

# Бичина Марина Б04-005, Лабораторная работа №.3.5.1

## Цель работы:

1. Измерить вольт-амперную тлеющего характеристику тлеющего разряда
2. Измерить зондовые характеристики при разных токах разряда и изучить таким образом свойства плазмы (концентрацию и температуру электронов в плазме, степень ионизации, плазменную частоту и дебаевский радиус экранирования)

## Оборудование:

1. Стеклоанная газоразрядная трубка, наполненная неоном
2. Высоковольтный источник питания
3. Источник питания постоянного тока
4. Делитель напряжения
5. Потенциометр
6. Амперметры
7. Вольтметры
8. Переключатели

## Теоретическая справка:

Плазмой называют ионизированный газ, дебаевский радиус которого  $r_d$  во много раз меньше характерного размера объема, занимаемого этим газом

Дебаевский радиус - характерная длина, с которой с расстоянием экспоненциально убывает поле иона вследствие экранирующего действия

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}} = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n}} \quad (1)$$

так же его можно определить как амплитуду ленгмюровских колебаний плазмы, возбуждаемых тепловыми флуктуациями.

Число частиц в дебаевской сфере - число частиц, много больших единицы, для которых потенциальная энергия взаимодействия 2 заряженных частиц существенно меньше тепловой энергии. Их число примерно равно

$$N_D \approx n \cdot \frac{4}{3} \pi r_D^3 \approx 0.1 \frac{1}{e^3} \sqrt{\frac{kT_e^3}{n}}$$

Плазменная частота - время отклика на флуктуацию плотности заряда в плазме

$$\omega_p = \frac{4\pi ne^2}{m} = 5.65 \cdot 10^4 \sqrt{n} \Rightarrow r_D = \frac{\vartheta}{\omega_p} \quad (2)$$

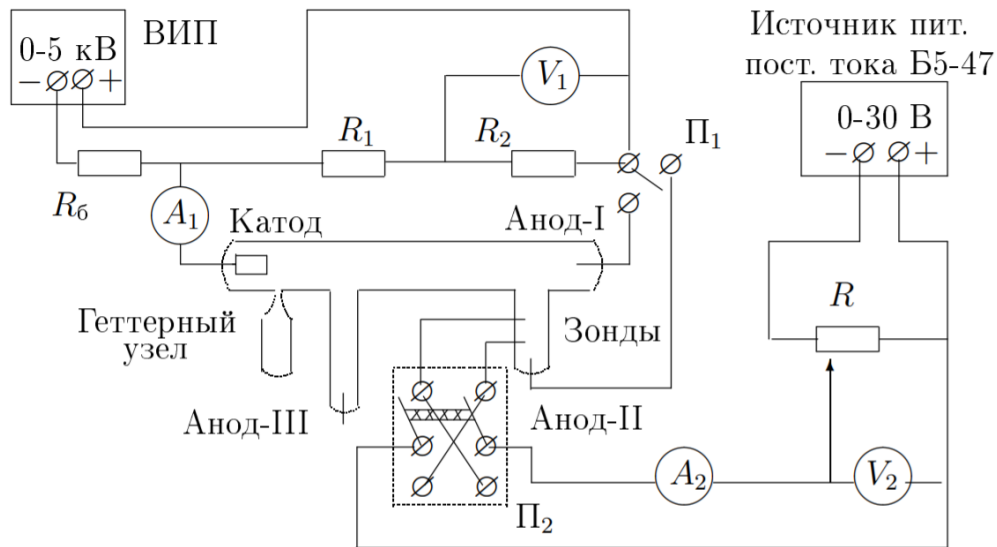
Температура электронов в энергетических единицах

$$k_B T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{in}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}} \quad (3)$$

Концентрация заряженных частиц:

$$n_i = \frac{I}{0.4eS} \sqrt{\frac{m_i}{2k_B T_e}} \quad (4)$$

### Описание установки:



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный полый катод, три анода и *геттерный* узел. Трубка наполнена изотопом неона  ${}^2_2\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450$  кОм) к регулируемому ВИП с выходным напряжением до 5 кВ.

Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром  $d = 0.2$  мм и имеют длину  $l = 5.2$  мм.

### Ход работы:

1. Рассмотрим ВАХ разряда: для этого по снятым данным построим график

Далее по наклону прямой найдем максимальное дифференциальное сопротивление разряда, получим  $\frac{dU}{dI} = -310 \pm 10$  Ом

Так же, мы можем сравнить полученных выше график с вольт-амперной характеристикой разряда в неоне. Построим график в логарифмических координатах. Можно заметить, что значение сопротивления у нас вышло отрицательным. Здесь нет ошибки.

Дифференциальное сопротивление может быть отрицательным, поскольку возрастание тока приводит к возрастанию концентрации ионов, из-за чего возрастает проводимость и понижается напряжение.

Сам график соответствует промежутку Д-Г

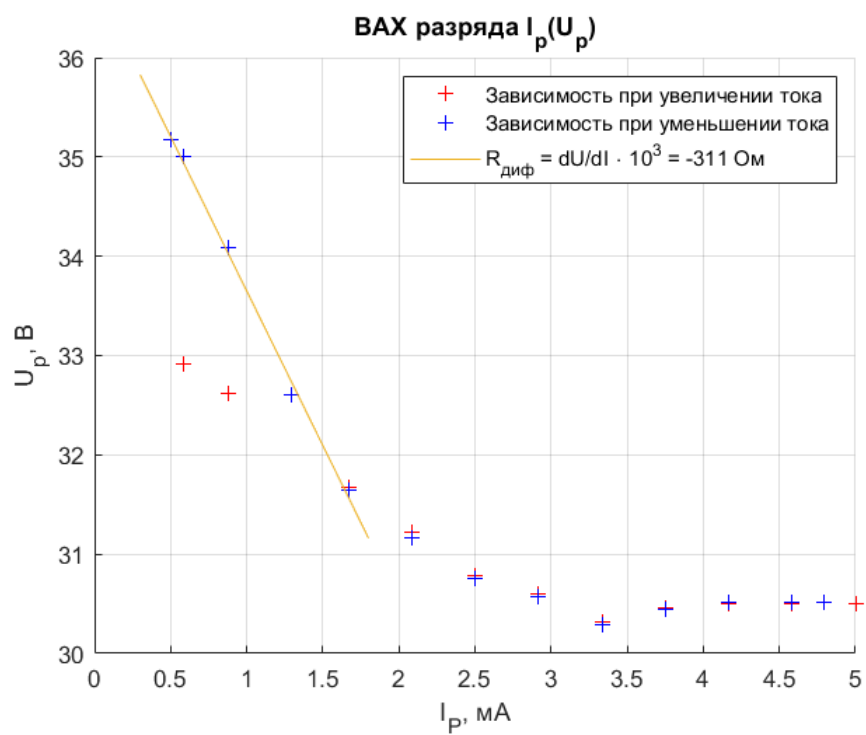


Рис. 1:

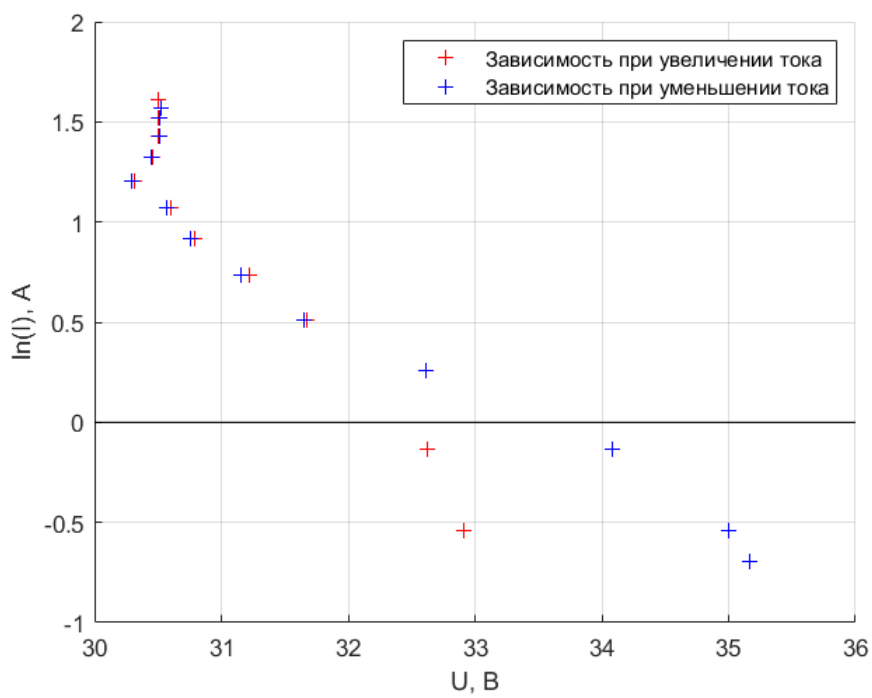


Рис. 2:

## 2. Зондовые характеристики

Обработка графиков будет производиться в виде:

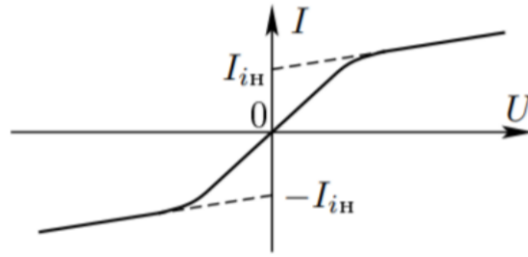


Рис. 3: ВАХ двойного зонда

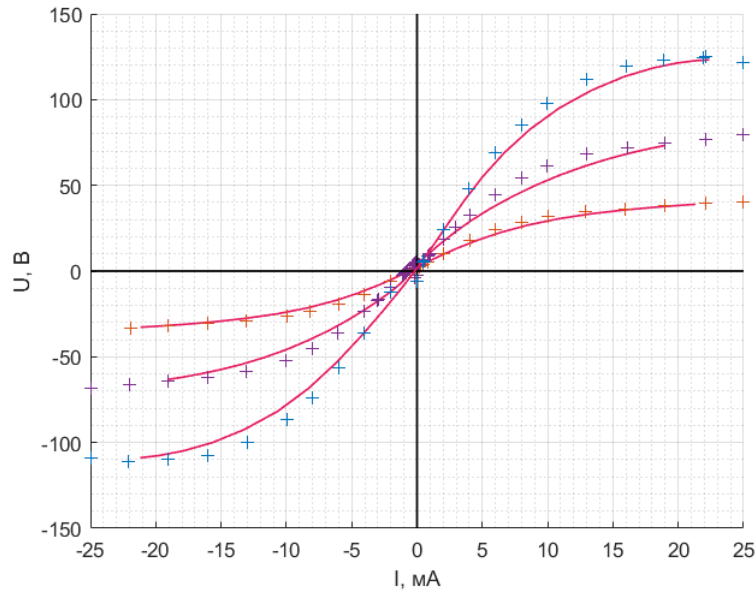


Рис. 4: семейство вольт-амперных характеристик двойного зонда  $I_3(U_3)$ , с постоянным током разряда в диапазоне от 1.5 до 5 мА

Ионный ток насыщения  $I_{и}$  мы можем определить, проведя прямые по МНК:  $y = ax + b$ , где коэффициент  $b = I_{и}$  (на графиках соответствует уравнению 1)

Величину  $\Delta U$  мы можем определить по графику 2, подставляя  $y = I_{и}$  ( $\Delta U$  соответствует значению  $x$  в данном уравнении)

- по данным из графиков построим таблицу для  $I_p$ ,  $I_{и}$ ,  $\Delta U$  и их погрешностей:

|                         |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|
| $I_p$ , дел             | 120  | 75   | 37.5 |
| $I_p$ мА                | 4.8  | 3    | 1.5  |
| $I_{и}$ мА              | 111  | 55   | 27   |
| $\sigma_{и}$ мА         | 4.62 | 1.22 | 0.28 |
| $\Delta U$ , В          | 11.1 | 7.86 | 9    |
| $\sigma_{\Delta U}$ , В | 0.65 | 0.38 | 0.15 |

