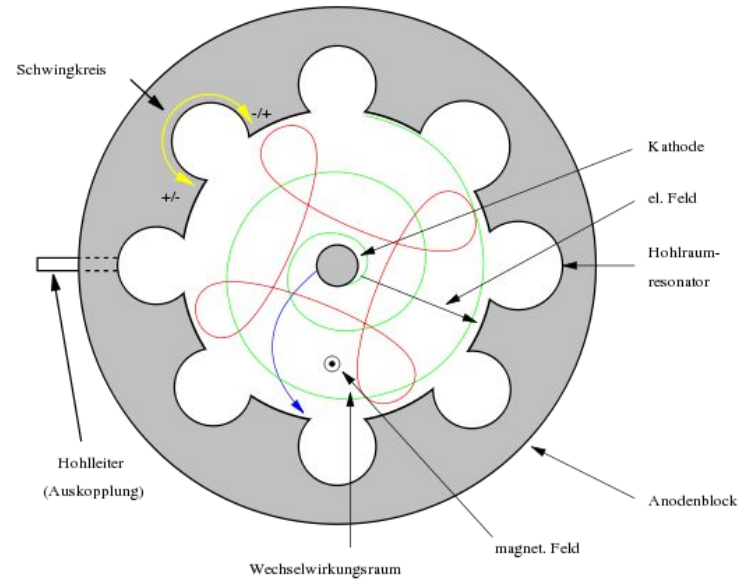
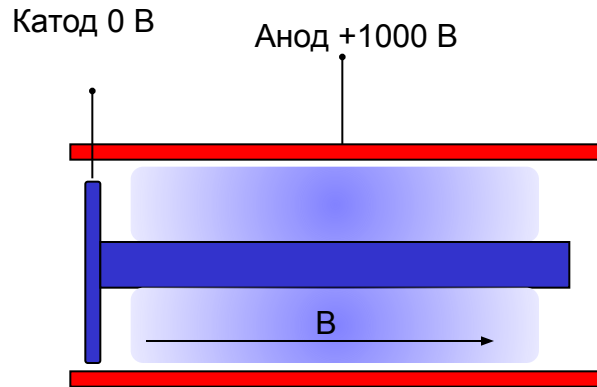
## Пенинговский разряд



