

Газовый разряд в неоне

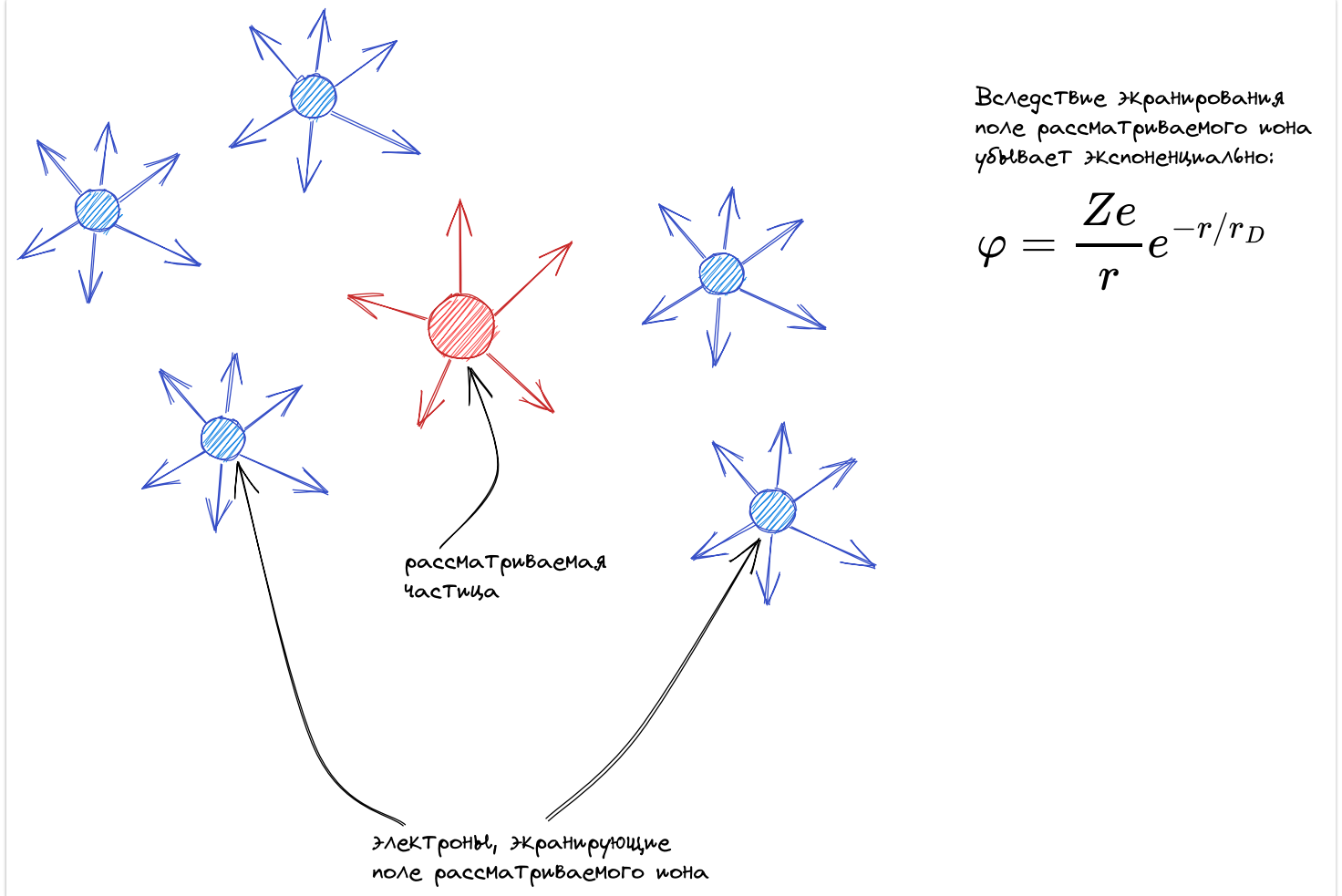
Ноябрь МФТИ - 2022

Шмаков Владимир Б04-105

Теоретические данные

Рассмотрим газ, в котором количество заряженных частиц сильно превосходит количество нейтральных. Такой газ будет обладать множеством свойств, которые отсутствуют у обычных газов. Именно поэтому выделяют отдельное агрегатное состояние вещества, называемое **плазмой**.

