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

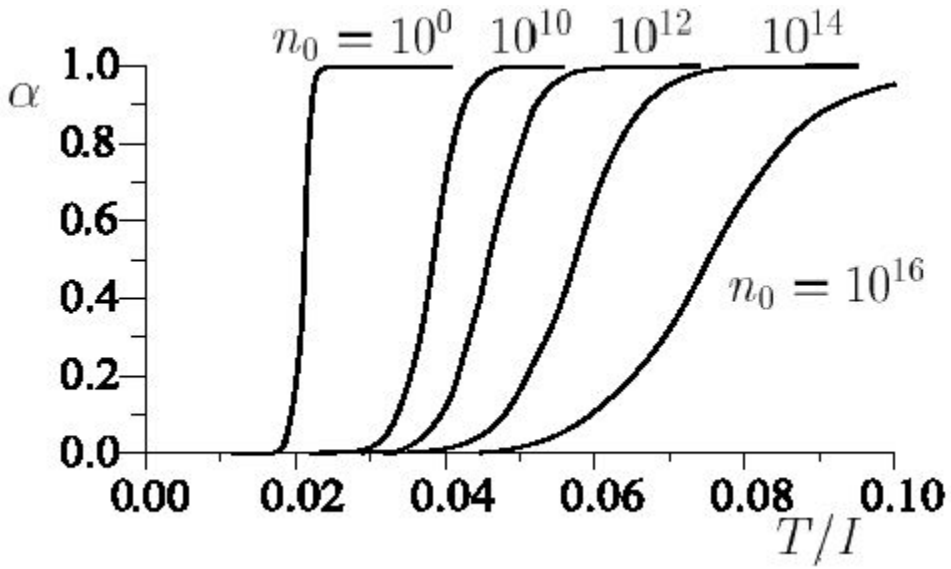
Поверхностная ионизация – Q машина
Ионизация излучением (фотоионизация)
Ионизация электронами (газовый разряд)

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:

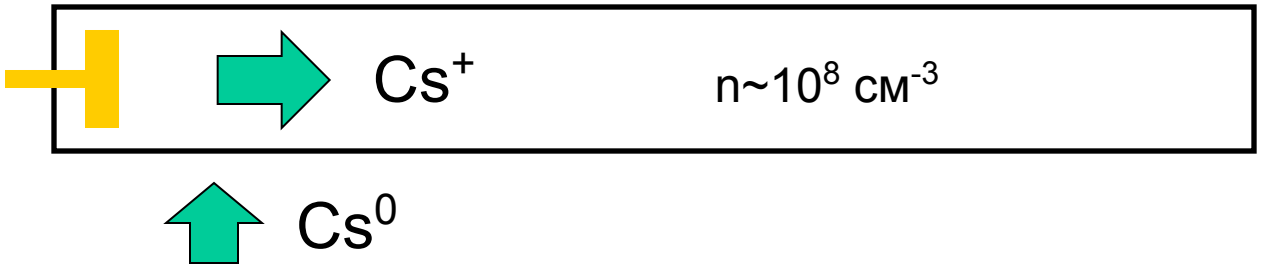
$$\frac{n_i}{n_a} = \frac{g_i}{g_a} e^{(\varphi - I)/KT}$$

I – потенциал ионизации
Водород – 13,6 эВ
Цезий – 3,89 эВ

φ– работа выхода

Вольфрам φ=4,5 эВ

T=2500 K

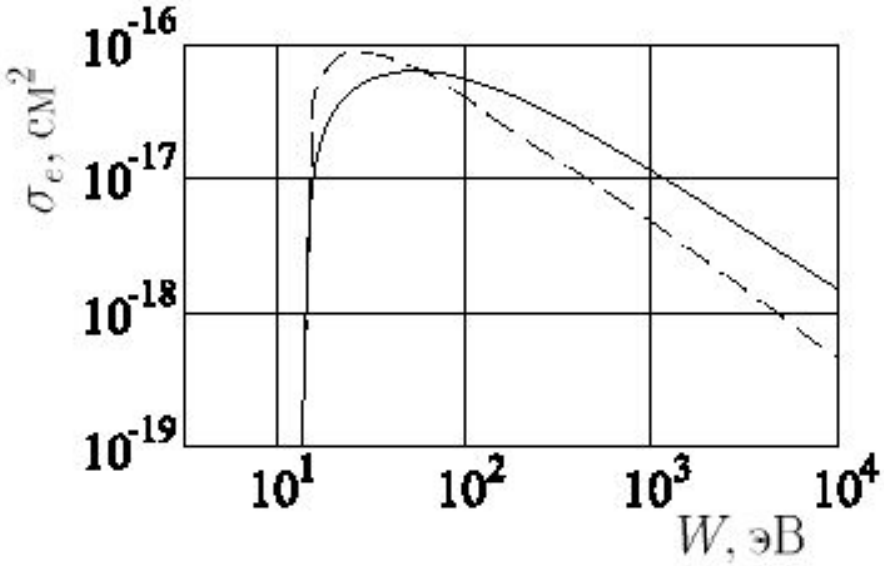


Ионизация излучением

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

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

Ионизация электронным ударом

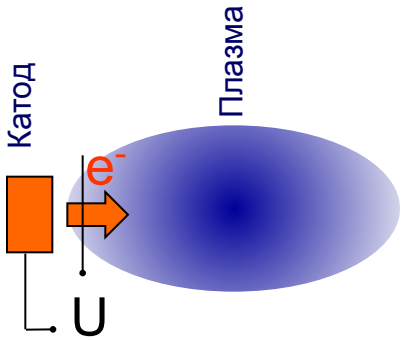


$$\sigma_e = \pi a_b^2 \frac{4I(W-I)}{W^2}$$

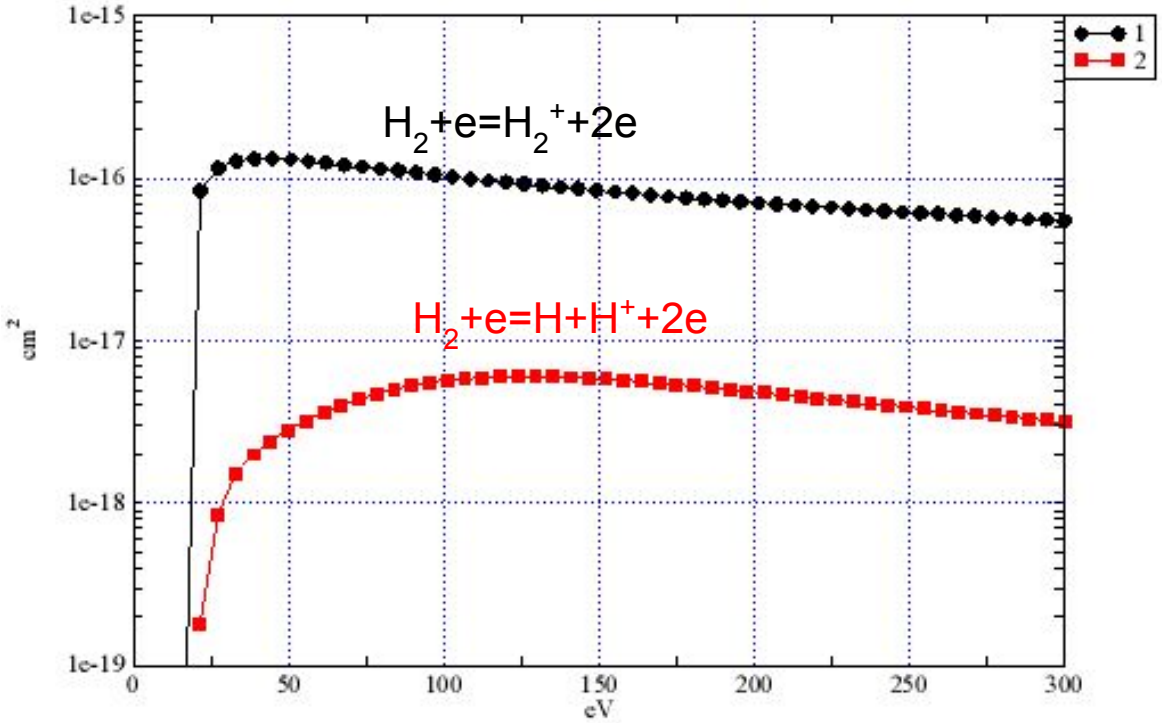
Сечение ионизации (формула Томсона)