Магнитоэлектрический насос

# Разряд с осциллирующими электронами

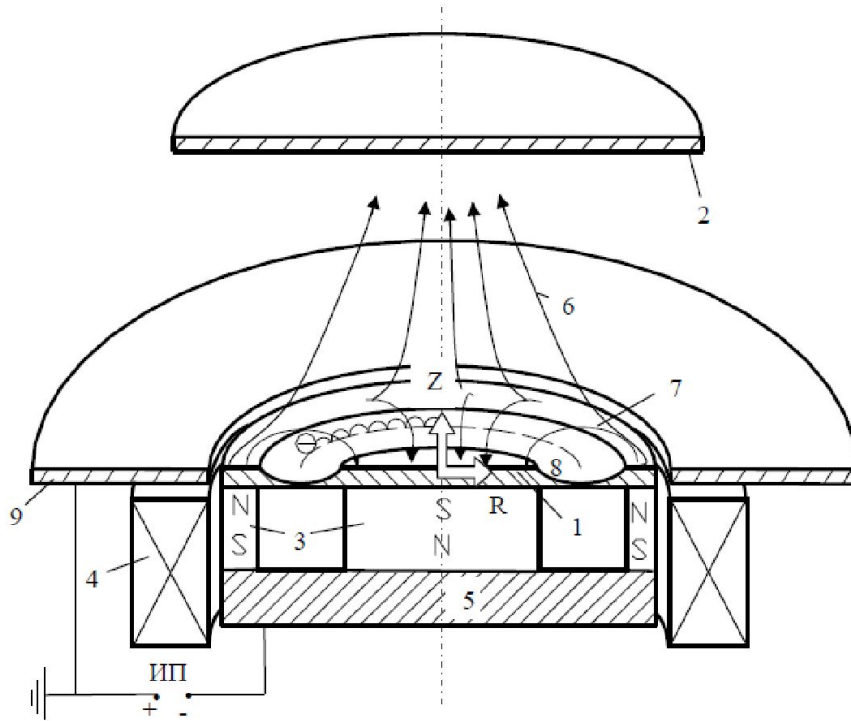
## Магнетронный разряд



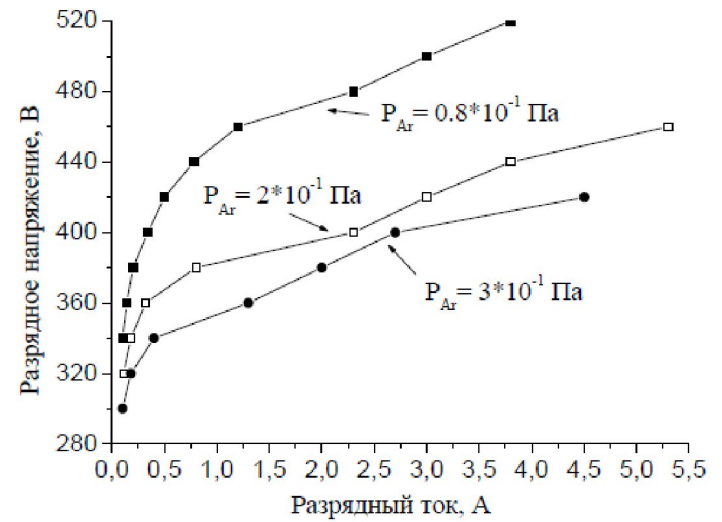
Магнетрон

# Разряд с осциллирующими электронами

## Магнетронный разряд



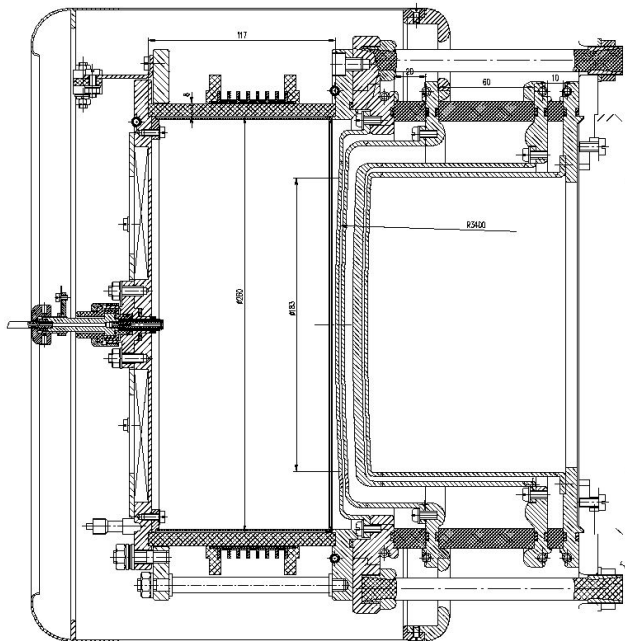
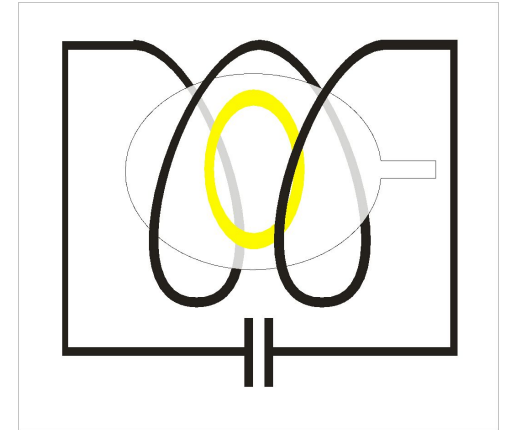
Магнетронная распылительная установка



# Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

Индуктивный разряд (inductively coupled plasma)

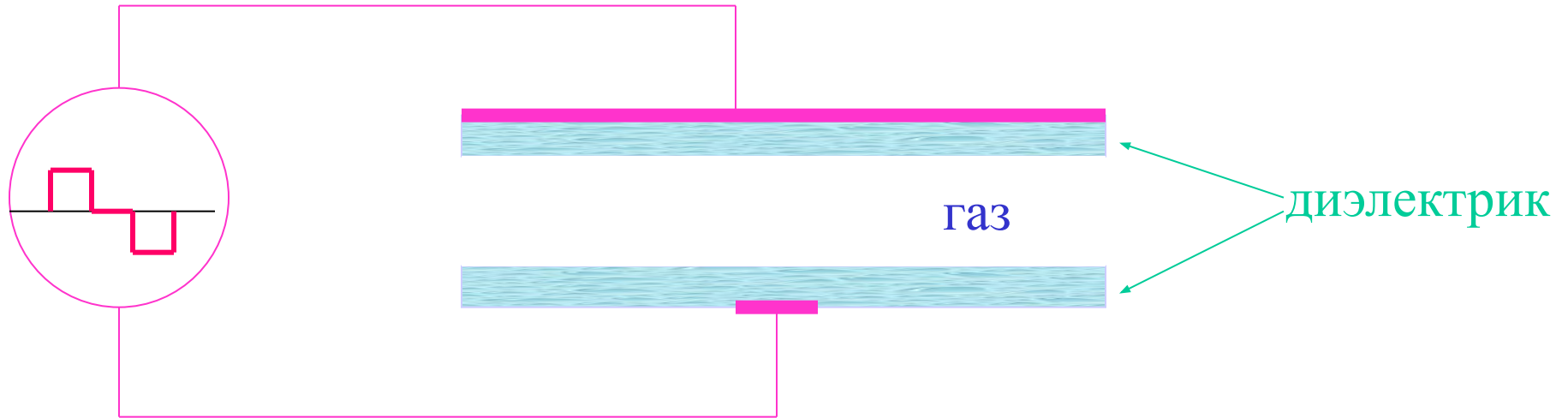
Электрическое поле генерируется индукционной катушкой  
Характерная рабочая частота 13,56 МГц  
Плотность плазмы до  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>  
Электронная температура 1-3 эВ



ВЧ эмиттер ионного источника

# Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

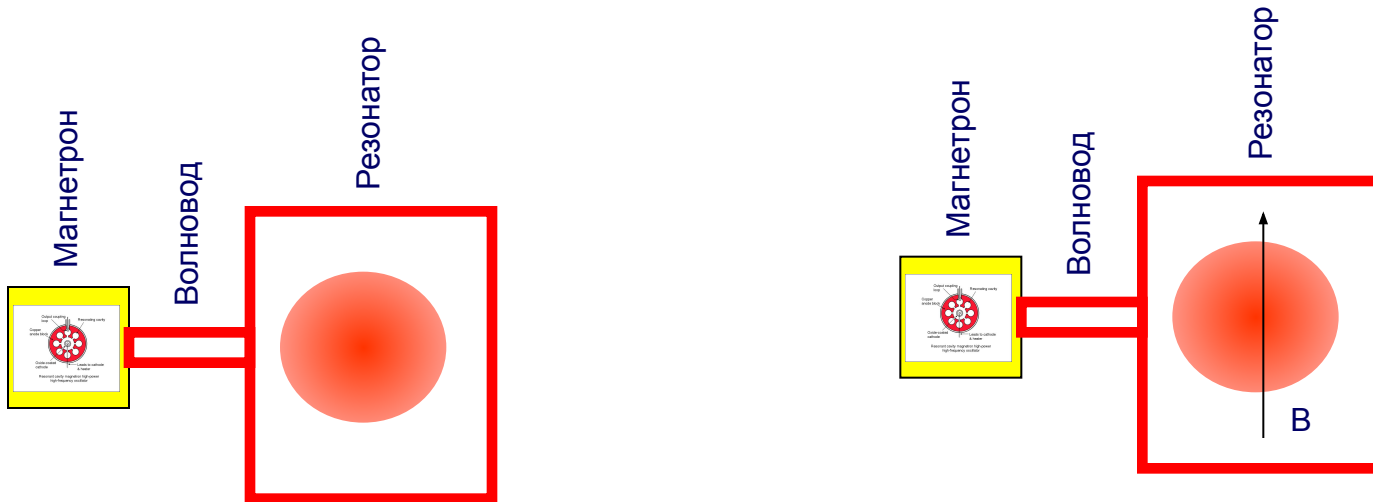
Емкостной разряд (capacitively coupled plasma)



# Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

ВЧ разряды

Существуют высокоэффективные источники микроволнового излучения – магнетроны (2,45 ГГц)



Электронно-циклотронный резонанс  
2,45 ГГц – 87 мТл



# Развитие разряда

Таунсендовская теория пробоя

**Количество свободных носителей мало**  
(электрическое поле не искажается  
пространственным зарядом)

**Образование вторичных электронов:**

- ионизация газа электронным ударом
- эмиссия с катода из-за бомбардировки ионами

Таунсенд нашел явный вид

$$\frac{\alpha}{n_0} = F\left(\frac{E}{n_0}\right)$$

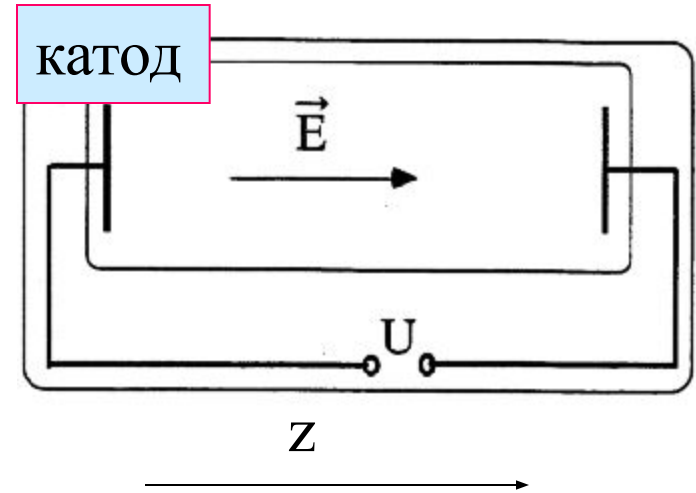
предположив, что электрон ионизирует атом, если в процессе его ускорения в электрическом поле он достигает энергии, превышающей потенциал ионизации:

$$e E z > I.$$

Если длина свободного пробега электрона –  $\lambda$ ., то вероятность того, что он пройдет без столкновений расстояние  $z$ , равна  $W(z) = \exp(-z/\lambda)$ . На пути один сантиметр среднее число столкновений, очевидно, равно  $1/\lambda$ , а число пробегов длиной, большей или равной  $z$ , будет определяться выражением

$$P(z) = (1/\lambda) \cdot \exp(-z/\lambda).$$

$$\alpha \equiv P\left(z = \frac{I}{eE}\right) = A n_0 \exp\left(-\frac{I\lambda}{eE}\right)$$



Длина свободного пробега обратно пропорциональна плотности газа

$$\lambda = \frac{V}{n_0 \langle \sigma V \rangle} = \frac{A}{n_0}$$

Тогда первый коэффициент Таунсенда

$$\frac{\alpha}{n_0} = A \exp\left(-\frac{B}{(E/n_0)}\right)$$

---

Распределение по длине

$$V_d \frac{dn_e}{dz} = n_0 n_e \langle \sigma_i V \rangle - n_i n_e \langle \sigma_r V \rangle \quad \text{- уравнение непрерывности}$$

*рекомбинацией  
пренебрегаем*

$$n_e(z) = n_e^{z=0} \exp \int_0^z \frac{n_0 \langle \sigma_i V \rangle}{V_d} dz = n_e^{z=0} \exp \int_0^z \alpha dz$$

Плотность электронов экспоненциально возрастает при их движении к аноду-

**ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАВИНА**

В другом виде:

$$\alpha \approx A p \exp(-B p / E)$$

$\alpha$  - первый коэффициент Таунсенда -  
количество актов ионизации  
на единицу длины пробега

Gas	A <u>ionization</u> Pa-m	B V Pa-m	E/p validity Range V/Pa-m
Air	11	274	75-600
N <sub>2</sub>	9.0	257	75-450
H <sub>2</sub>	3.8	104	15-450
He	2.3	26	15-110
Ne	3.0	75	75-300
A	11	135	75-450
Kr	13	180	75-750
Xe	20	263	150-600

Условие зажигания разряда:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{число электронов,} \\ \text{выбиваемых из} \\ \text{катода ионом} \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{l} \text{число ионов, созданных} \\ \text{испущенным с катода} \\ \text{электроном} \end{array} \right] \geq 1$$

