

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)

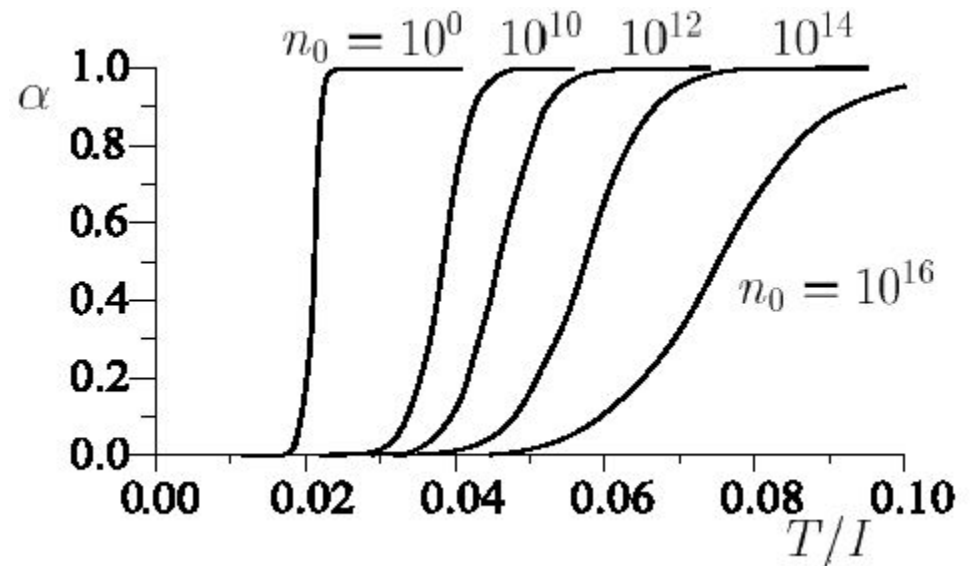
Q - машина

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

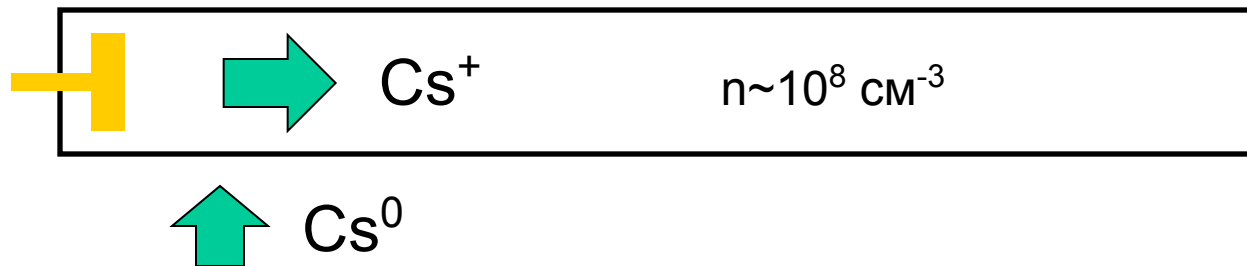
Водород – 13,6 эВ

Цезий – 3,89 эВ

φ – работа выхода

Вольфрам $\varphi=4,5$ эВ

$T=2500$ K

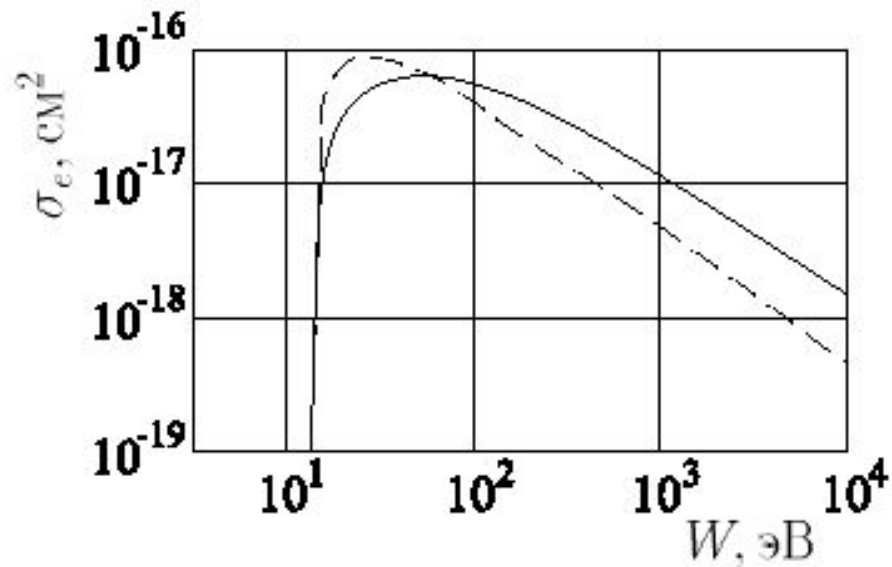


Ионизация излучением

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)

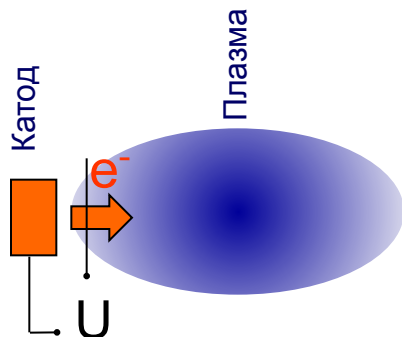
Ионизация электронным ударом



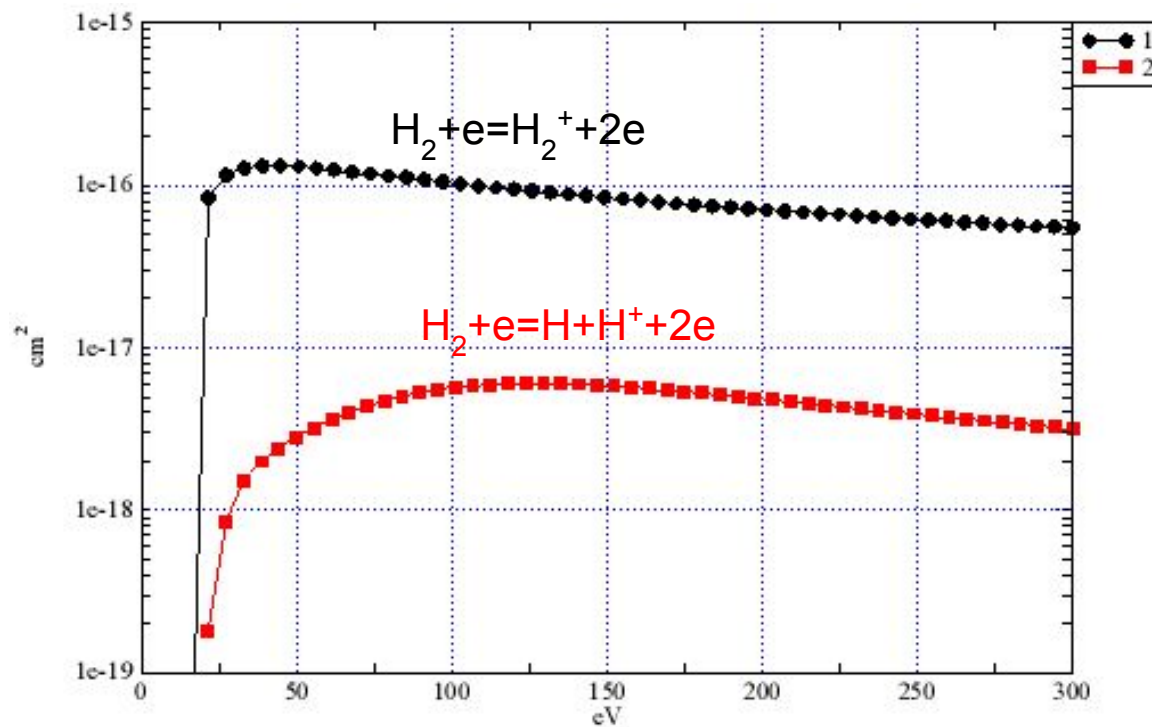
$$\sigma_e = \pi a_b^2 \frac{4I(W - I)}{W^2}$$