Ионизация внешними электронами

(несамоподдерживающийся разряд)



Сечение ионизации молекулярного водорода



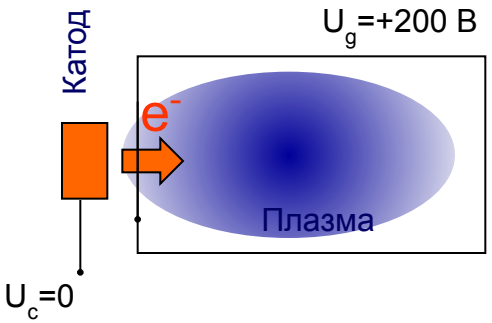
(*база данных ALADDIN: http://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/*)

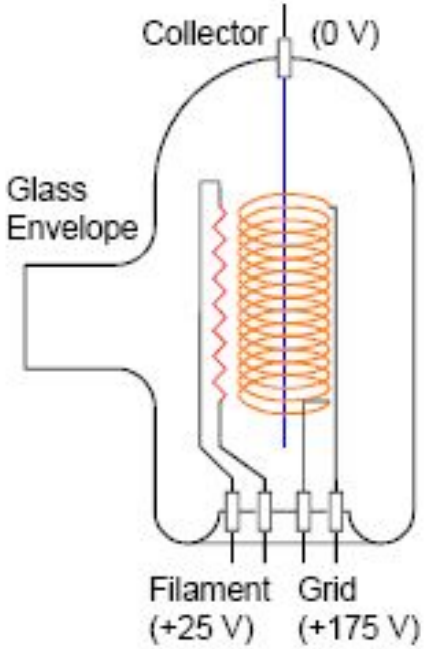
Доля атомарного водорода 3-6%

Ионизация внешними электронами

Разряд с осциллирующими электронами

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



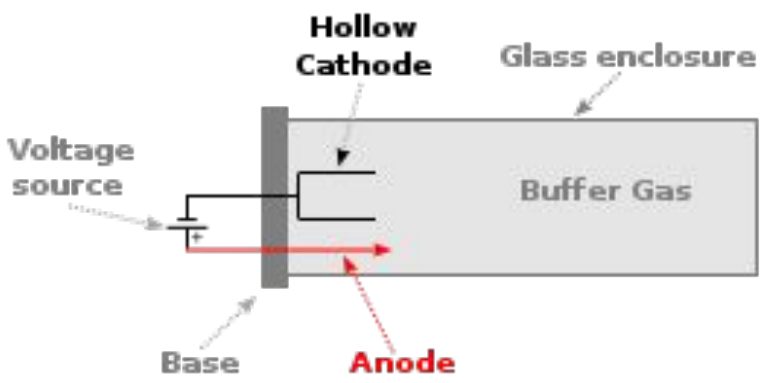


Ионизационная лампа Байарда-Альперта

Разряд с осциллирующими электронами

Разряд с полым катодом

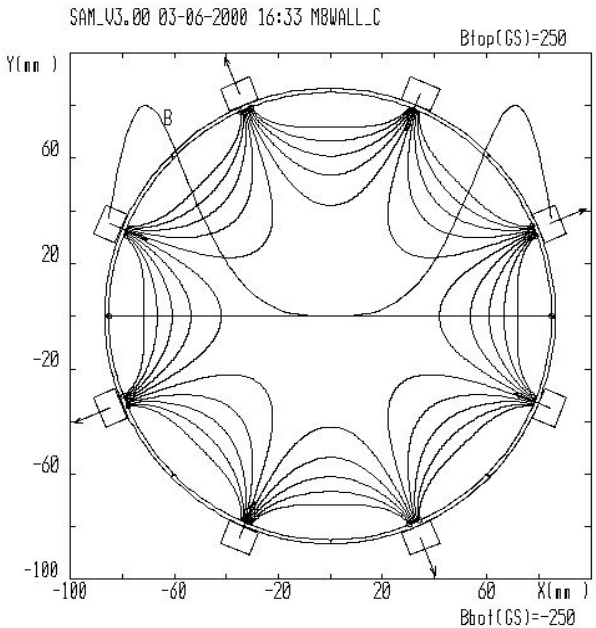
Электроны осциллируют в области полого катода
Ионы распыляют поверхность катода