Одной из важнейших характеристик плазмы является радиус Дебая. **Радиус Дебая** – характерное расстояние на котором поле заряженной частицы экранируется полями других частиц:



Радиус Дебая может быть определён по формуле:

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_i}{n e^2}} \quad (1)$$

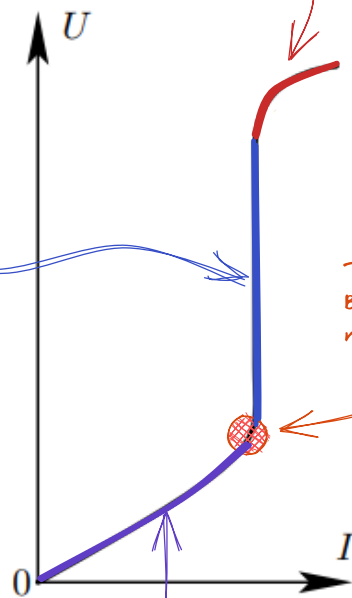
Где T_i - средняя «температура» ионов. В данном рассмотрении считаем, что kT_i - средняя энергия.

Газовый разряд - процесс ионизации газа вследствие воздействия электрического тока. Газовые разряды подразделяют на самостоятельные и несамостоятельные.

- **Несамостоятельный газовый разряд** - ионы в газе возникают вследствие воздействия внешних факторов. Таким фактором может являться ультрафиолетовое излучение. При отсутствии внешнего фактора, газ перестаёт быть ионизированным → перестаёт пропускать электрический ток.
 - **Самостоятельный газовый разряд** - ионизация поддерживается процессами в самом разряде
- Рассмотрим вольтамперную характеристику несамостоятельного газового разряда:

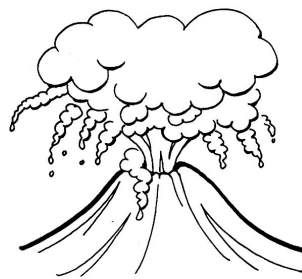
Лавинный пробой. Вследствие большого электрического поля электроны приобретают большую энергию. Теперь они способны выбивать электроны из нейтральных атомов. Данный процесс называется вторичной ионизацией

Кривая насыщения - все создаваемые ионизатором заряды протекают через цепь



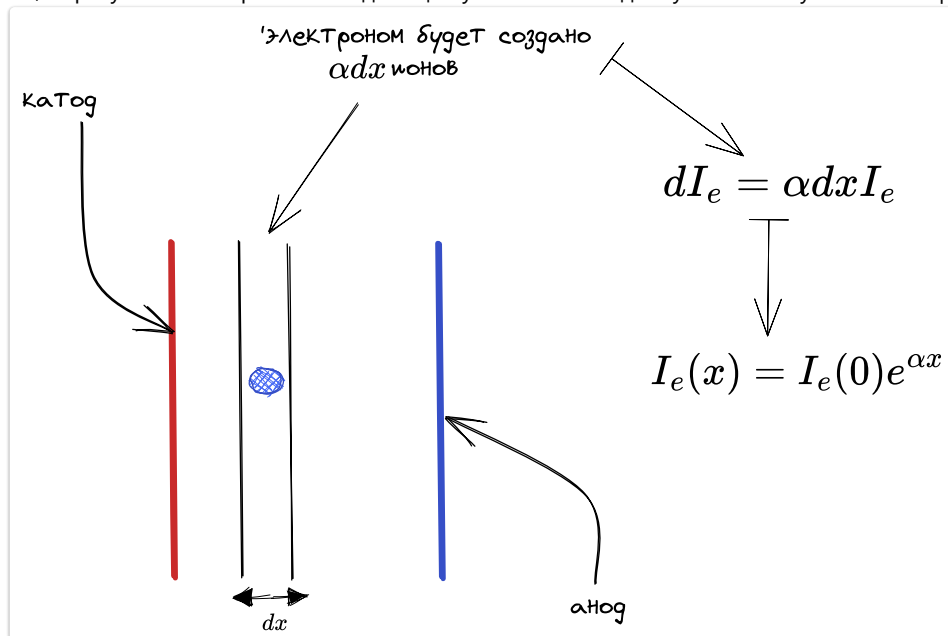
Точка насыщения - все ионизированные заряды притягиваются на электроды

Несамостоятельный газовый разряд - ток течет вследствие ионизации газа внешним излучением



На красном участке разряд уже можно считать самостоятельным. Он будет поддерживаться при отсутствии внешнего ионизатора.