Сечение ионизации (формула Томсона)

Ионизация внешними электронами (несамоподдерживающийся разряд)



Сечение ионизации молекулярного водорода



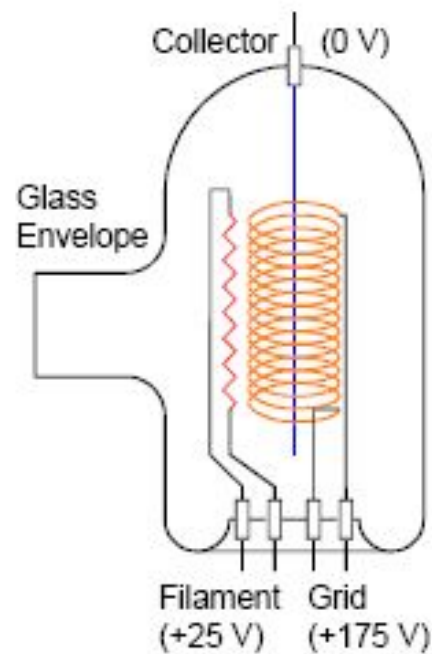
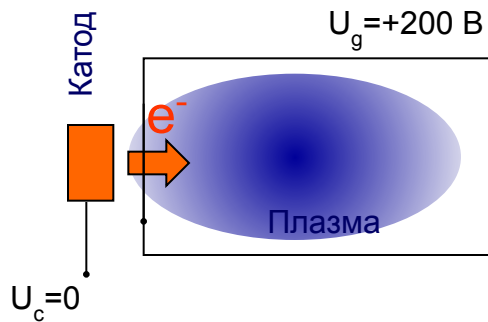
(база данных ALADDIN: <http://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>)

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

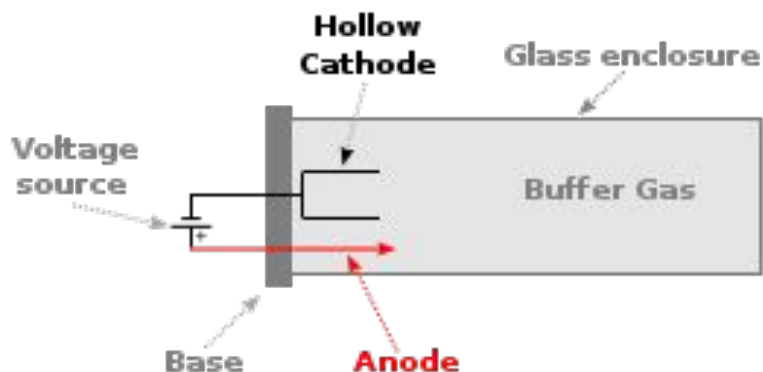


Ионизационная лампа Байярда-Альперта

Разряд с осциллирующими электронами

Разряд с полым катодом

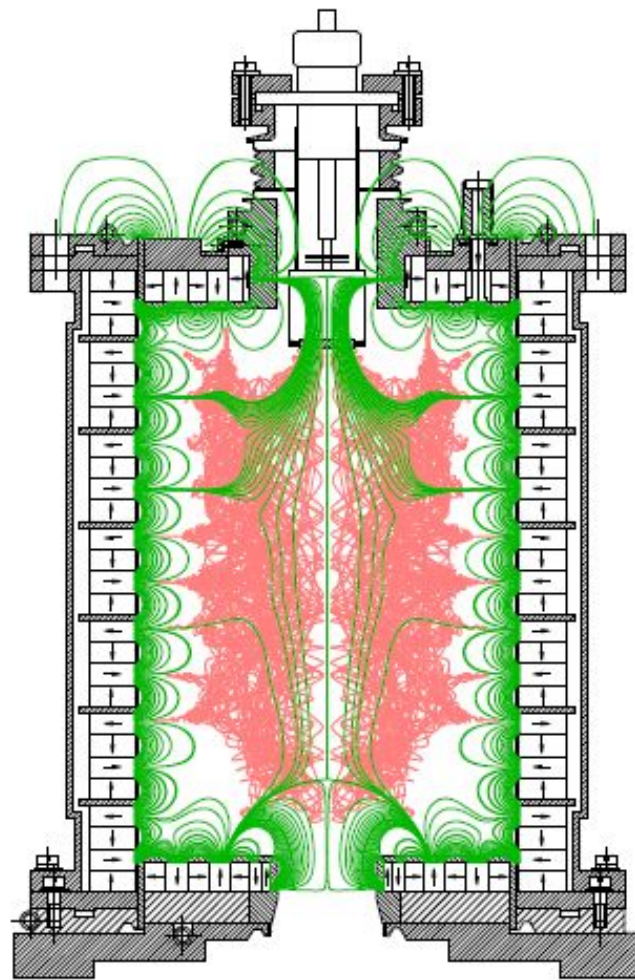
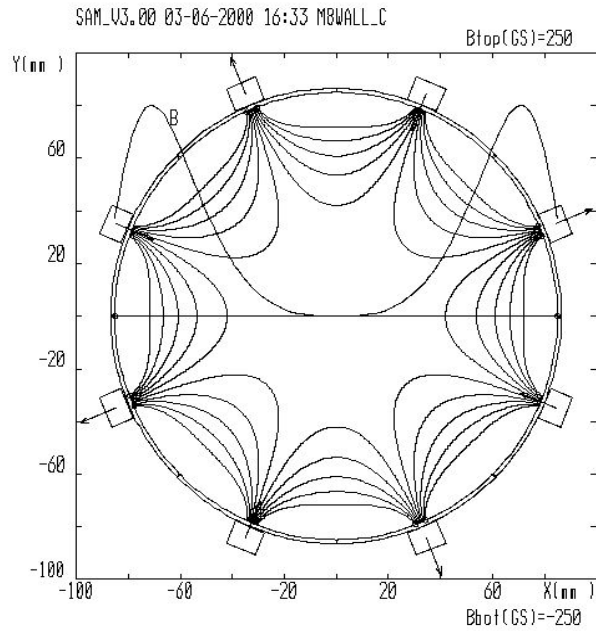
Электронны осциллируют в области полого катода
Ионы распыляют поверхность катода