$\gamma$  - второй коэффициент Таунсенда -  
коэффициент вторичной эмиссии

$$\gamma \cdot \left[ \exp \left( \int_0^L \alpha(x) dx \right) - 1 \right] \geq 1$$

$$\bar{\alpha} L \geq \ln(1 + 1/\gamma)$$

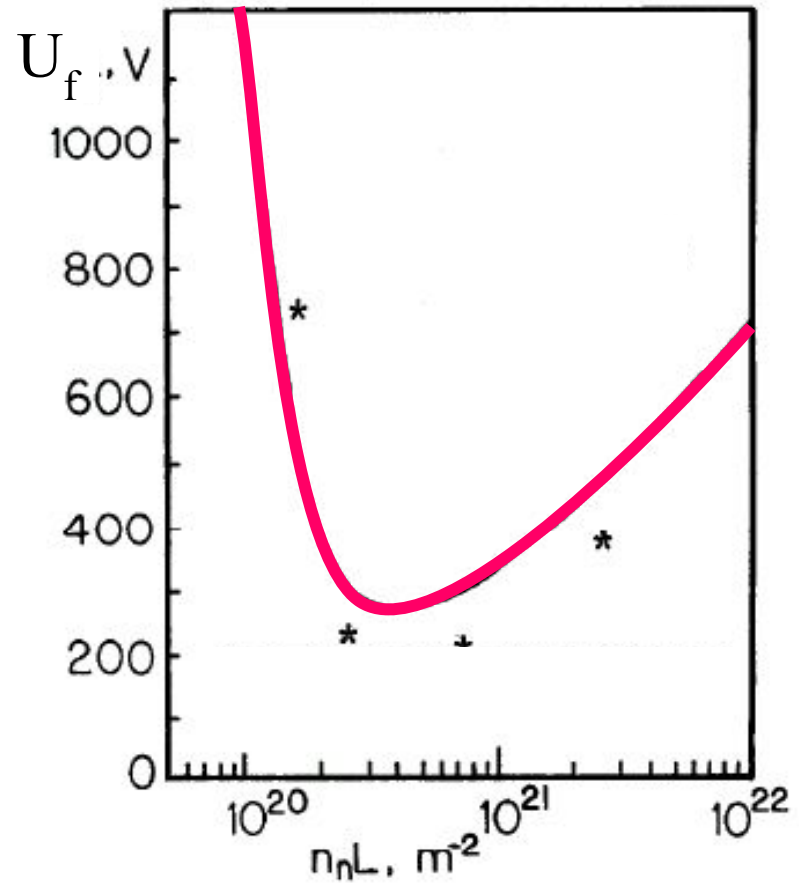
# Кривая Пашена

Напряжение пробоя  $U = E \cdot L$

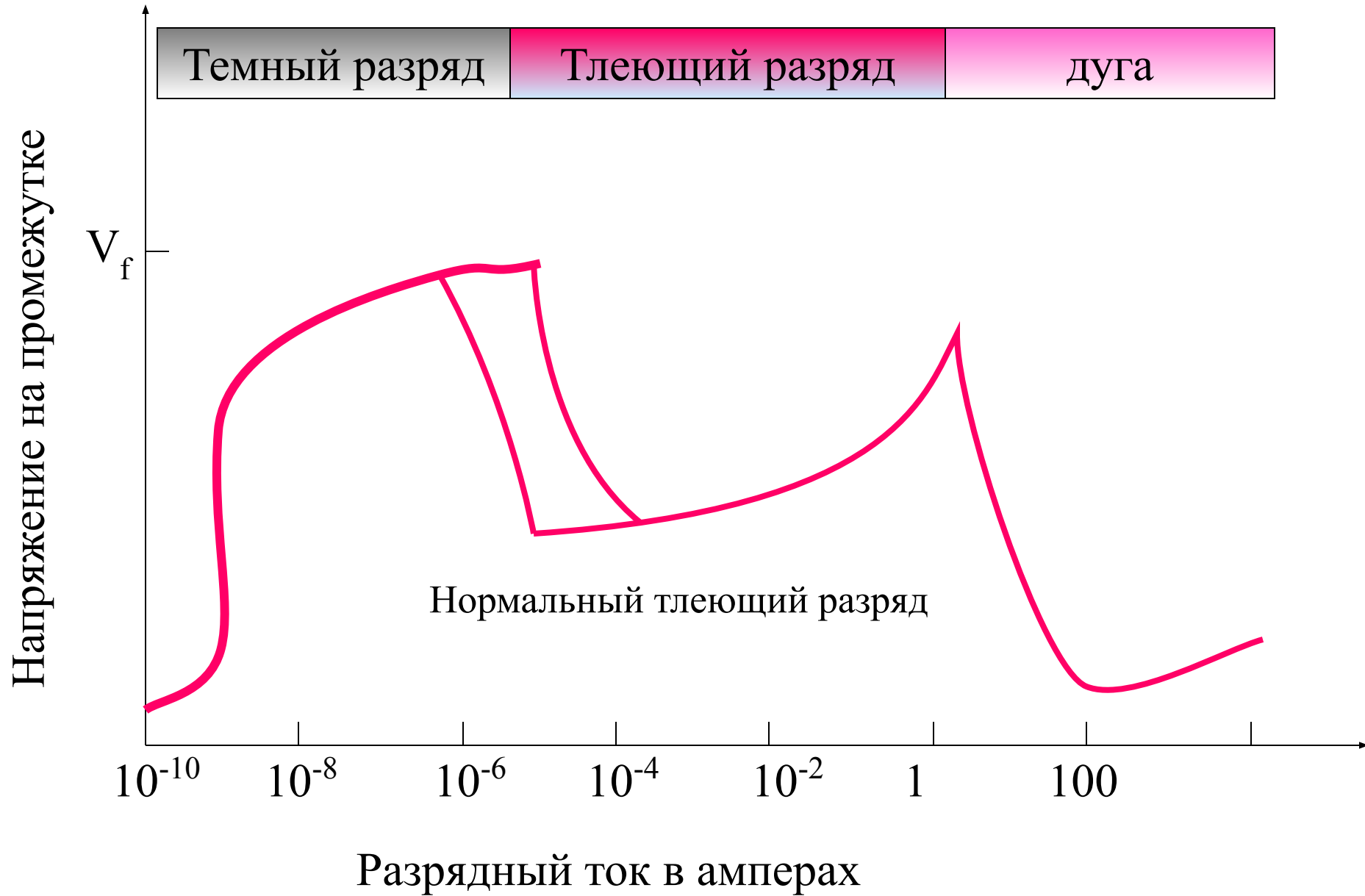
$$U = \frac{BpL}{\ln \frac{ApL}{\ln(1+1/\gamma)}}$$

$$L_{opt} \sim \lambda = \frac{1}{n\sigma}$$

↑ длина свободного пробега



# Электрический разряд в газах



# Тлеющий разряд

В разрядном промежутке устанавливается самосогласованное распределение потенциала