Для описания эффекта вторичной ионизации ввели величину коэффициента объемной ионизации. Коэффициент объемной ионизации $[\alpha]$ - количество электронов, образуемых электроном на единице пути. Рассчитать данную величину позволяет формула Таунсенда:



Вышеописанный вывод верен только в том случае, если поле между катодом и анодом статическое. Таким образом формула

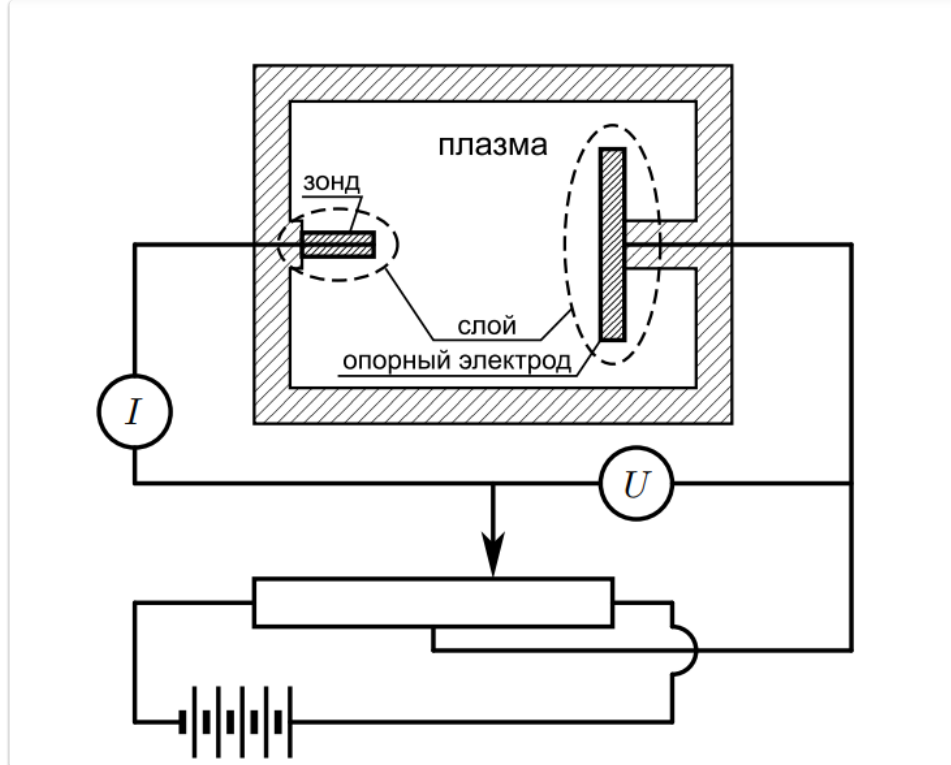
$$I_e(d) = I_e(0)e^{\alpha d}$$

(2)

позволяет лишь оценить величину α .

Исследование одиночных зондов

Рассмотрим схему для исследования вольт-амперной характеристики плазмы:

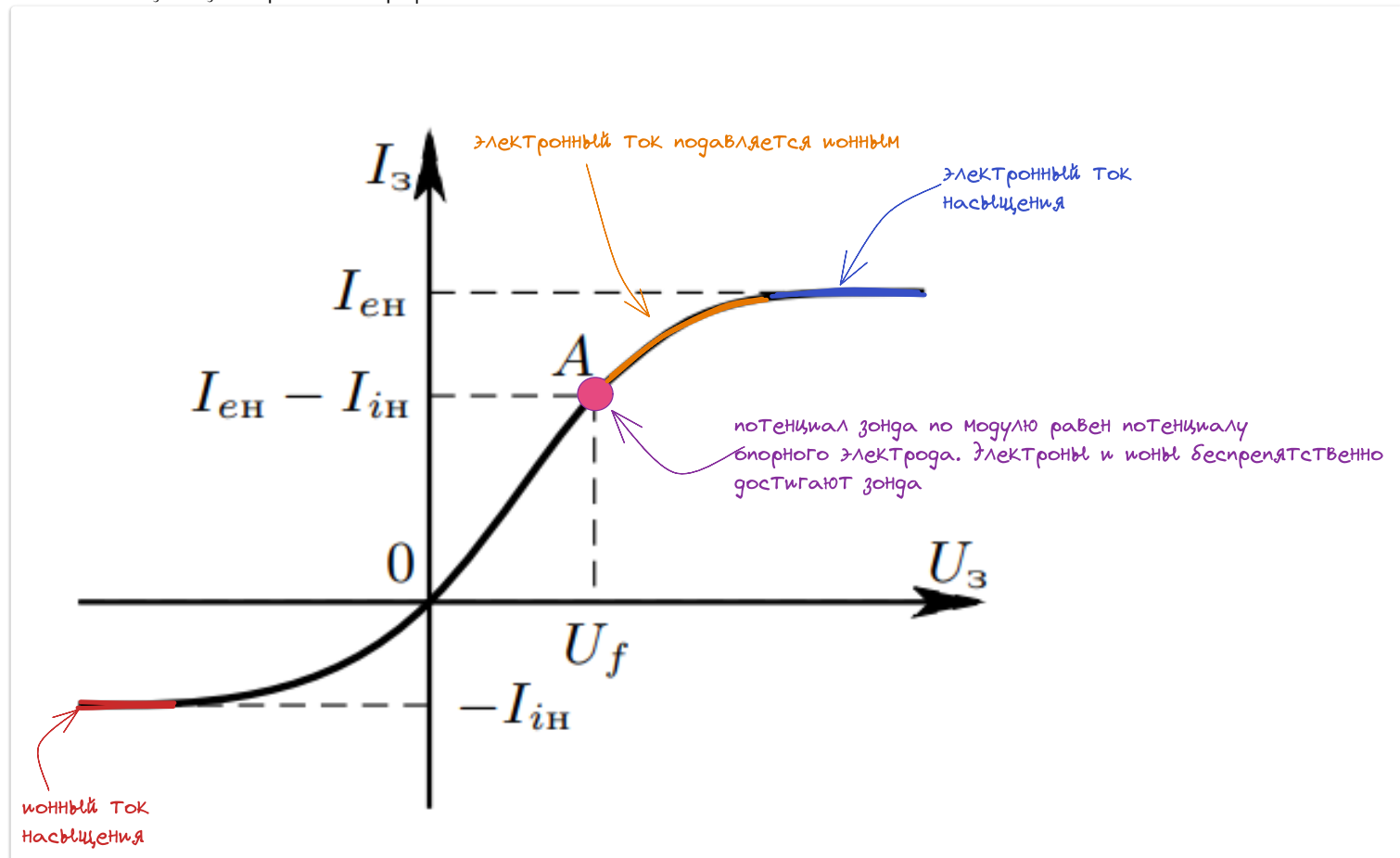


Рассмотрим как зависит ток I_z от потенциала U_z .

Для начала закоротим зонд и опорный электрод. При внесении электродов в плазму суммарный ток будет равен нулю. Это происходит вследствие возникновения на электродах **плавающего потенциала** ($-U_f$).

Дело в том, что электроны достигают контактные площадки быстрее, чем ионы. «Накопленные» электроны и создают плавающий потенциал. Плавающий потенциал замедляет электроны, и ускоряет ионы. Таким образом электронный ток будет скомпенсирован ионным.

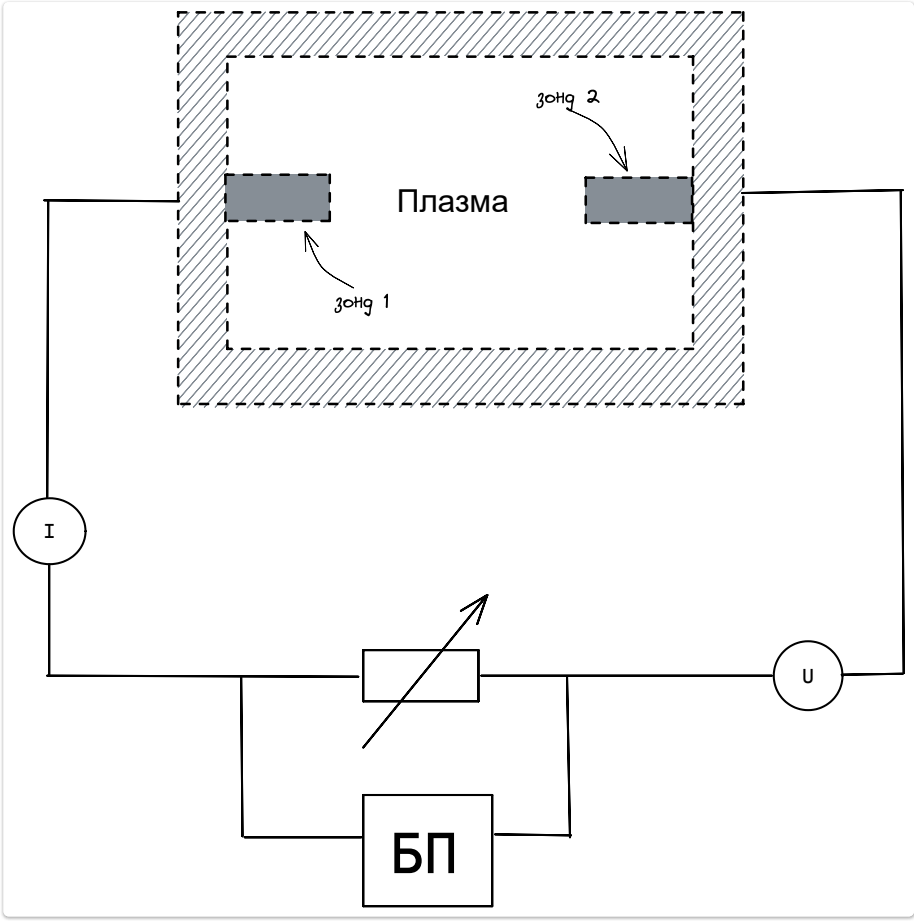
Зависимость I_z от U_z изображена на графике ниже:



Для вычисления ионного тока насыщения применяется формула, предложенная Бомом:

$$I_{iH} = 0.4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \quad (3)$$

Двойной зонд - система, состоящая из двух зондов, находящихся на небольшом расстоянии:



При отсутствии разности потенциалов между зондами ток в цепи равен 0.

При подаче напряжения U ток может быть найден по формуле:

$$I = I_{\text{иН}} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} \tag{4}$$

Вольт-амперная характеристика двойного зонда очень похожа на вольт-амперную характеристику одиночного. Однако эту схему удобнее применять при выполнении лабораторных работ. С её помощью удобно находить «температуру» электронов в плазме:

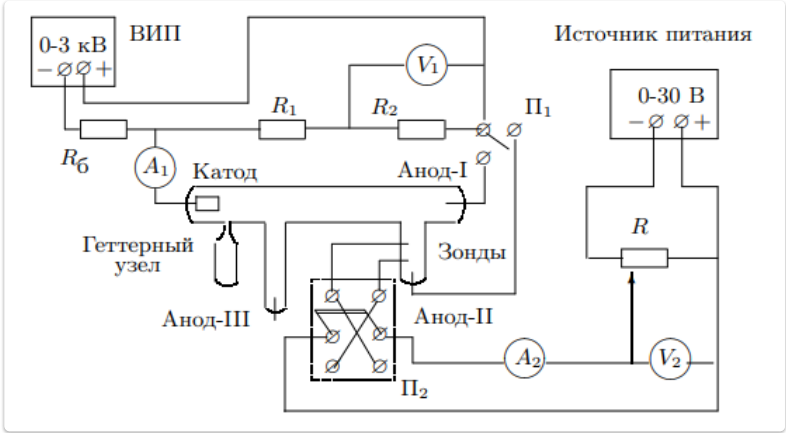
$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{иН}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}} \tag{5}$$

формула работает в приближении, и верна только в том случае, если наклон участка насыщения ВАХ крайне маленький.

Методика

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена ниже:



В эксперименте использовался изотоп неона ^{22}Ne при давлении 2 мм.рт.ст.