Лампа с полым катодом для спектрального анализа

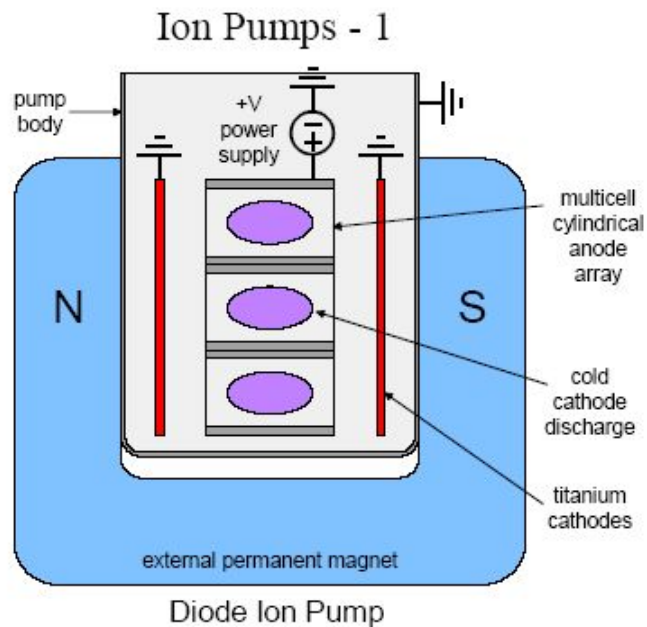
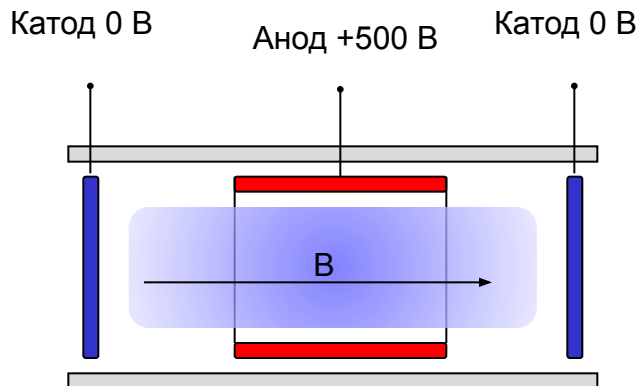
Разряд с осциллирующими электронами

Мультипольная магнитная стенка



Разряд с осциллирующими электронами

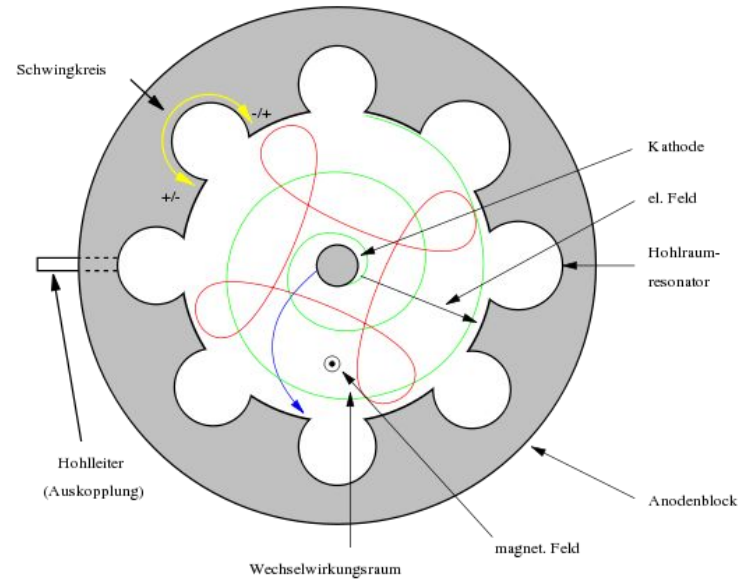
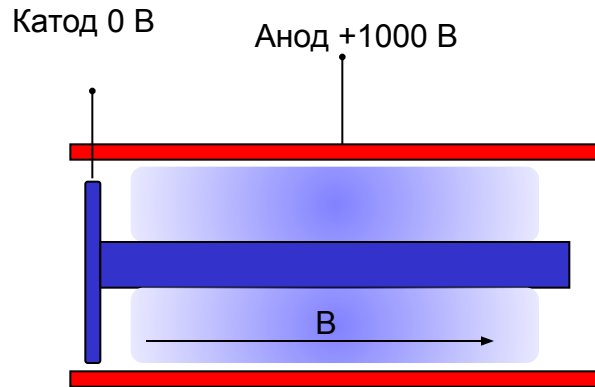
Пенинговский разряд