Напряжение на разряде и плотность тока разряда постоянны

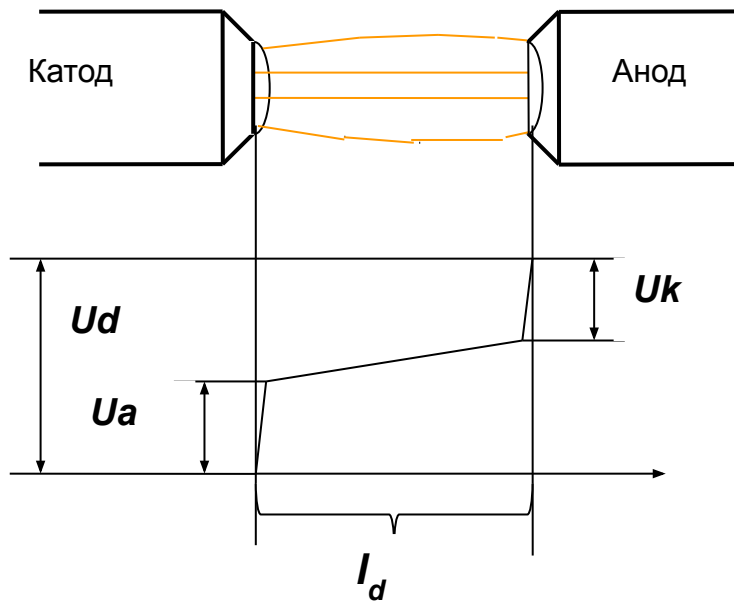
# Дуга

Разогрев поверхности катода за счет ионной бомбардировки

Термоэлектронная эмиссия

Образование катодных пятен

# Свойства дуги как разряда в газе

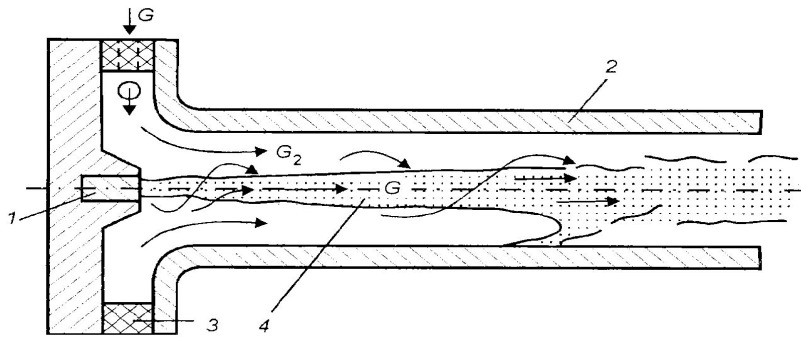


$$U_d = \alpha + \beta \times l$$

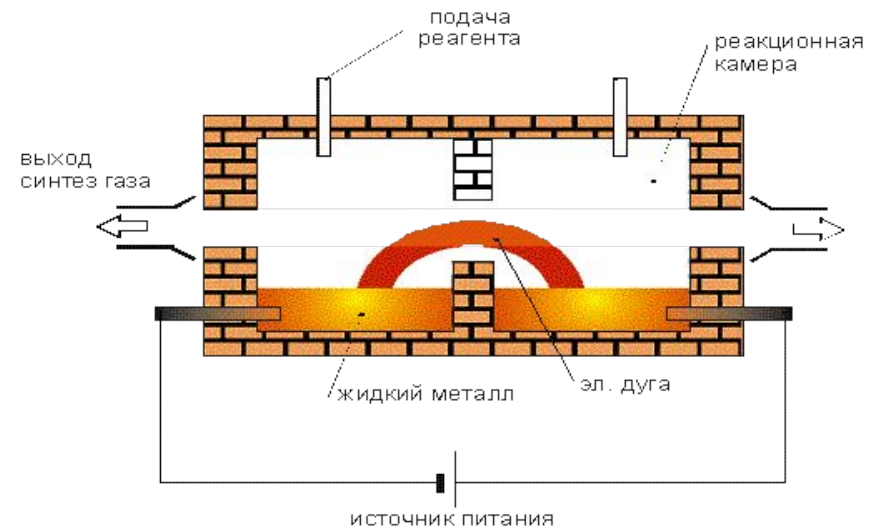
- Малое приэлектродное падение потенциала  $\alpha$  (10-40 В)
- Высокая плотность тока ( $10^2$ - $10^3$  А/см<sup>2</sup>)
- Термическая ионизация газа в межэлектродном промежутке ( $T = 4000$ - $6000$  К)
- Термоэлектронная эмиссия на катоде