Таблица 1: Сводная таблица ВАХ двойного зонда для токов разряда 4.8-1.5 мА

- Рассчитаем температуру электронов и концентрацию заряженных частиц по фор-

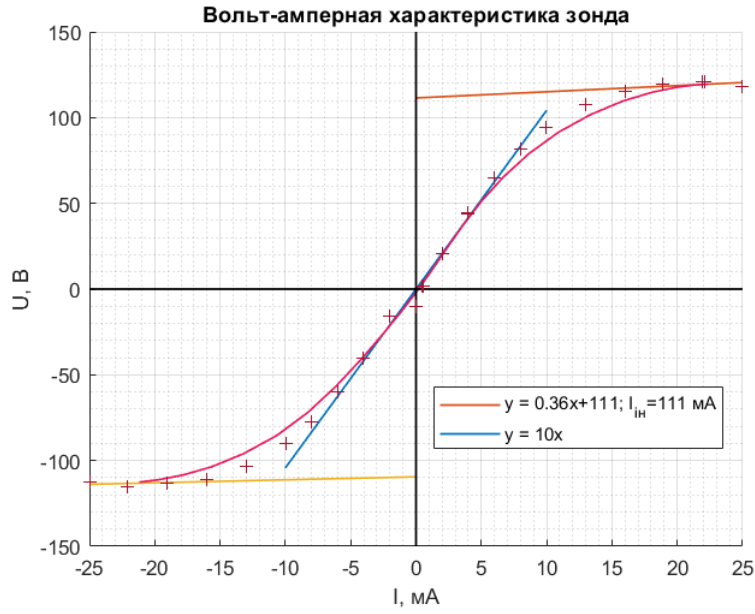


Рис. 5: ВАХ двойного зонда  $I_3(U_3)$  для тока разряда  $I_p = 4.8$  мА

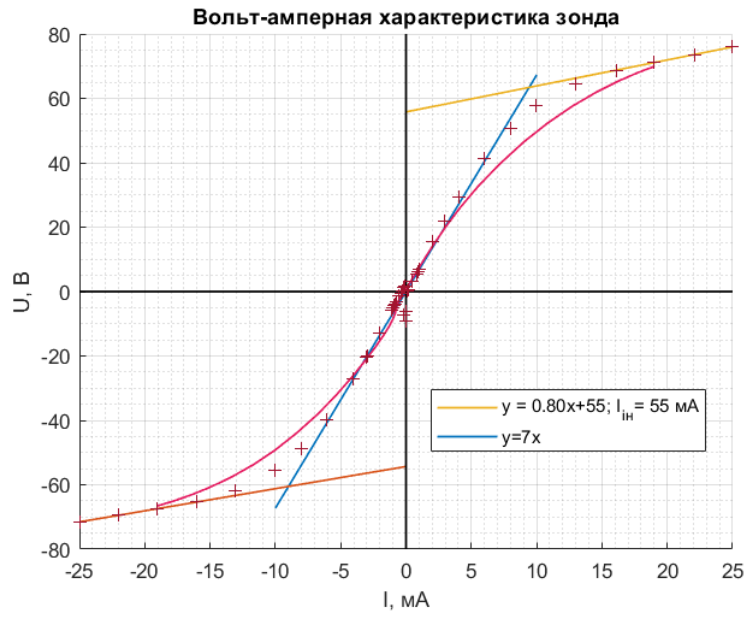


Рис. 6: ВАХ двойного зонда  $I_3(U_3)$  для тока разряда  $I_p = 3$  мА

мулам (3) и (4) соответственно

$$k_B T_{e1} = \frac{1}{2} \frac{e I_{и}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}} = \frac{1}{2} \Delta U = \frac{11.1}{2} = 5.55 \text{ эВ}$$