Магнитоэлектрический насос

Разряд с осциллирующими электронами

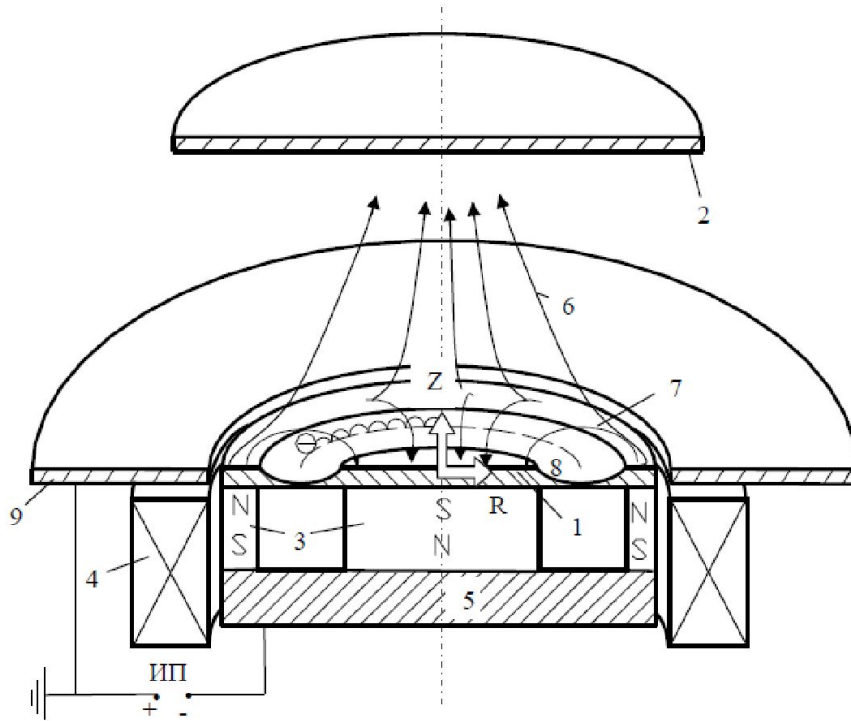
Магнетронный разряд



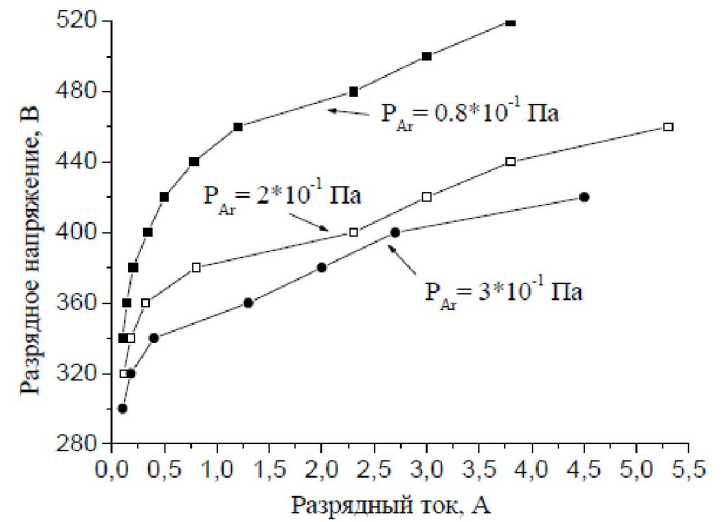
Магнетрон

Разряд с осциллирующими электронами

Магнетронный разряд



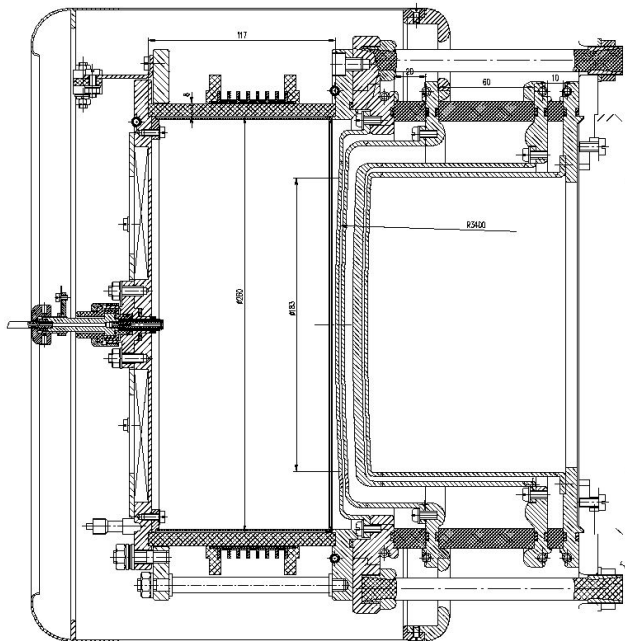
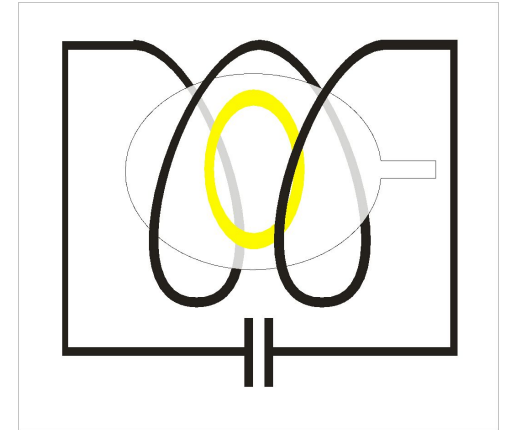
Магнетронная распылительная установка



Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

Индуктивный разряд (inductively coupled plasma)

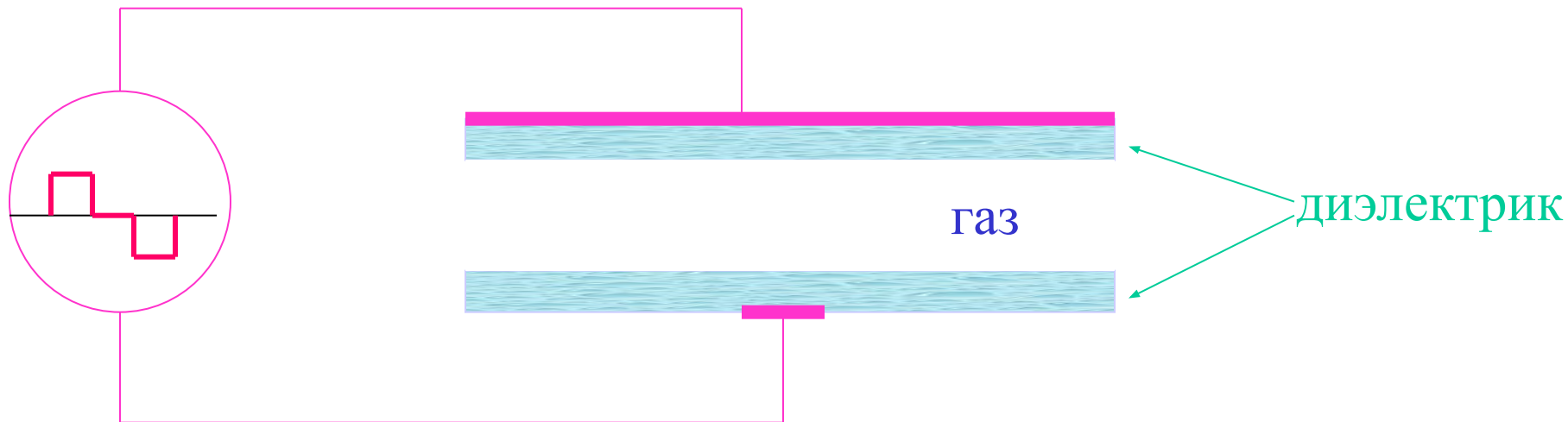
Электрическое поле генерируется индукционной катушкой
Характерная рабочая частота 13,56 МГц
Плотность плазмы до 10^{15} см^{-3}
Электронная температура 1-3 эВ



ВЧ эмиттер ионного источника

Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

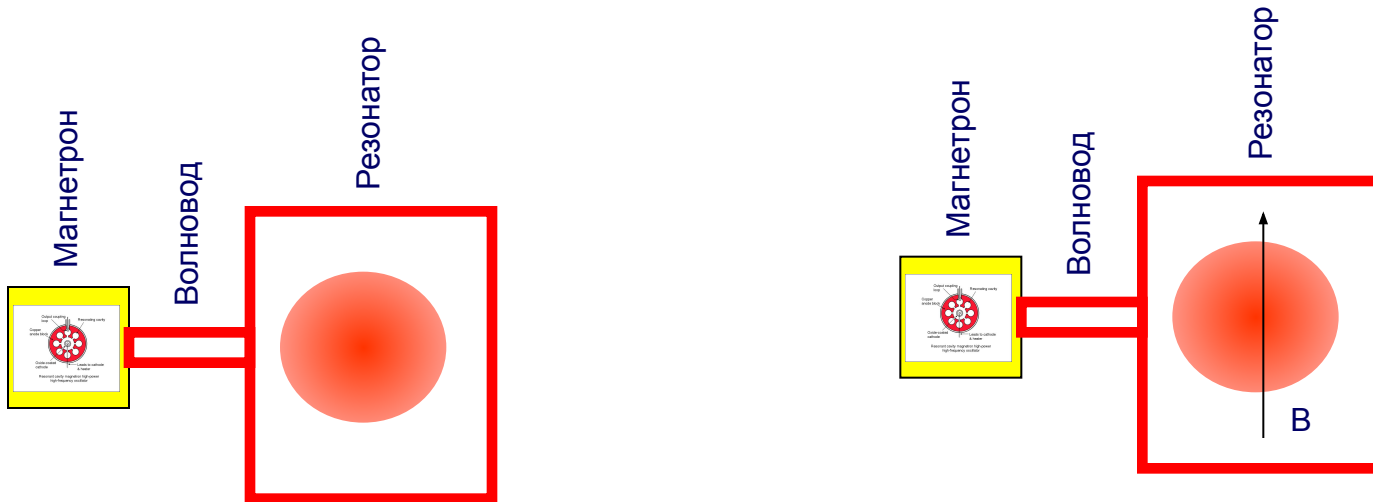
Емкостной разряд (capacitively coupled plasma)