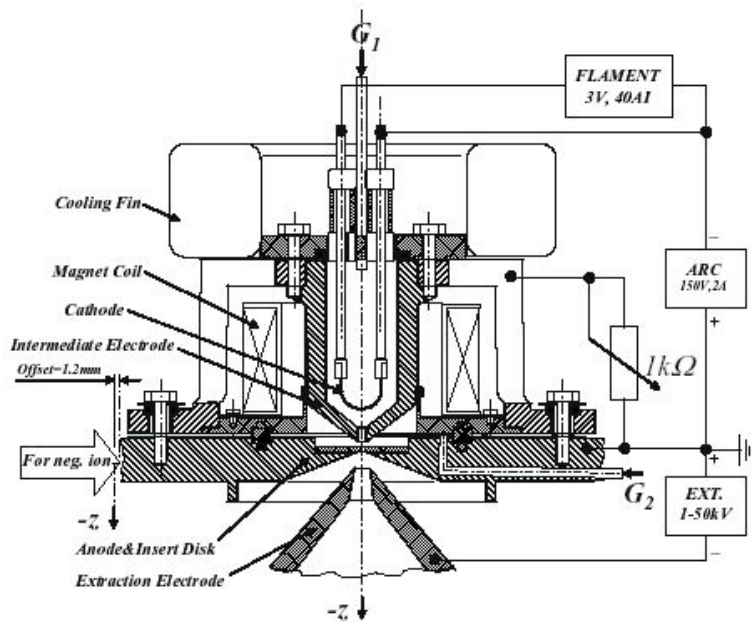
# Плазмотроны



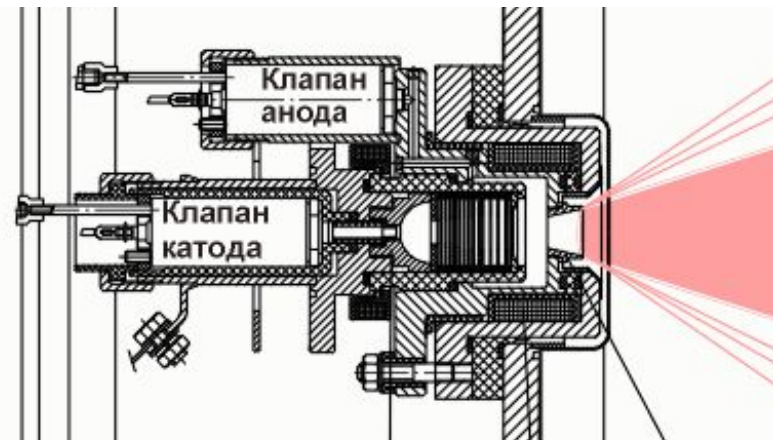
Плотность теплового потока  $\sim 10^6 \div 10^7 \text{ Вт/см}^2$



# Дуговые источники плазмы

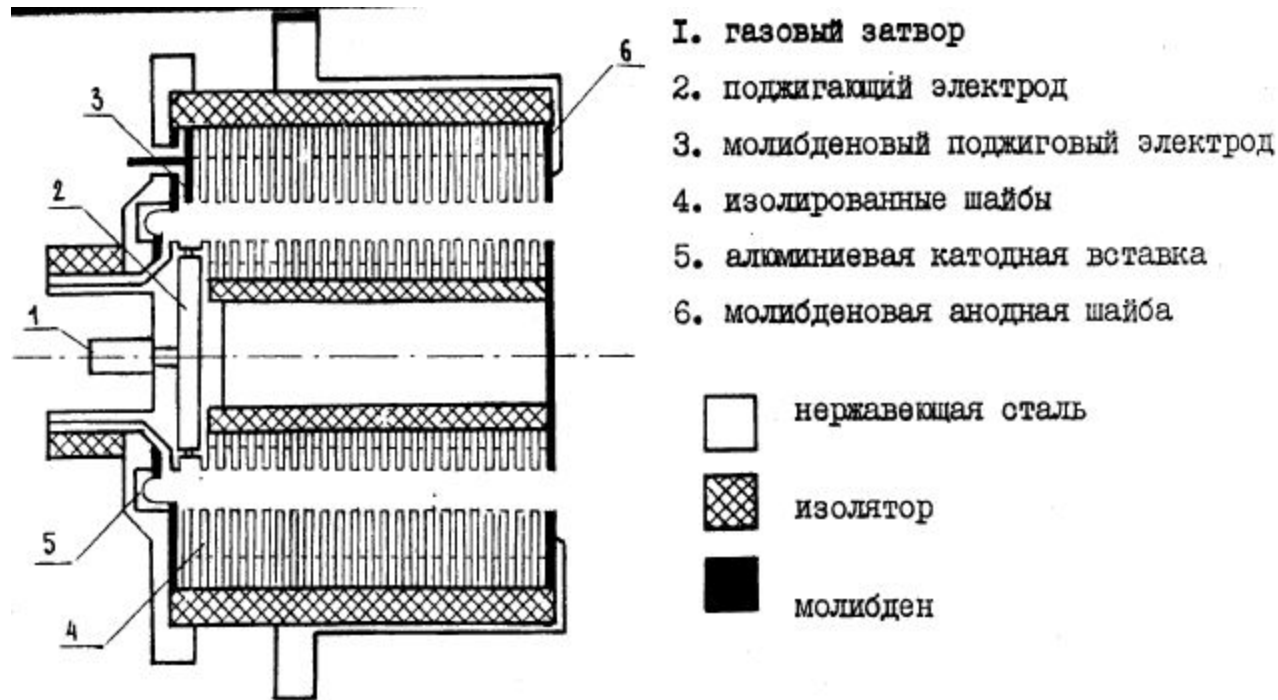


Дуоплазмотрон



Дуга 1200 А, 90 В, 5 мс

# Плазменные пушки (АМБАЛ)



Начальная плазма АМБАЛ  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, 20 см, 1.5 Тл

Кольцевая плазменная пушка

плотность  $10^{13} - 10^{15}$  см<sup>-3</sup>

Температура 2 – 20 эВ

Радиальное электрическое поле приводит к турбулентному нагреву плазмы (неустойчивость Кельвина - Гельмгольца)