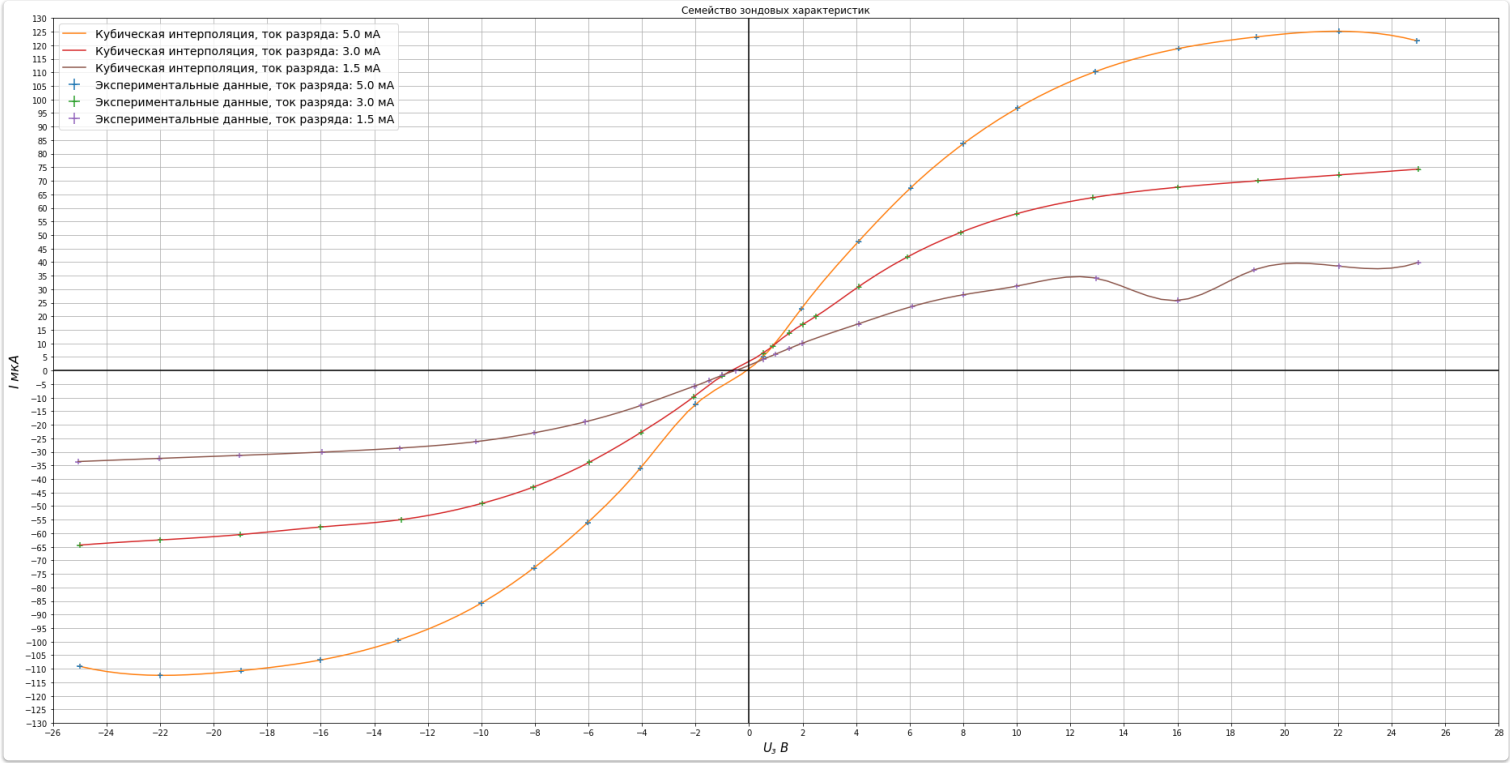
При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром A_1 , а падение напряжения на разрядной трубке — цифровым вольтметром V_1 (B7-38), подключённым к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$.

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром $d = 0,2\text{ мм}$ и имеют длину $l = 5,2\text{ мм}$. Они подключены к источнику питания (0–30 В) через потенциометр R. Переключатель П2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Величина напряжения на зондах изменяется с помощью дискретного переключателя «V» выходного напряжения источника питания и потенциометра R, а измеряется вольтметром $V2$. Для измерения зондового тока используется микроамперметр A2.