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

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

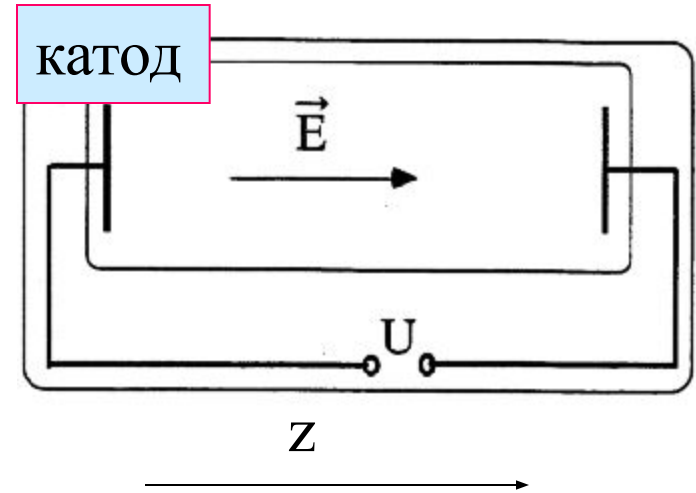
предположив, что электрон ионизирует атом, если в процессе его ускорения в электрическом поле он достигает энергии, превышающей потенциал ионизации:

$$e E z > I.$$

Если длина свободного пробега электрона – λ ., 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:

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

α - 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 ₂	9.0	257	75-450
H ₂	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:

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

γ - второй коэффициент Таунсенда -
коэффициент вторичной эмиссии

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

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

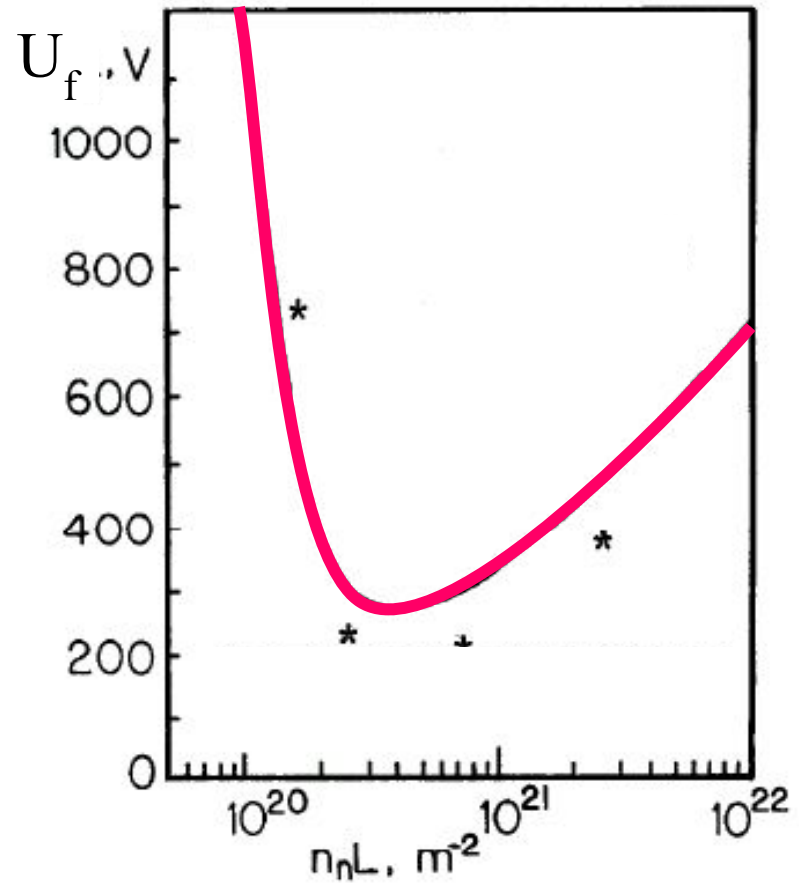
Кривая Пашена

Напряжение пробоя $U = E \cdot L$

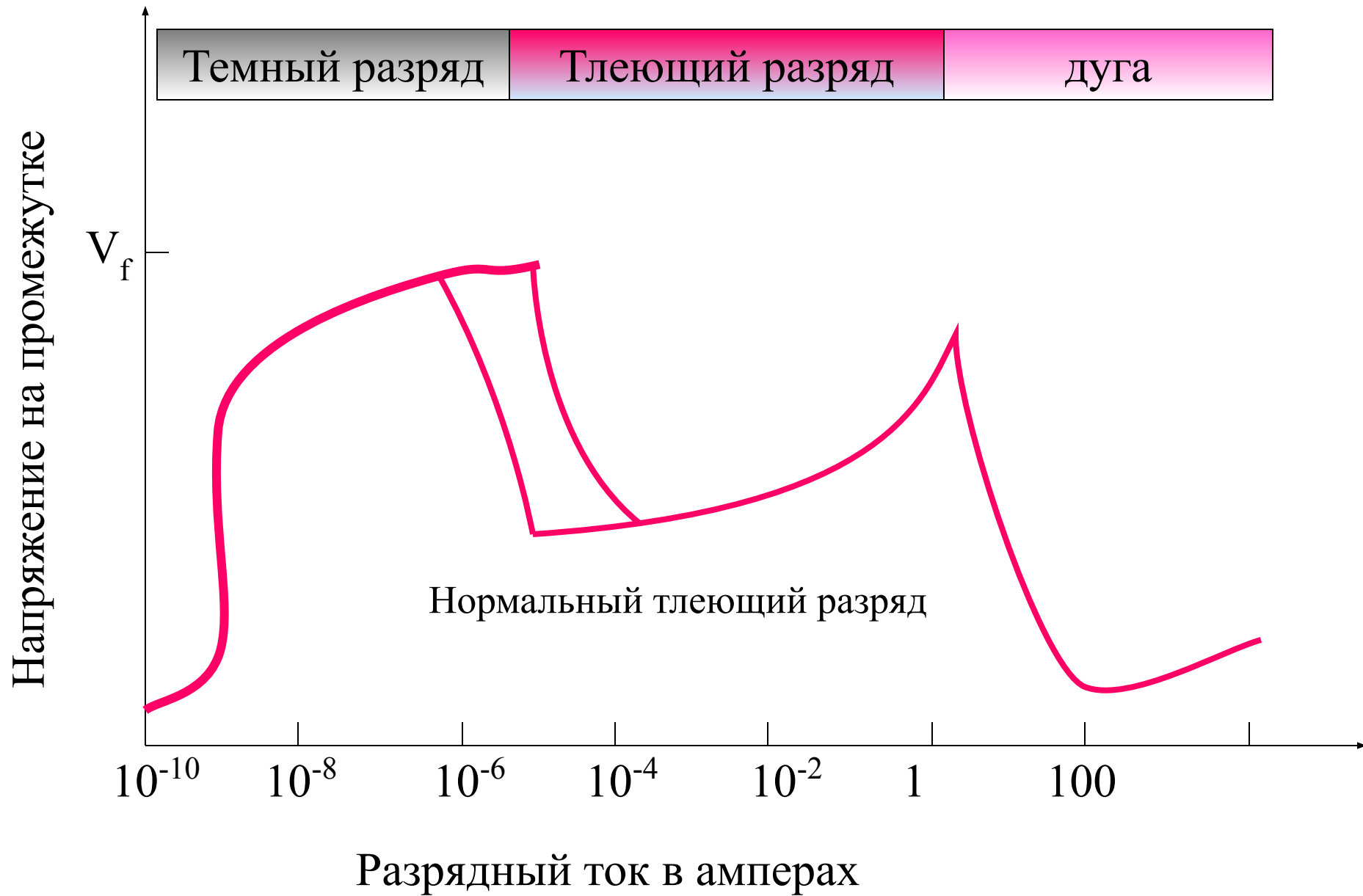
$$U = \frac{BpL}{\ln \frac{ApL}{\ln(1+1/\gamma)}}$$