Те до 50 эВ

## Плазменные пушки (ГДЛ)

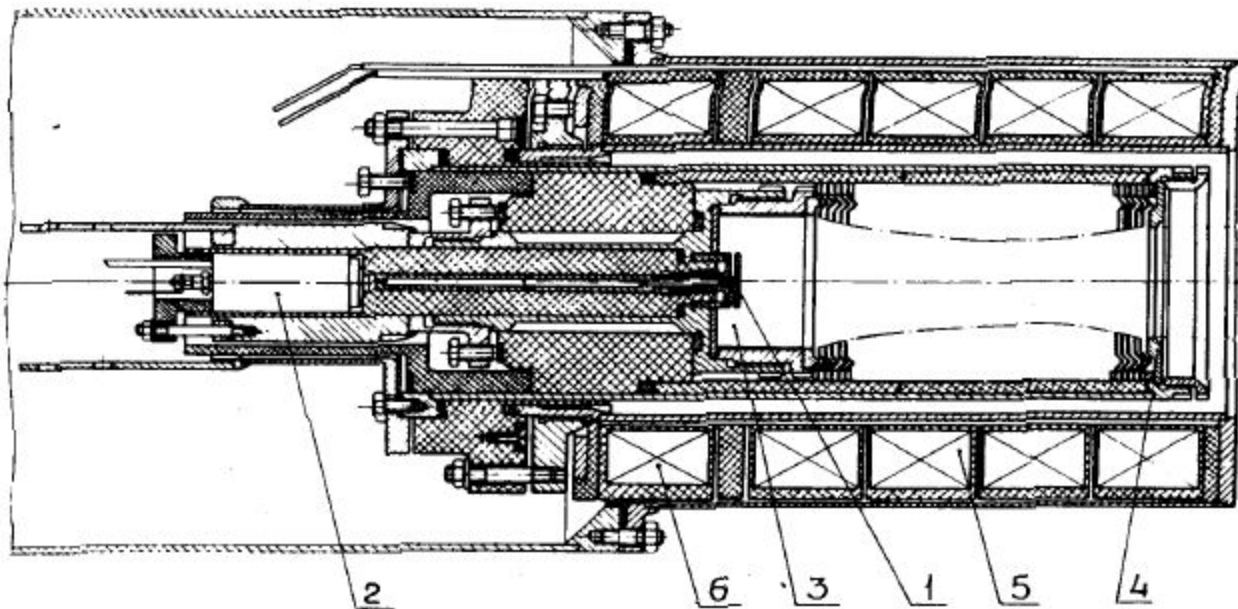


Рис.30. Конструкция плазменного источника

1 – поджиговый электрод, 2 – электромагнитный затвор, 3 – катод, 4 – анод, 5 – импульсный соленоид, 6 – обмотка обратного поля

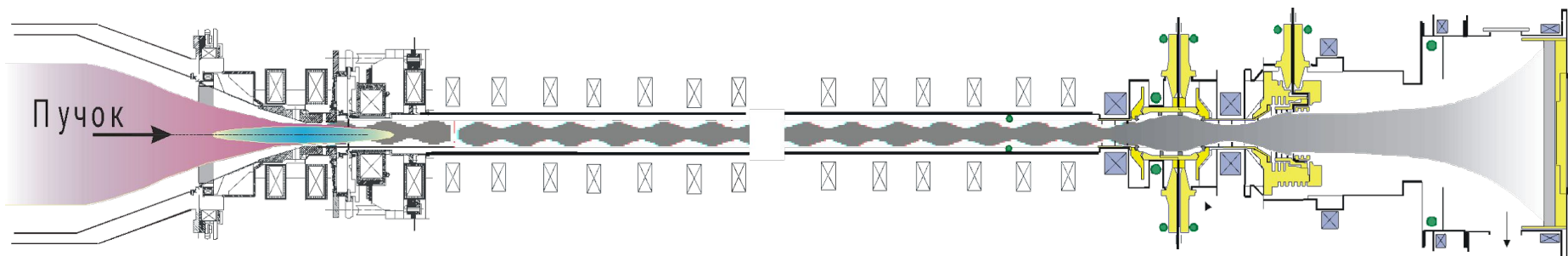
Начальная плазма АМБАЛ  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 11 см, 0,22 Тл, пробки 15 Тл

Плазменная пушка в неоднородном магнитном поле

плотность  $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$

Температура 2 – 20 эВ

# Система создания начальной плазмы (ГОЛ-3)



## ЗАДАЧИ

Создание начальной ионизации и организация встречного тока в 12-метровой металлической вакуумной камере

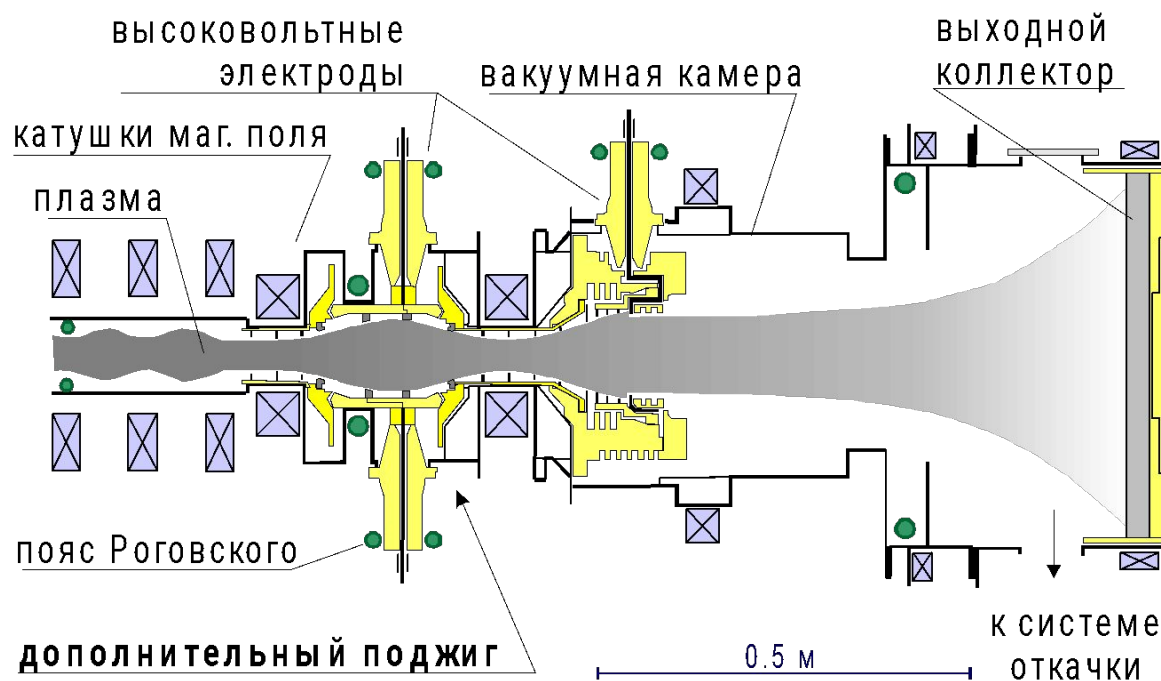
Уменьшение энергетической нагрузки на электроды и приемник пучка