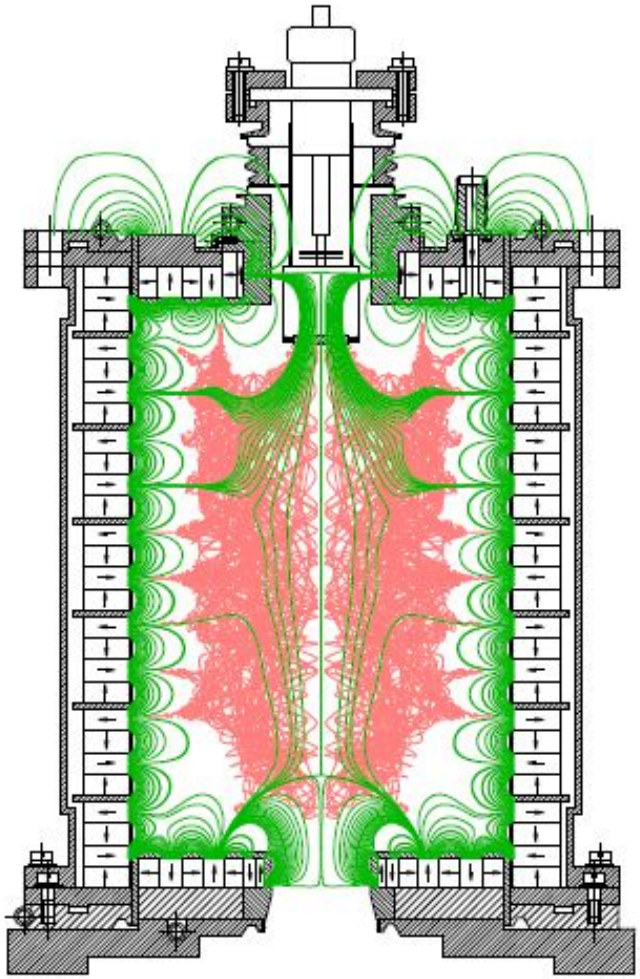


Лампа с полым катодом для спектрального анализа

Разряд с осциллирующими электронами

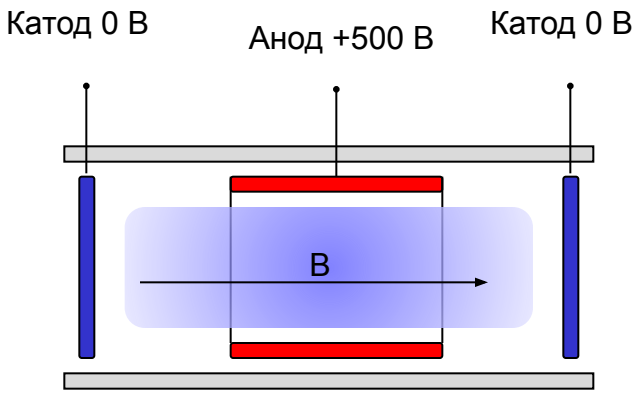
Мультипольная магнитная стенка

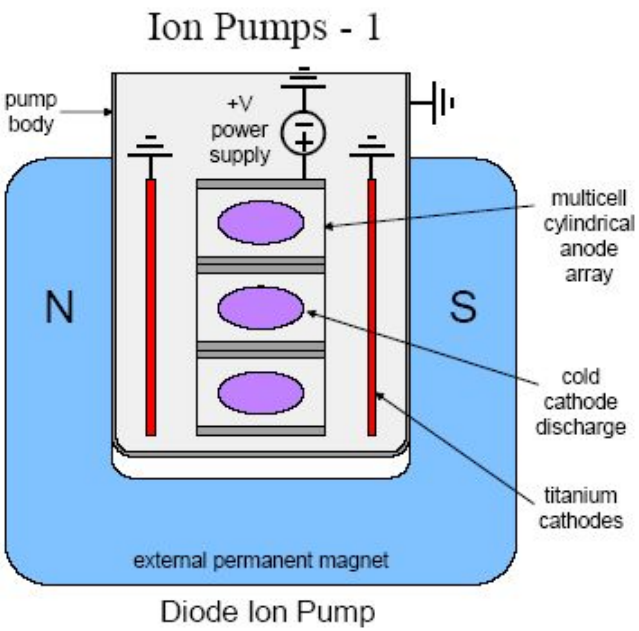




Разряд с осциллирующими электронами

Пенинговский разряд

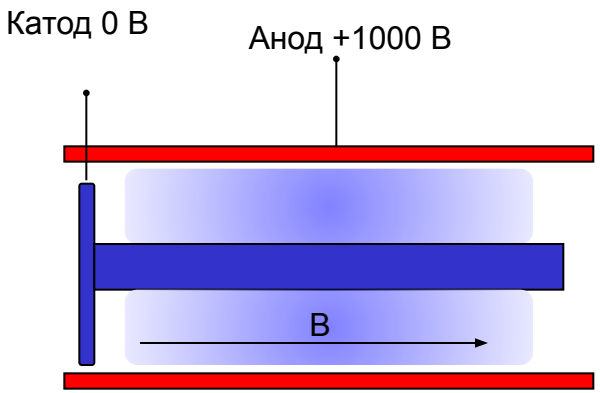


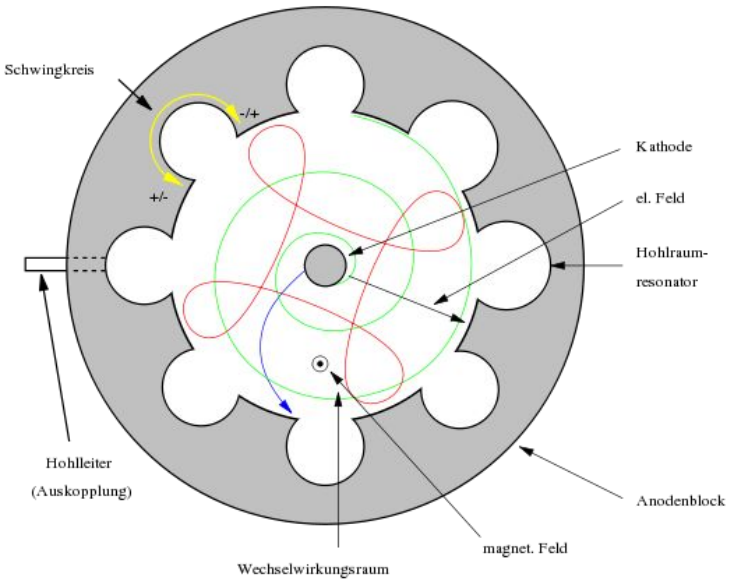


Магниторазрядный насос

Разряд с осциллирующими электронами

Магнетронный разряд

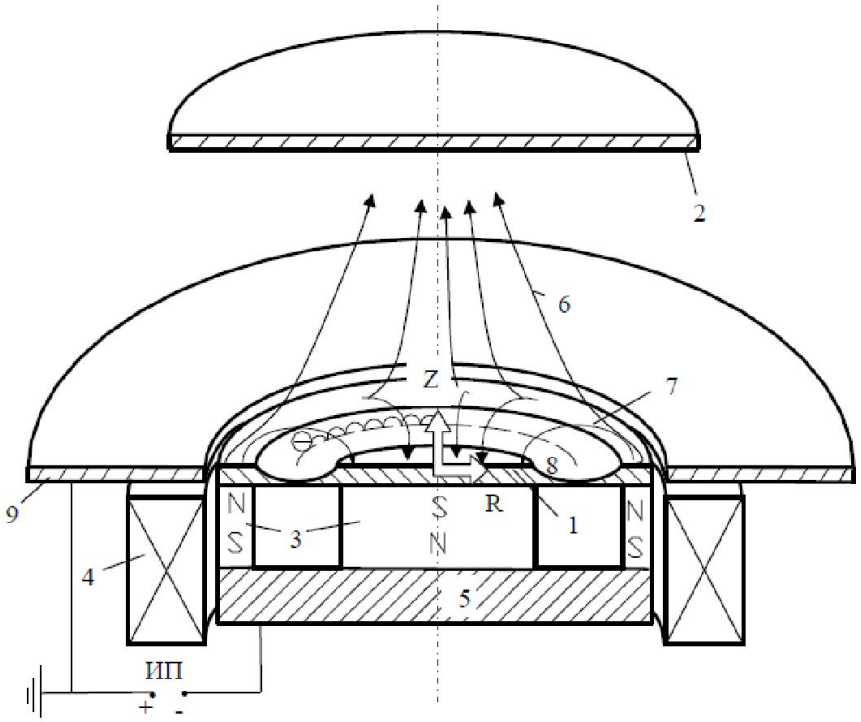




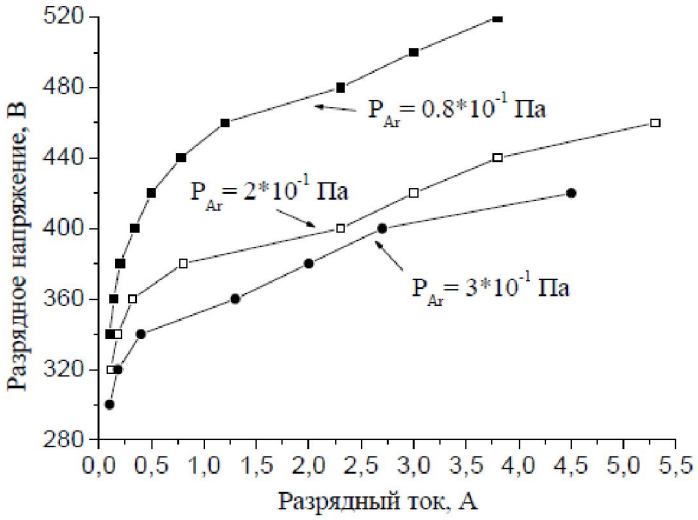
Магнетрон

Разряд с осциллирующими электронами

Магнетронный разряд

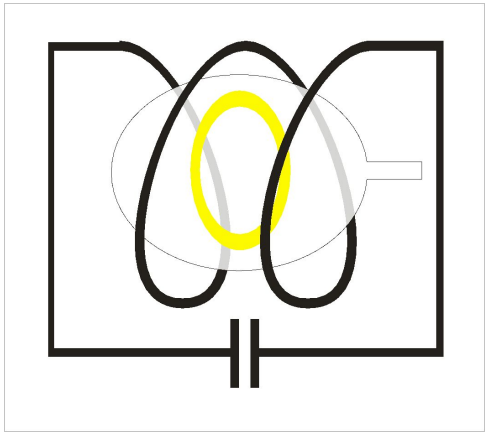


Магнетронная распылительная установка

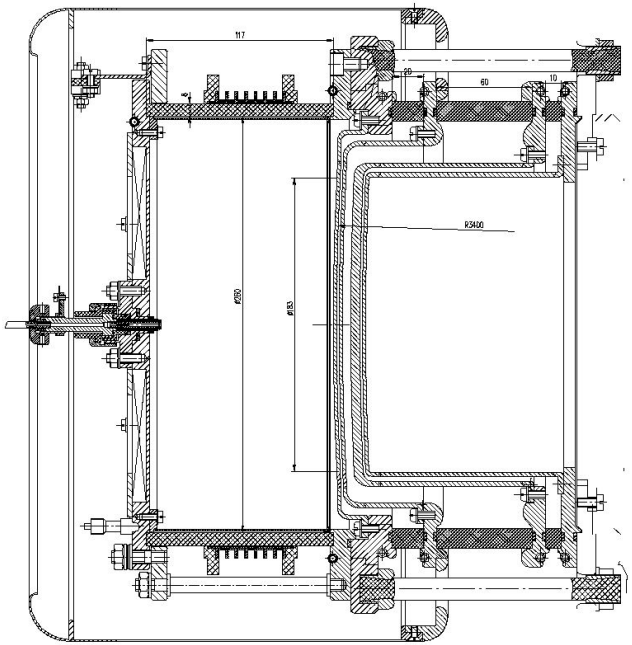


Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

Индуктивный разряд (inductively coupled plasma)



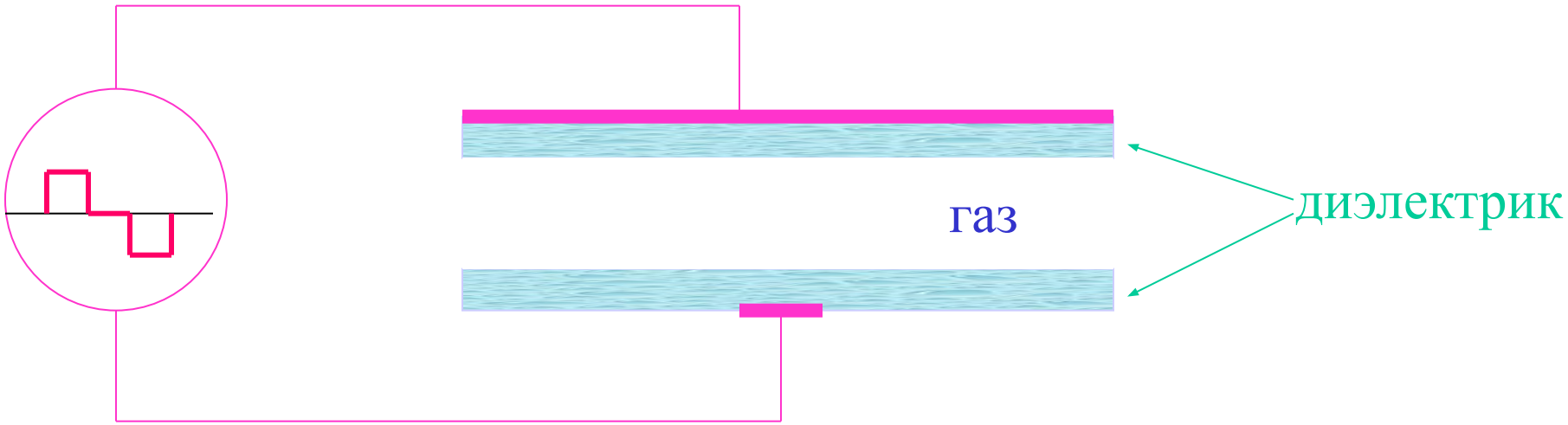
Электрическое поле генерируется индукционной катушкой
Характерная рабочая частота 13,56 МГц
Плотность плазмы до 10^{15} $см^{-3}$
Электронная температура 1-3 эВ



ВЧ эмиттер ионного источника

Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

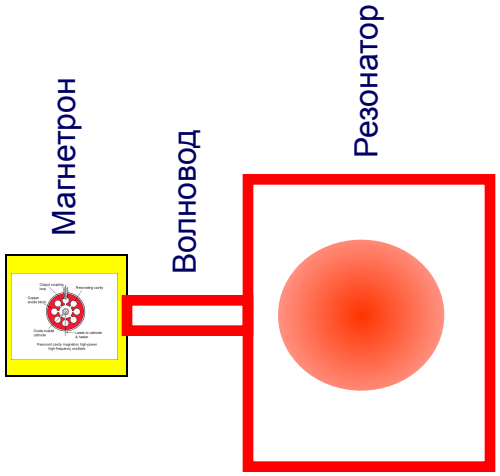
Емкостной разряд (capacitevely coupled plasma)

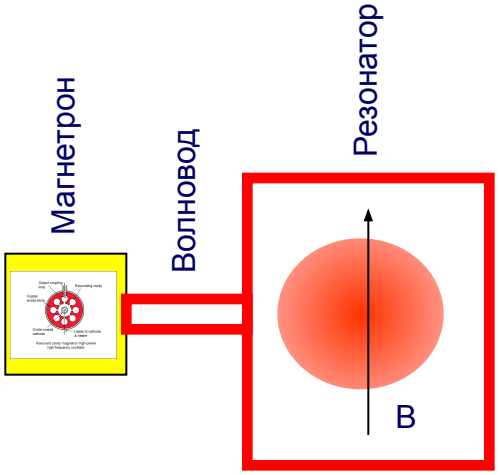


Безэлектродные разряды в ВЧ - поле

ВЧ разряды

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





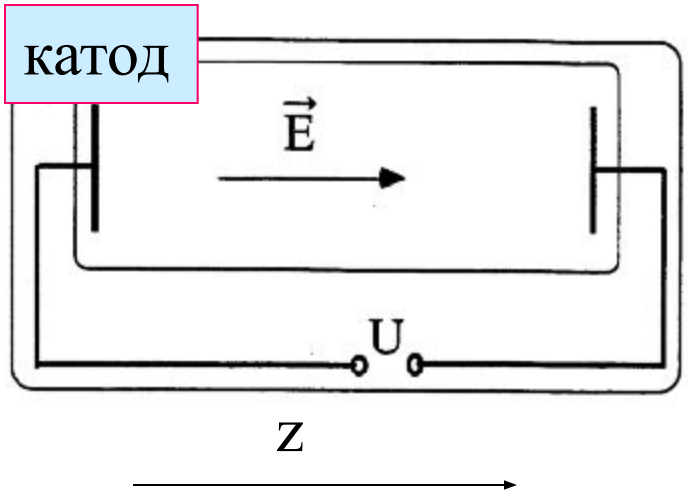
Электронно-циклотронный резонанс
2,45 ГГц – 87 мТл