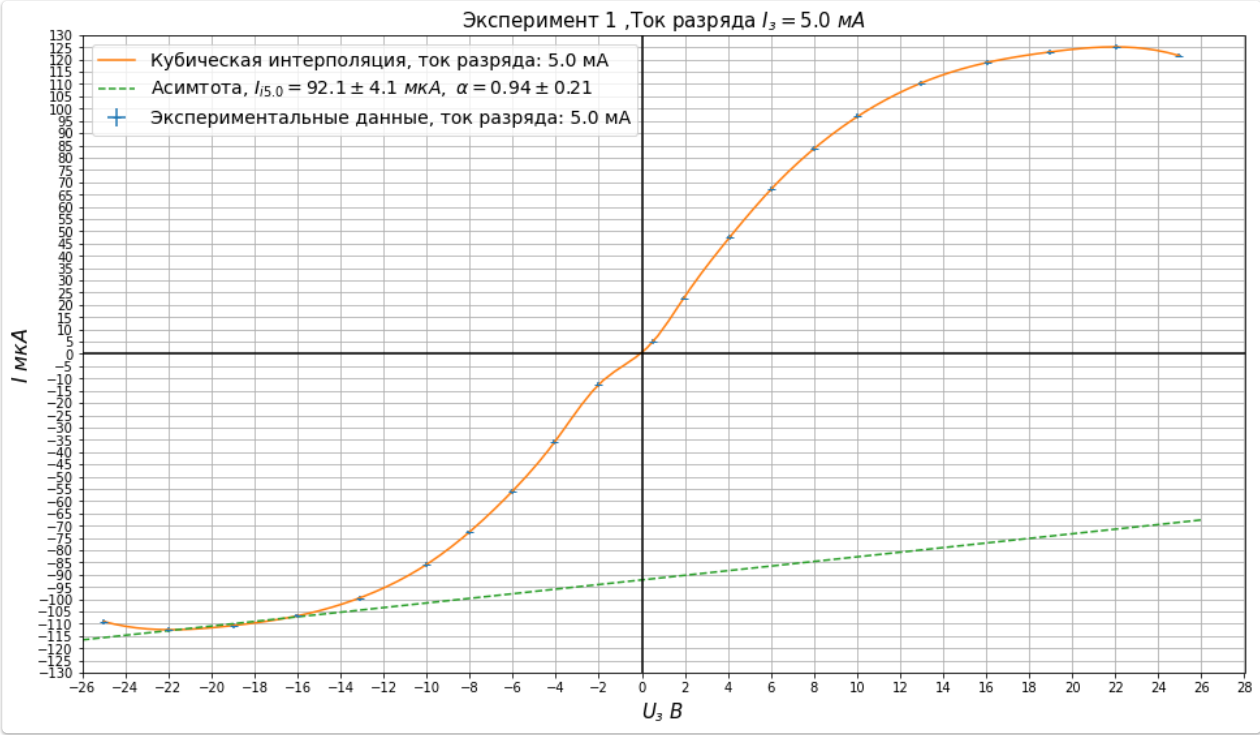
Обработка результатов эксперимента

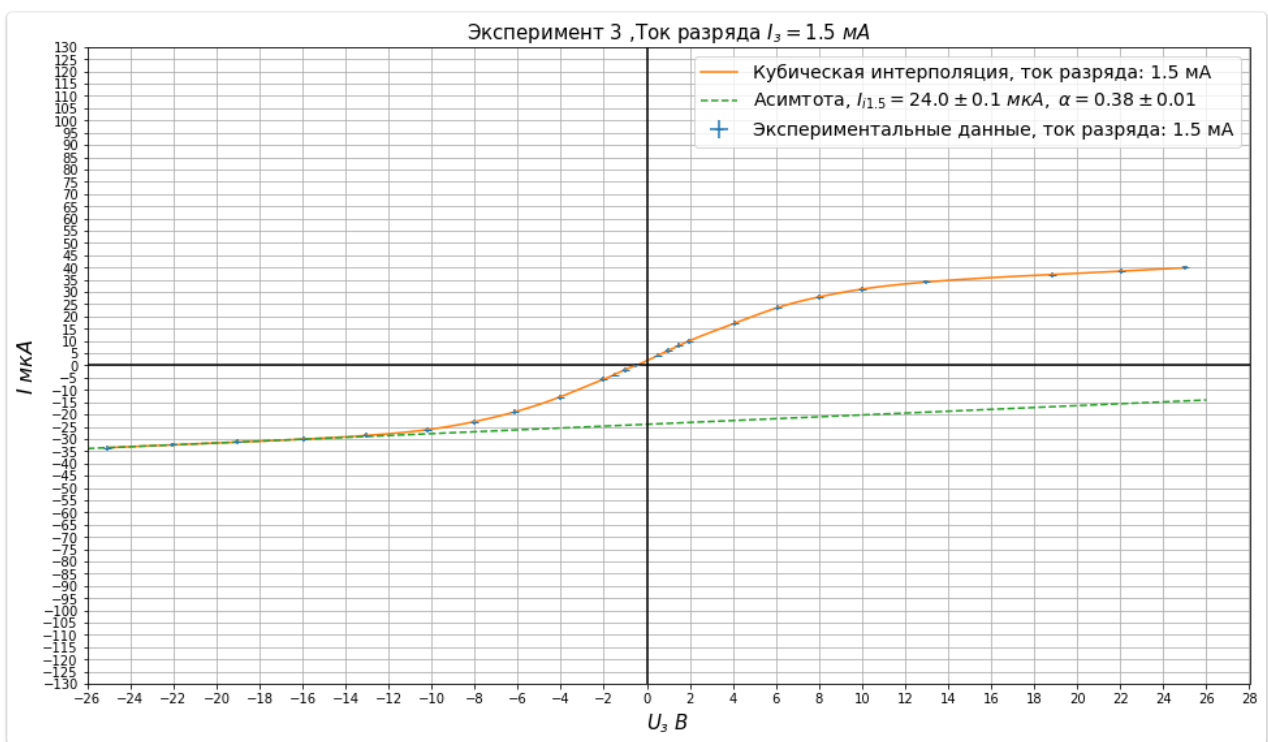
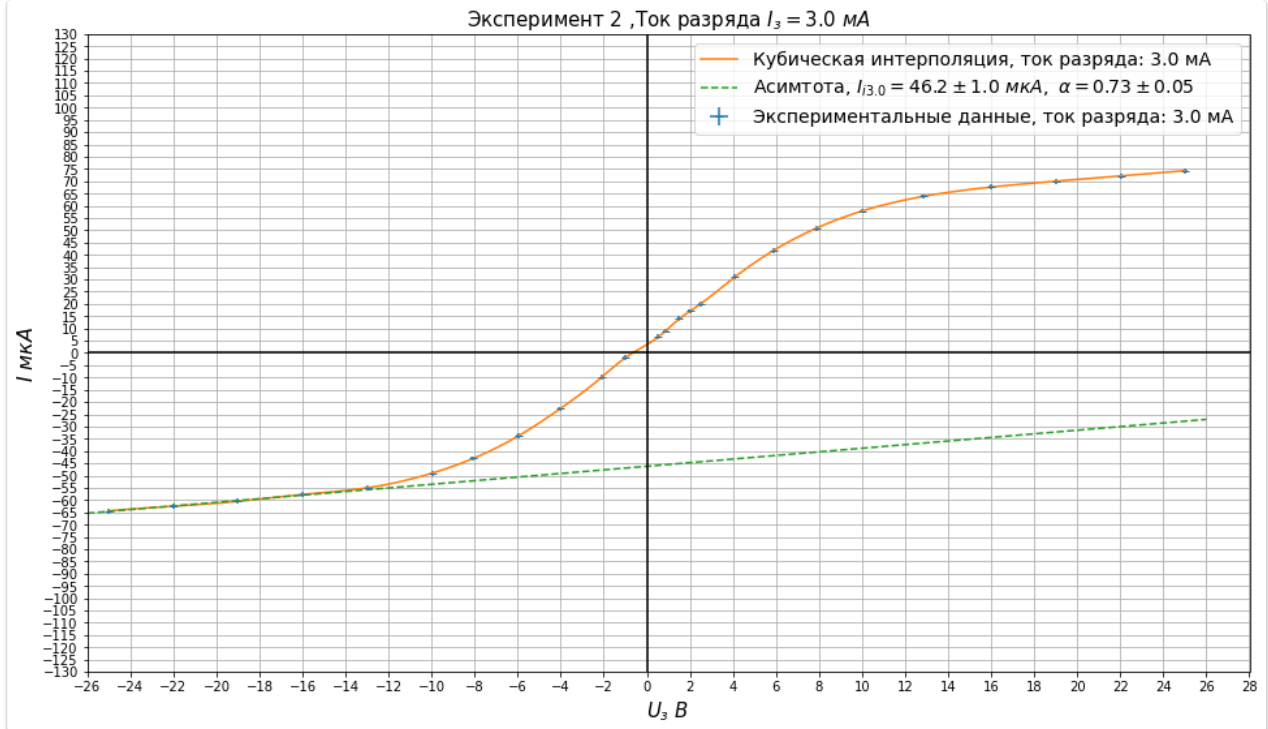
Зондовые характеристики