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

↑ длина свободного пробега



Электрический разряд в газах



Тлеющий разряд

В разрядном промежутке устанавливается самосогласованное распределение потенциала

Напряжение на разряде и плотность тока разряда постоянны

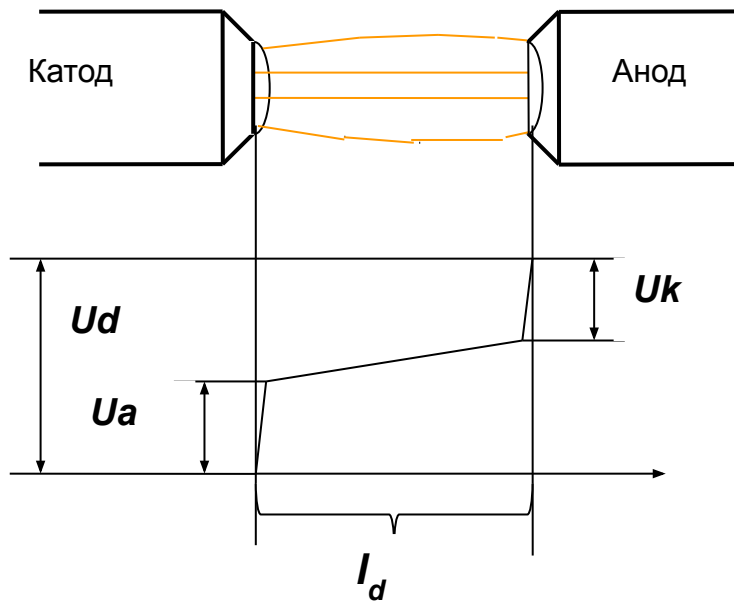
Дуга

Разогрев поверхности катода за счет ионной бомбардировки

Термоэлектронная эмиссия

Образование катодных пятен

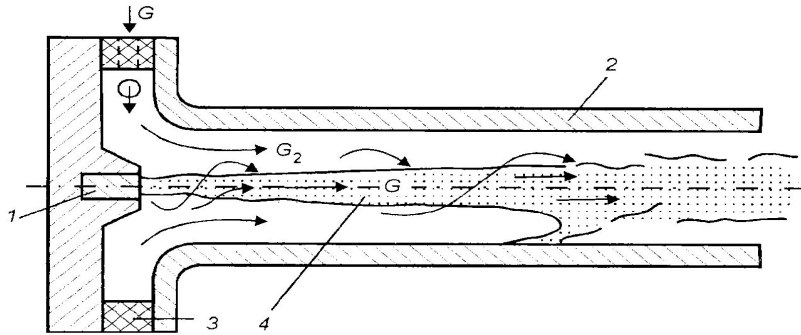
Свойства дуги как разряда в газе



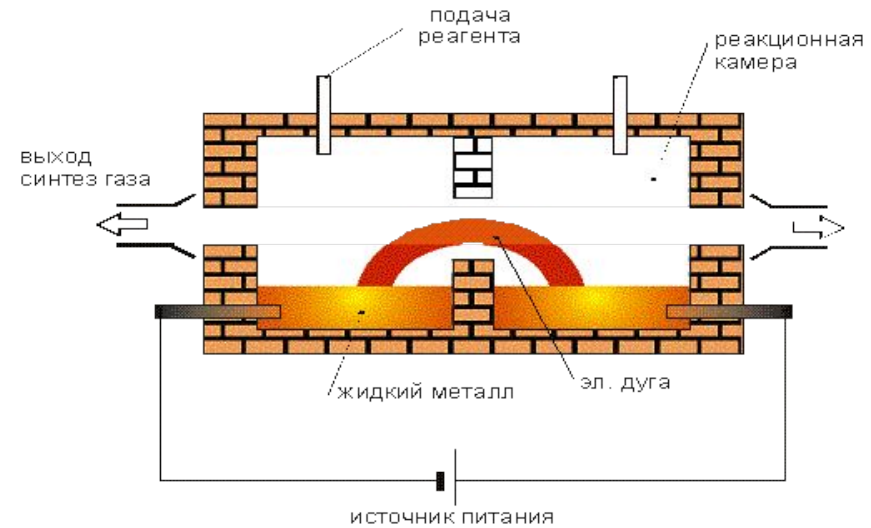
$$U_d = \alpha + \beta \times l$$

- Малое приэлектродное падение потенциала α (10-40 В)
- Высокая плотность тока (10^2 - 10^3 А/см²)
- Термическая ионизация газа в межэлектродном промежутке ($T = 4000$ - 6000 К)
- Термоэлектронная эмиссия на катоде

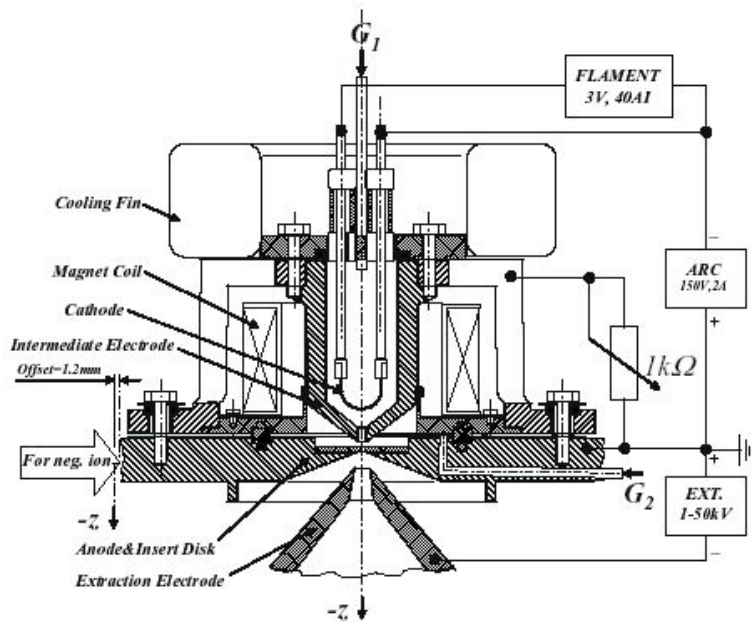
Плазмотроны



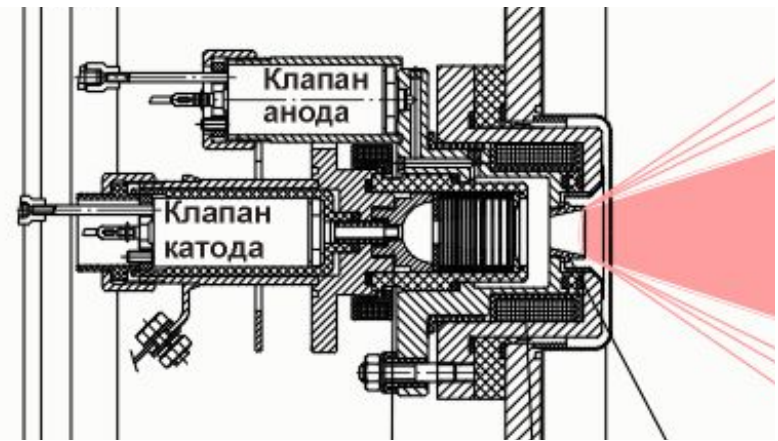
Плотность теплового потока $\sim 10^6 \div 10^7 \text{ Вт/см}^2$