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/ λ). На пути один сантиметр среднее число столкновений, очевидно, равно 1/ λ, а число пробегов длиной, большей или равной z, будет определяться выражением

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

$$\alpha \equiv P\left(z = \frac{I}{eE}\right) = An_0 \exp\left(-\frac{I\lambda}{eE}\right)$$

Б.А.Князев.“Низкотемпературная плазма и газовый разряд” Новосибтрск 2003

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

$$V_d \frac{dn_e}{dz} = n_0 n_e \langle \sigma_i V \rangle - n_i n_e \langle \sigma r V \rangle$$ - 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:

$$\alpha \simeq Ap \exp(-Bp/E)$$

Gas	A ionization / 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

α - первый коэффициент Таунсенда - количество актов ионизации на единицу длины пробега

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

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

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

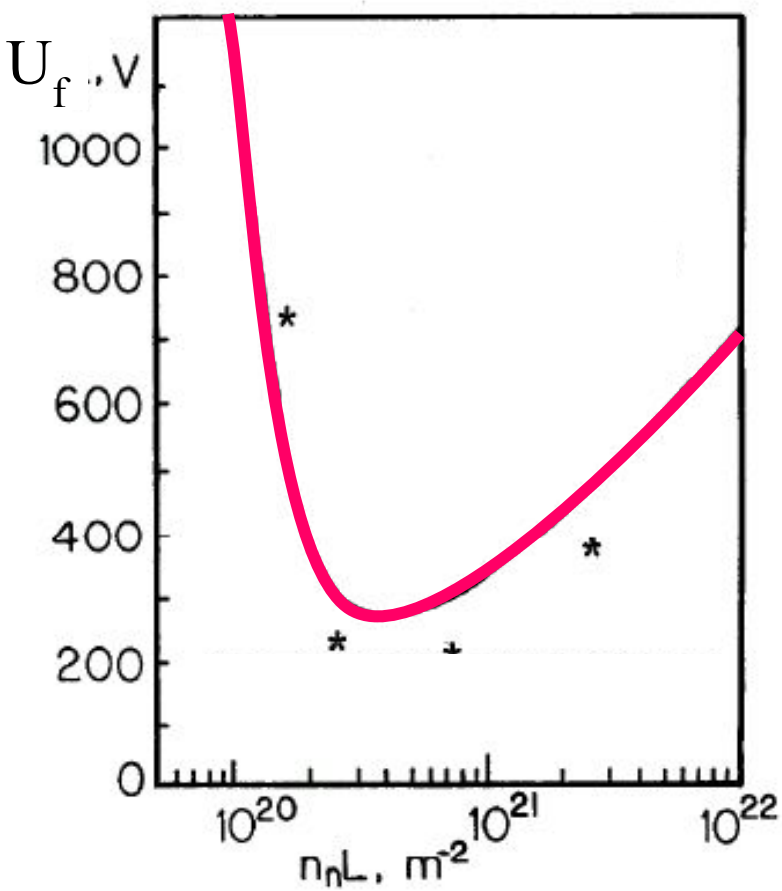
Кривая Пашена

Напряжение пробоя $U = E \cdot L$

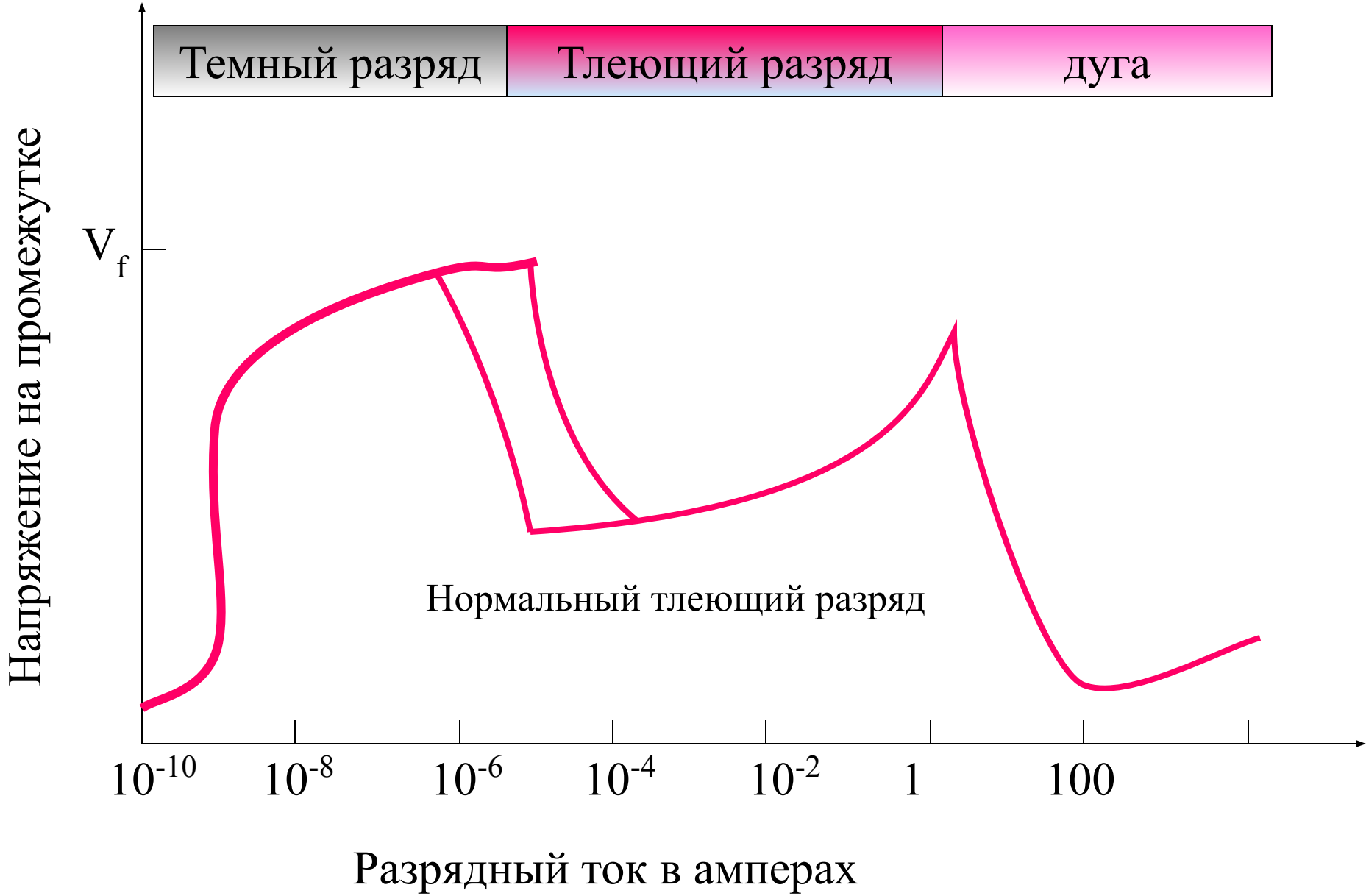
$$U = \frac{BpL}{\ln \frac{ApL}{\ln\left(1 + 1/\gamma\right)}}$$