Построим зондовые характеристики, полученные при разных токах разряда:



Проведём асимптоты к каждому из графиков. Это позволит найти ионный ток насыщения:





В результате получаем:

Ток разряда I_3	Ионный ток насыщения $I_{ин}$
1.5 мА	$24 \pm 0.1 \text{ мкА}$
3 мА	$46.2 \pm 1 \text{ мкА}$
5 мА	$92 \pm 4 \text{ мкА}$

Вычисление параметров плазмы

По формулам (5),(3) определим концентрацию и «температуру» электронов. В результате получим:

	Ток разряда $I_3, \text{мА}$	Температура электронов $T_e \cdot 10^3 \text{ К}$	ΔT_e	Концентрация электронов $n_e \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$	Δn_e
0	5	72.9	3.3	2.3	0.1
1	3	51.7	1.2	1.4	0.07
2	1.5	33.6	0.2	0.92	0.04

Теперь можем оценить частоту колебаний электронов и Дебаевский радиус:

Ток разряда $I_3, \text{мА}$	Радиус Дебая $r_D \cdot 10^{-4} \text{ м}$	Δr_D	Частота колебаний $\omega_p \cdot 10^4 \text{ рад/с}$	$\Delta \omega_p$
------------------------------	--	--------------	---	-------------------

	Ток разряда $I_j, \text{мА}$	Радиус Дебая $r_D \cdot 10^{-4}, \text{м}$	Δr_D	Частота колебаний $w_p \cdot 10^4 \text{рад/с}$	Δw_p
0	5	2.5	0.1	1.9	0.2
1	3	3.2	0.2	1.1	0.1
2	1.5	4	0.2	0.7	0.04

По формуле (2) оценим максимально возможно значение степени ионизации α в эксперименте. Получим:

$$\alpha_{max} = 12 \cdot 10^7$$

Такое значение могло быть достигнуто только в первом эксперименте(при токе заряда равном пяти миллиамперам).

Вывод

В эксперименте удалось оценить параметры плазмы. Порядок величин совпал с табличным.