Дуговые источники плазмы

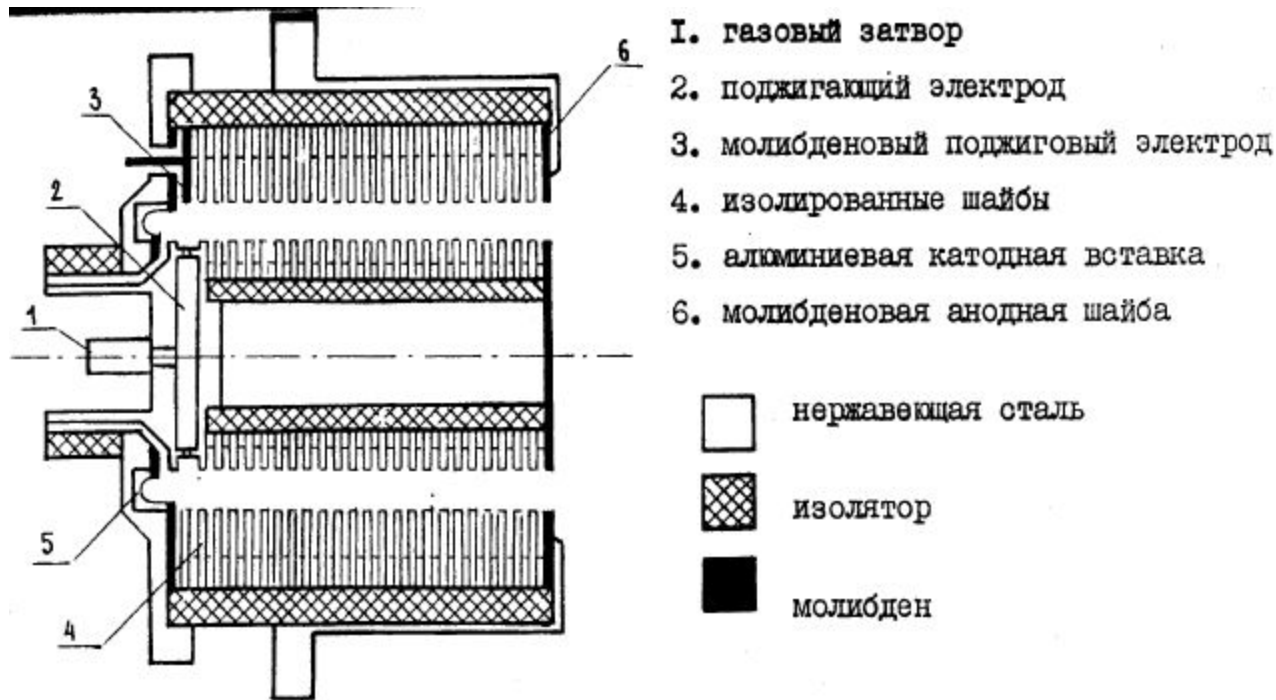


Дуоплазмотрон



Дуга 1200 А, 90 В, 5 мс

Плазменные пушки (АМБАЛ)



Начальная плазма АМБАЛ 10^{13} см⁻³, 20 см, 1.5 Тл

Кольцевая плазменная пушка

плотность $10^{13} - 10^{15}$ см⁻³

Температура 2 – 20 эВ

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

Те до 50 эВ

Плазменные пушки (ГДЛ)

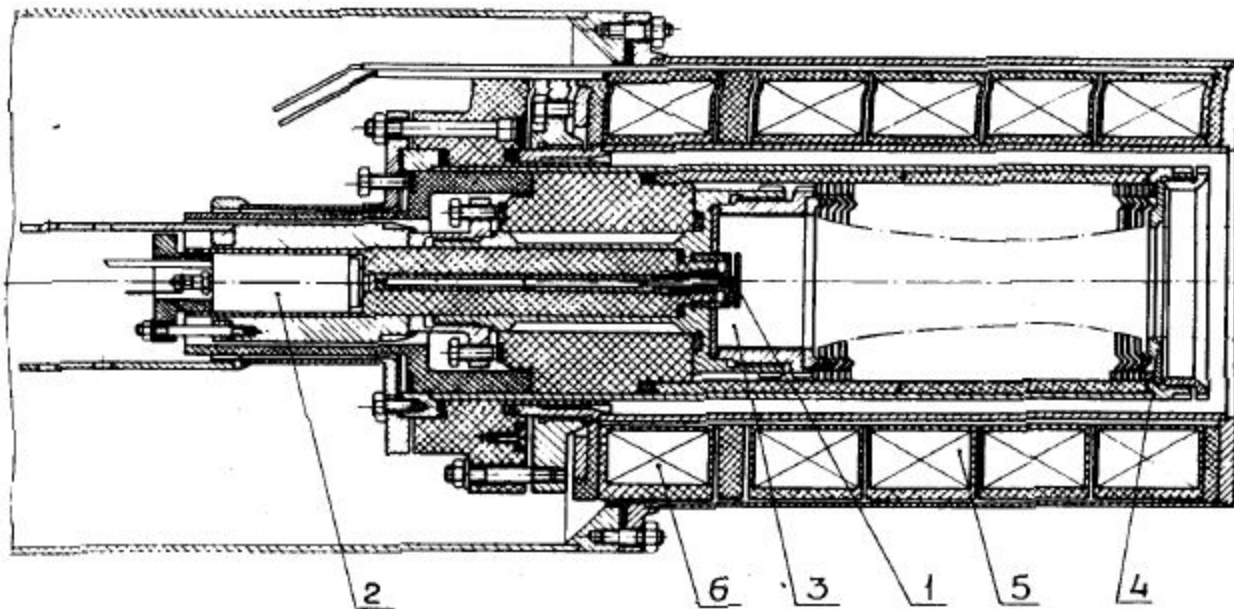


Рис.30. Конструкция плазменного источника

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

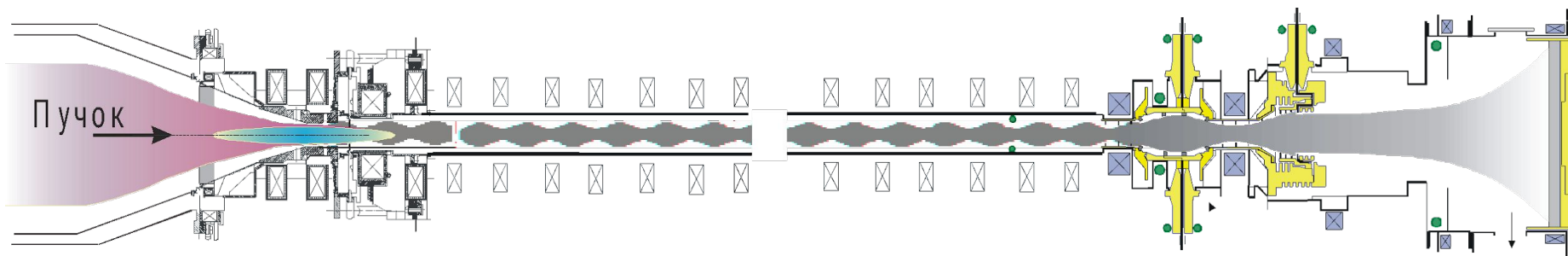
Начальная плазма АМБАЛ $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 11 см, 0,22 Тл, пробки 15 Тл