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

длина свободного пробега



Электрический разряд в газах



Тлеющий разряд

В разрядном промежутке устанавливается самосогласованное распределение потенциала

Напряжение на разряде и плотность тока разряда постоянны

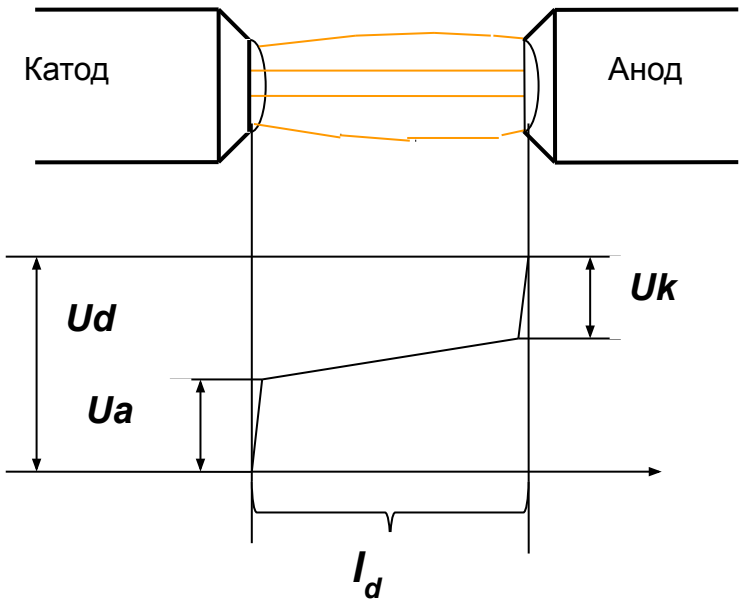
Дуга

Разогрев поверхности катода за счет ионной бомбардировки

Термоэлектронная эмиссия

Образование катодных пятен

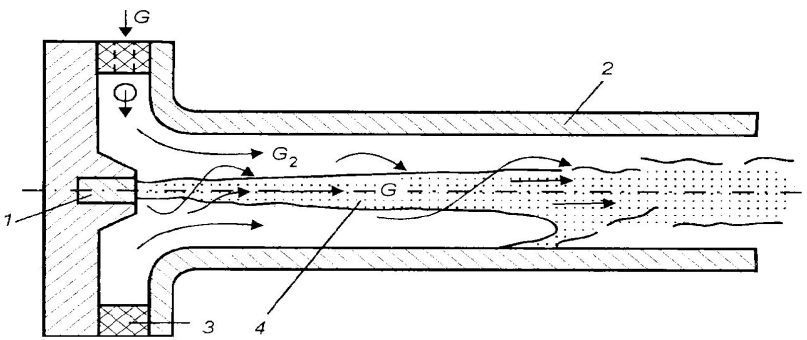
Свойства дуги как разряда в газе



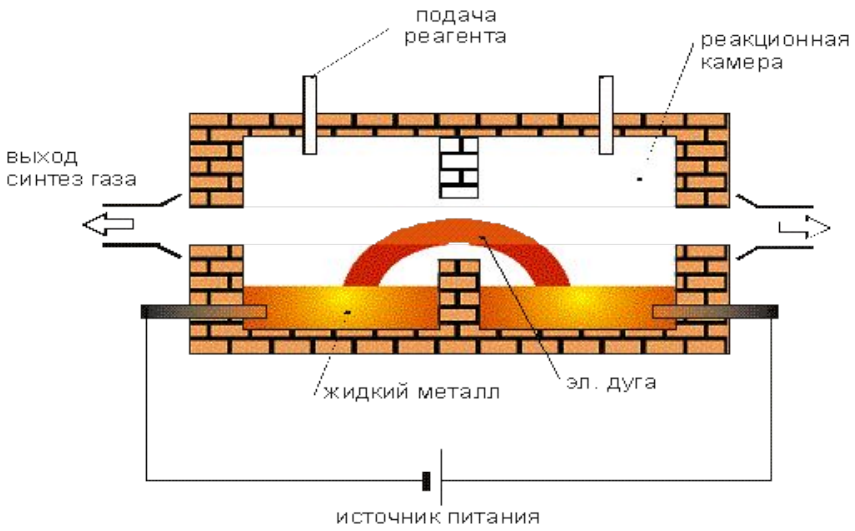
$$Ud=\alpha+\beta\times l$$

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

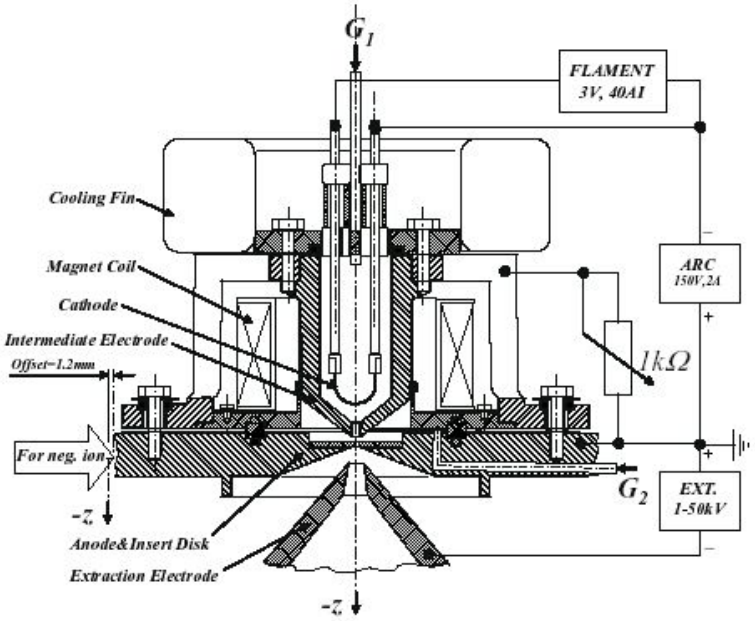
Плазмотроны



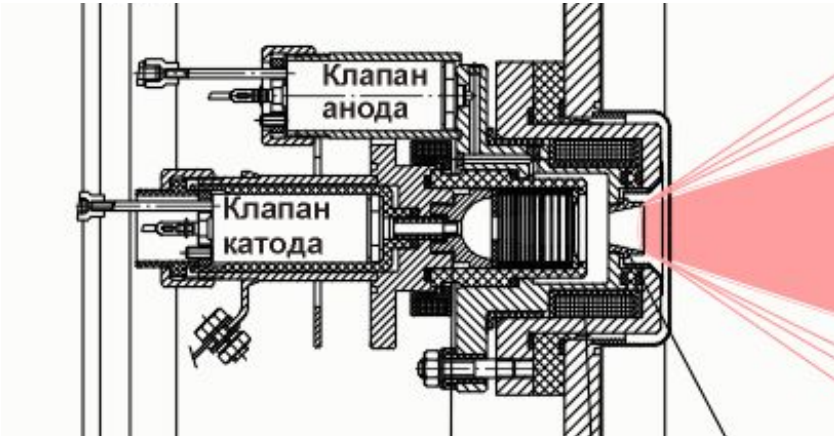
Плотность теплового потока ~ $10^6 \div 10^7 \; Вт/см^2$