$$k_B T_{e2} = 3.93 \text{ эВ}$$

$$k_B T_{e3} = 4.5 \text{ эВ}$$

$$n_{i1} = \frac{I}{0.4eS} \sqrt{\frac{m_i}{2k_B T_e}} = 6.9 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

$$n_{i2} = 4.57 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

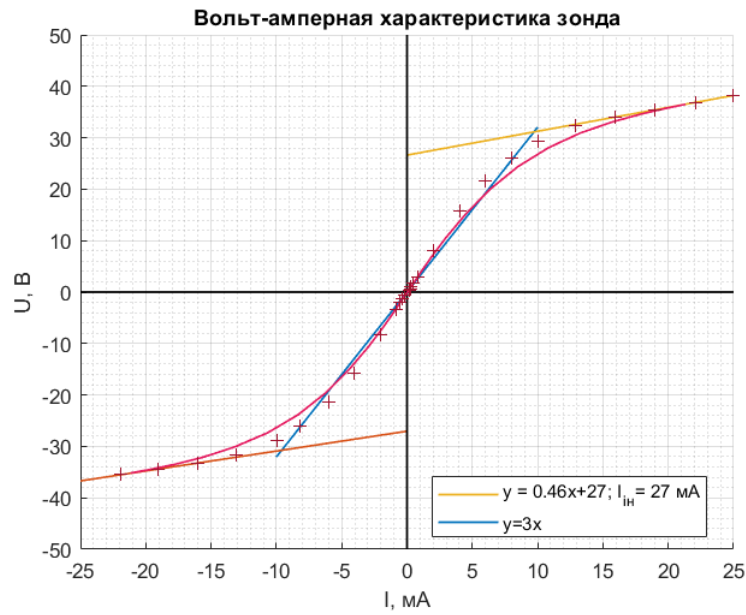


Рис. 7: ВАХ двойного зонда  $I_3(U_3)$  для тока разряда  $I_p = 1.5$  мА

$$n_{i3} = 2.30 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

5. Построим графики зависимостей электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда  $T_e(I_p), n_e(I_p)$

|                |      |      |     |
|----------------|------|------|-----|
| $I_p$ мА       | 4.8  | 3    | 1.5 |
| $k_B T_e$ , эВ | 5.55 | 3.93 | 4.5 |

Видим, что мы не можем установить никакой зависимости температуры от тока

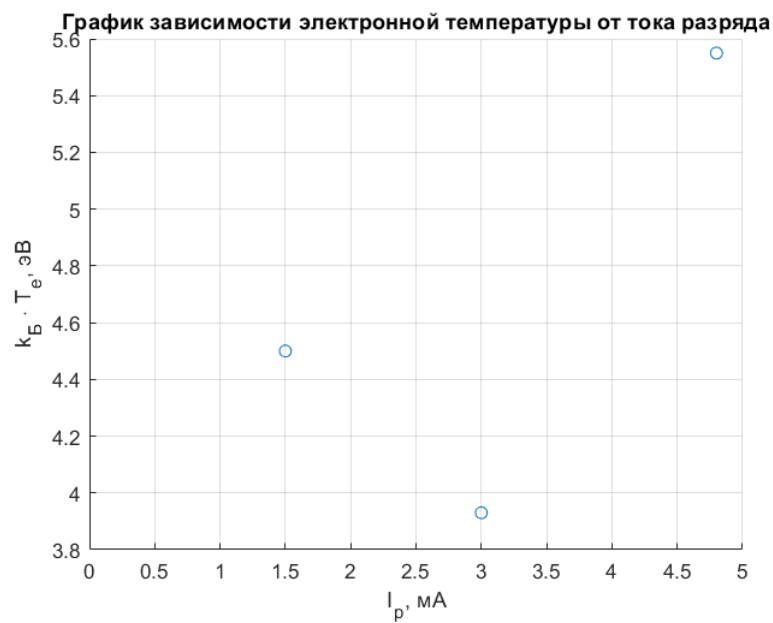


Рис. 8:

разряда

|                     |     |      |      |
|---------------------|-----|------|------|
| $I_p$ мА            | 4.8 | 3    | 1.5  |
| $n_i \cdot 10^{16}$ | 6.8 | 4.57 | 2.30 |

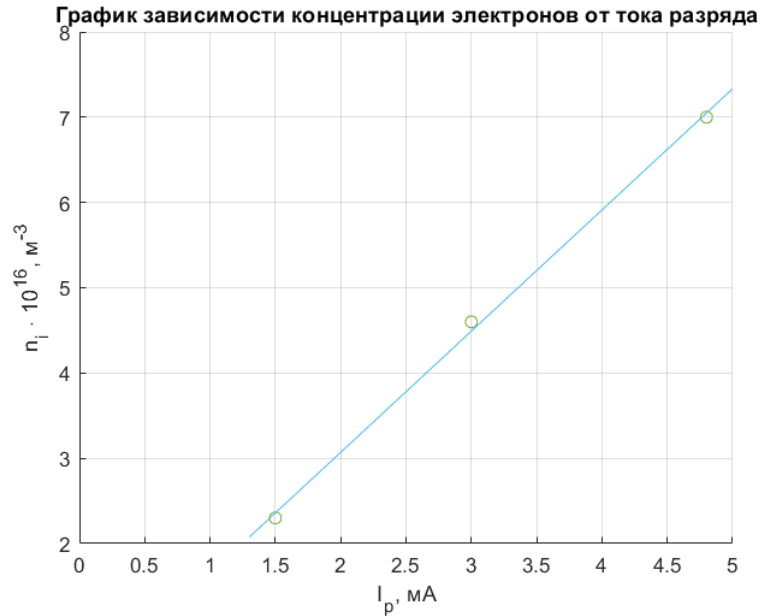


Рис. 9:

В данном случае мы можем обнаружить линейную зависимость

6. Рассчитаем плазменную частоту  $\omega_p$ , электронную поляризационную длину  $r_{De}$  и дебаевский радиус экранирования  $r_D$  по формулам (2) и (1). Результаты занесем в сводную таблицу:

|  |      |      |      |
|--|------|------|------|
| $n_i \cdot 10^{16}$                      | 6.8  | 4.57 | 2.30 |
| $\omega_p, \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ | 1.48 | 1.20 | 0.85 |
| $r_{De}$ см                              | 5.6  | 7    | 9.3  |
| $r_D$ см                                 | 0.43 | 0.53 | 0.74 |

## Выводы:

1. Мы измерили ВАХ тлеющего разряда. Получили значение дифференциальное сопротивление разряда, равное  $R = -310 \pm 10$  Ом.
2. При исследовании графика зависимости установили, что наш диапазон соответствует участку Д-Г
3. Исследовали зондовые характеристики при разных токах разряда. Все данные представлены в сводной таблице:

| $I_p$ , мА | $I_{ин}$ , мА | $\Delta U$ , В | $k_B T_e$ , эВ  | $n_i \cdot 10^{16}$ | $\omega, \text{с}^{-1} \cdot 10^{13}$ | $r_{De}$ , см | $r_D$ , см      |
|------------|---------------|----------------|-----------------|---------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------|
| 4.8        | 111           | 11.1           | $55.0 \pm 3.6$  | $6.8 \pm 0.5$       | $1.5 \pm 0.1$                         | $5.6 \pm 0.6$ | $0.43 \pm 0.03$ |
| 3          | 55            | 7.86           | $3.93 \pm 2$    | $4.57 \pm 0.20$     | $1.20 \pm 0.05$                       | $7 \pm 0.4$   | $0.53 \pm 0.02$ |
| 1.5        | 27            | 9              | $4.5.0 \pm 1.3$ | $2.30 \pm 0.04$     | $0.85 \pm 0.01$                       | $9.3 \pm 0.2$ | $0.74 \pm 0.01$ |

4. Увидели, что для снятых нами данных какая-либо зависимость температуры от тока не обнаруживается
5. Обнаружили линейную зависимость концентрации от тока