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

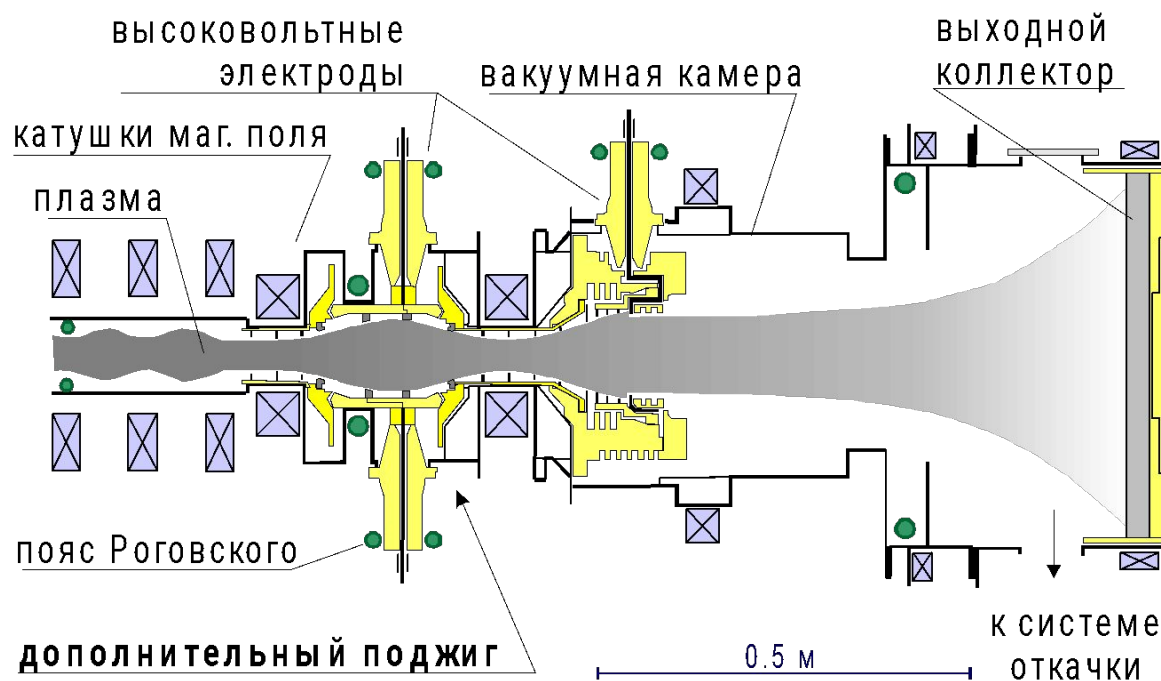
Уменьшение энергетической нагрузки на электроды и приемник пучка

Конструкция источника плазмы

ЗАДАЧИ

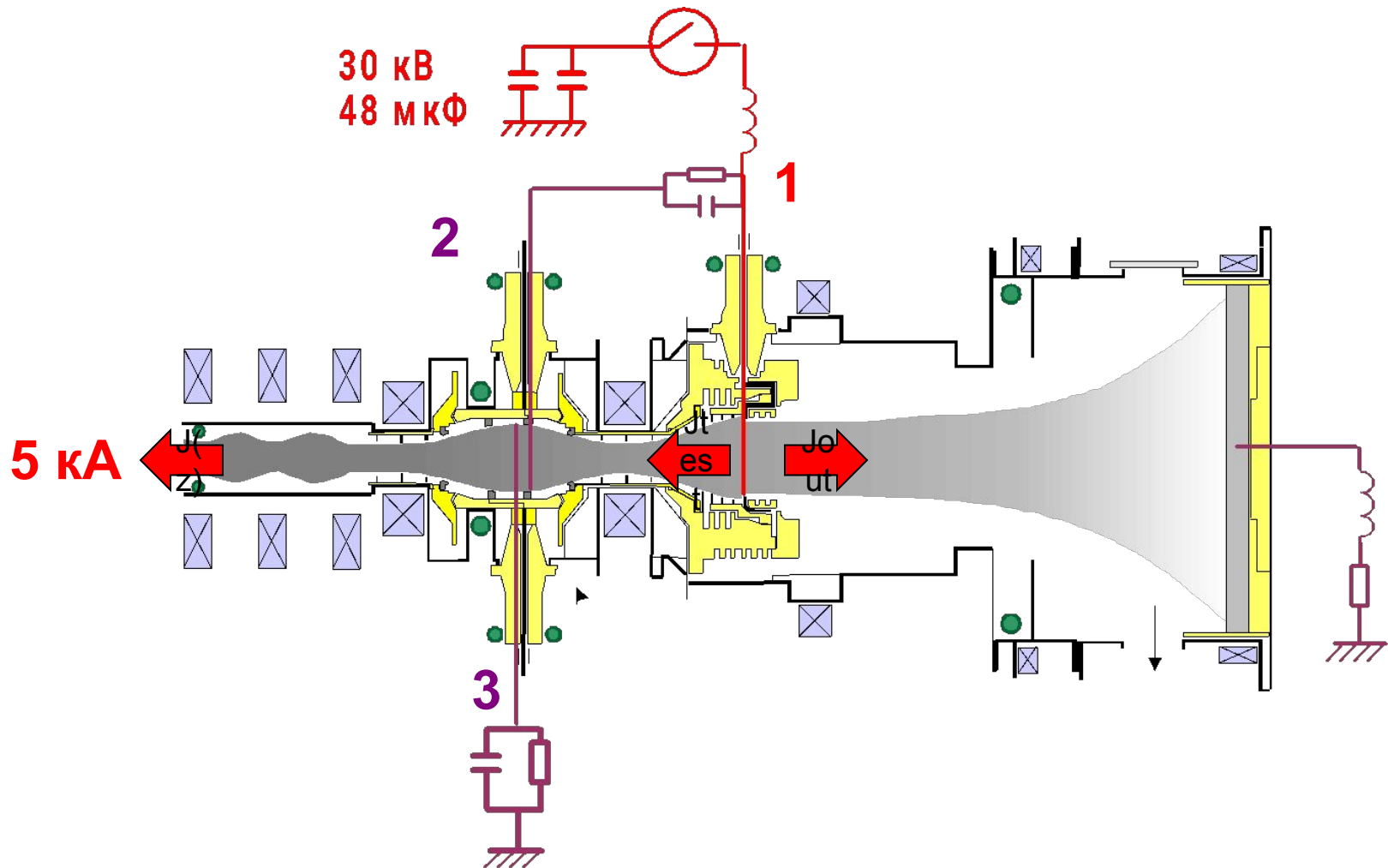
Создание начальной ионизации и организация встречного тока в 12-метровой металлической вакуумной камере

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