Дуговые источники плазмы

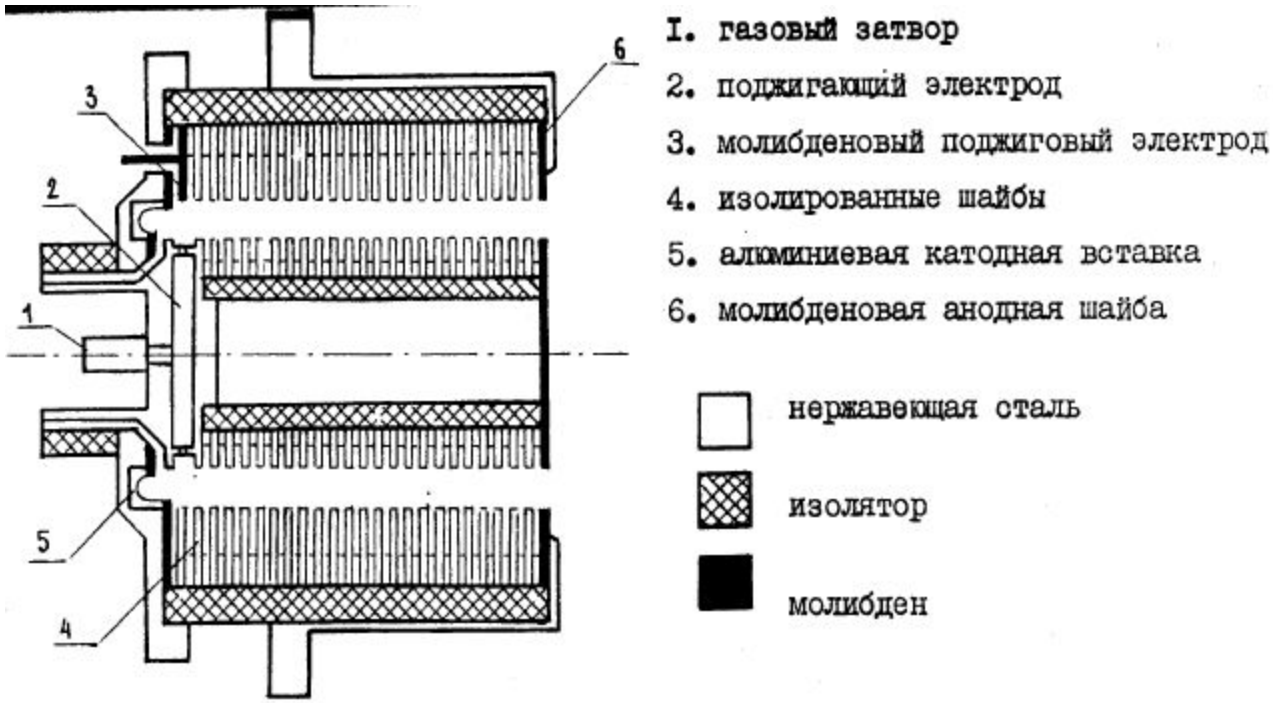


Дуоплазмотрон



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)

Te до 50 эВ

Плазменные пушки (ГДЛ)

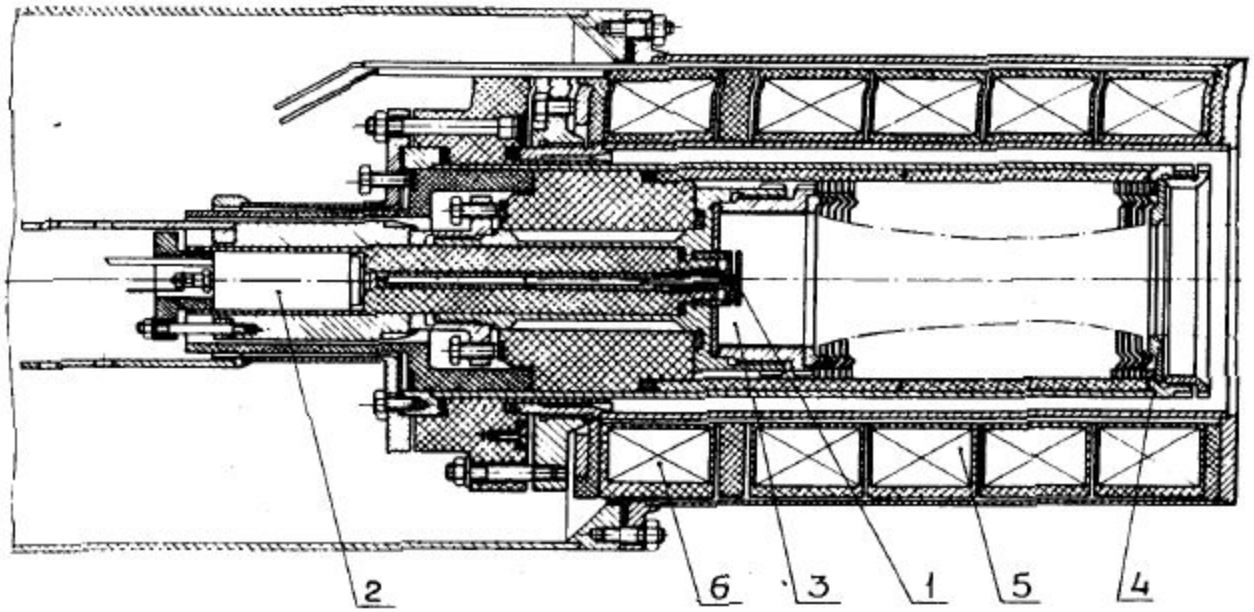


Рис.30. Конструкция плазменного источника

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

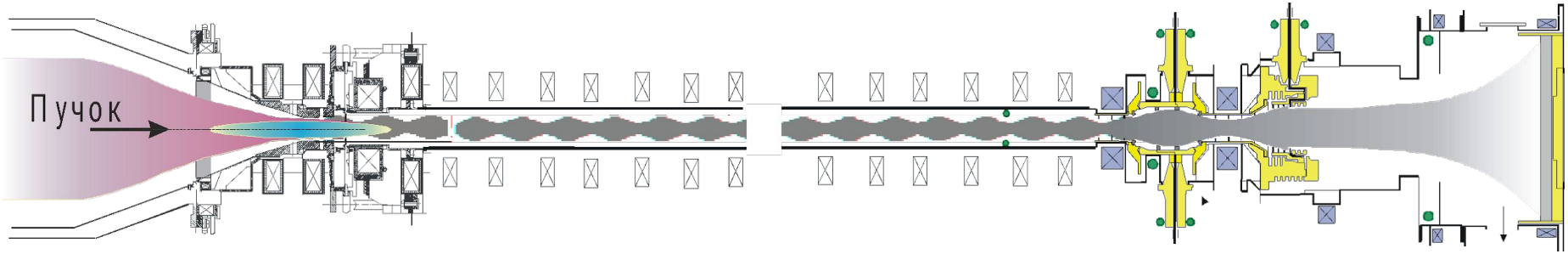
Начальная плазма АМБАЛ $4*10^{13}$ см$^{-3}$, 11 см, 0,22 Тл, пробки 15 Тл