# Конструкция источника плазмы

## ЗАДАЧИ

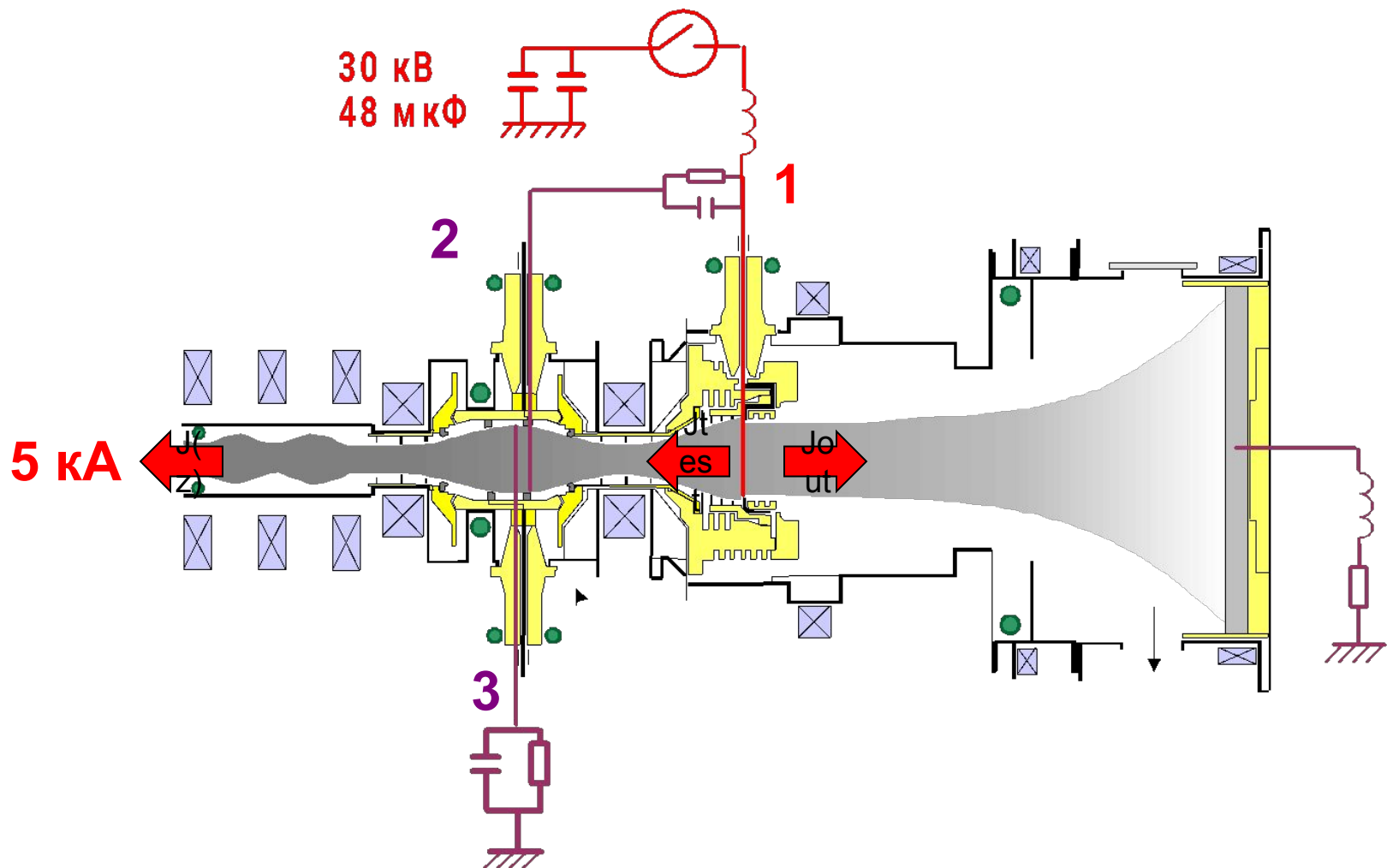
Создание начальной ионизации и организация встречного тока в 12-метровой металлической вакуумной камере

Уменьшение энергетической нагрузки на электроды и приемник пучка



- Перенос приемника пучка в область расширителя с пониженным магнитным полем
- Использование электродов, расположенных вне области прохождения пучка

## Схема питания источника плазмы



- Электроды 2,3 используются для инициирования пробоя в широком диапазоне плотности
- Приемник пучка во время инжекции находится под плавающим потенциалом
- Принудительная компенсация тока пучка обратным током по плазме