Плазменная пушка в неоднородном магнитном поле

плотность 10^{13} – 10^{14} 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

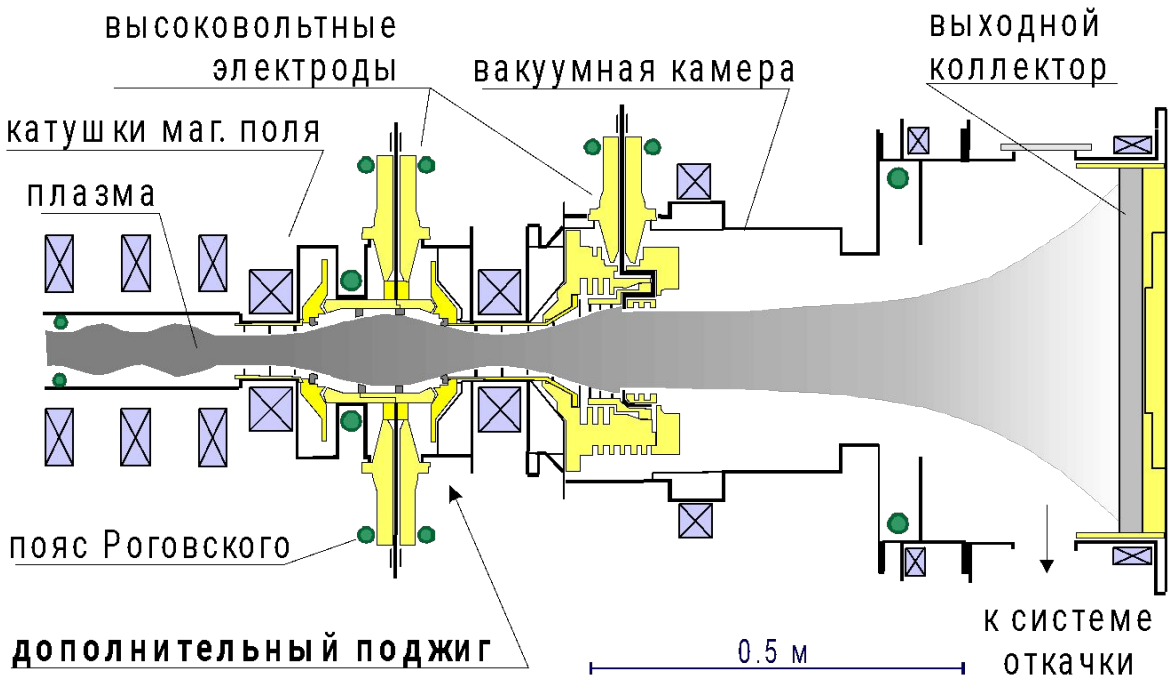
Уменьшение энергетической нагрузки на электроды и приемник пучка

Конструкция источника плазмы

ЗАДАЧИ

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

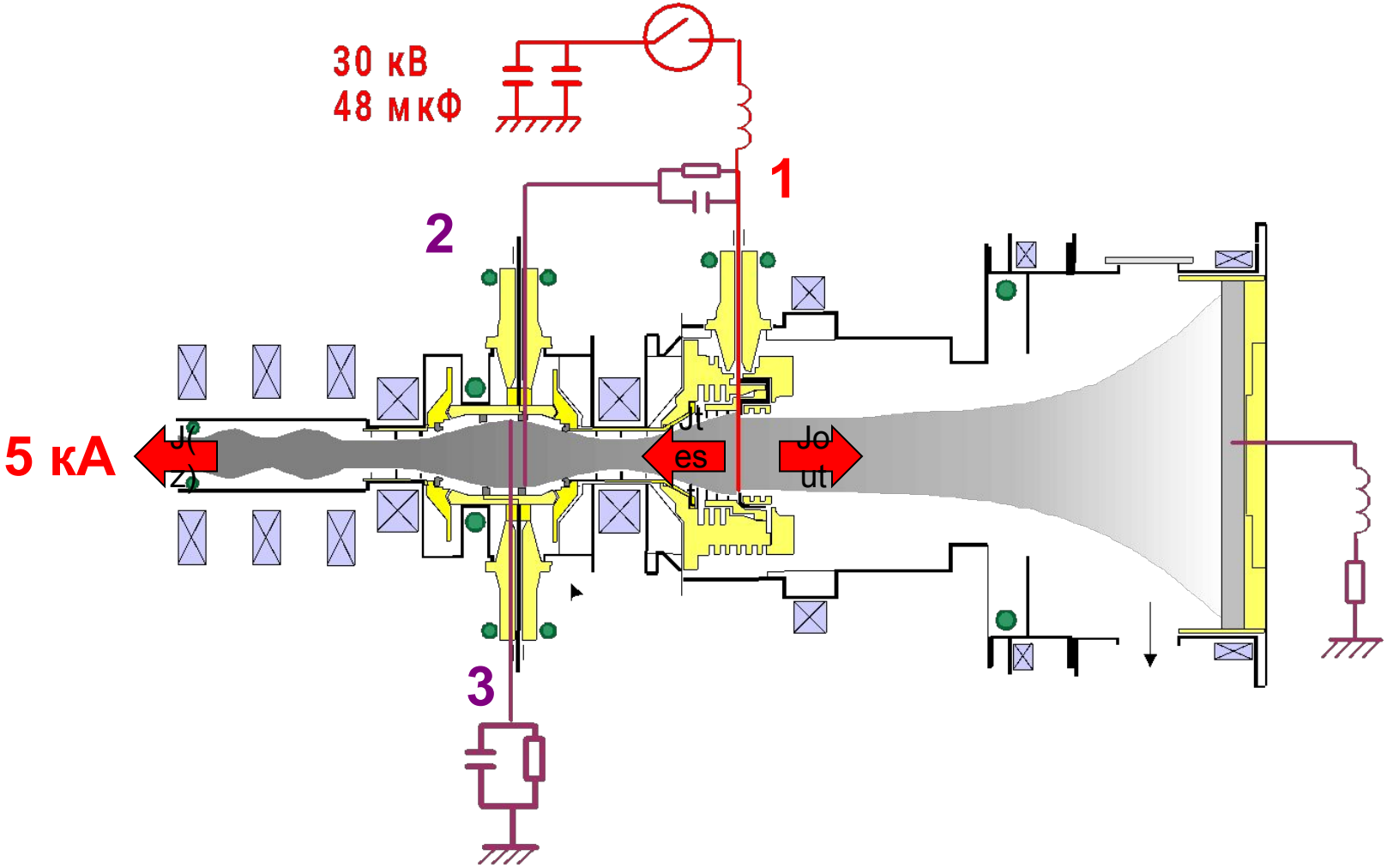
Уменьшение энергетической нагрузки на электроды и приемник пучка



•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