

# Работа 3.5.1

## Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Малиновский Владимир

galqiwi@galqiwi.ru

**Цель работы:** Исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра.

**В работе используются:** генератор тока с блоком питания, тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, амперметры, магазин сопротивлений, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор.

## Теория

### Плазма

В ионизированном газе поле ионов «экранируется» электронами. Для поля  $\mathbf{E}$  и плотности  $\rho$  электрического заряда

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

а с учётом сферической симметрии и  $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$ :

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

Плотности заряда электронов и ионов (которые мы считаем бесконечно тяжёлыми и поэтому неподвижными)

$$\begin{aligned} \rho_e &= -ne \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right), \\ \rho_i &= ne. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда из (1) в предположении  $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$  получим

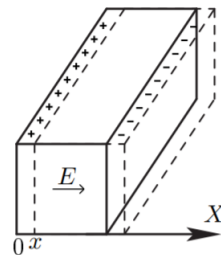
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

где  $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$  — радиус Дебая. Среднее число ионов в сфере такого радиуса

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_D^3. \quad (4)$$

Теперь выделим параллелепипед с плотностью  $n$  электронов, сместим их на  $x$ . Возникнут поверхностные заряды  $\sigma = nex$ , поле от которых будет придавать электронам ускорение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi ne^2}{m} x.$$



Отсюда получаем *плазменную (ленгмюровскую) частоту* колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}. \quad (5)$$

## Одиночный зонд

При внесении в плазму уединённого проводника – *зонда* – с потенциалом, изначально равным потенциалу точки плазмы, в которую его помещают, на него поступают токи электронов и ионов:

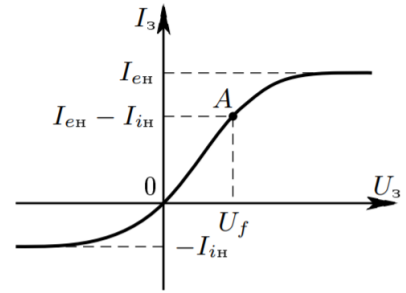
$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\langle v_e \rangle$  и  $\langle v_i \rangle$  – средние скорости электронов и ионов,  $S$  – площадь зонда,  $n$  – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому  $I_{i0} \ll I_{e0}$ . Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения  $-U_f$  – *плавающего потенциала*.

В равновесии ионный ток мало меняется, а электронный имеет вид

$$I_e = I_0 \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right).$$

Будем подавать потенциал  $U_3$  на зонд и снимать значение зондового тока  $I_3$ . Максимальное значение тока  $I_{eн}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{иn}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:



$$I_{иn} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (7)$$

## Двойной зонд

Двойной зонд – система из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создаётся разность потенциалов, меньшая  $U_f$ . Рассчитаем ток между ними вблизи  $I = 0$ . При небольших разностях потенциалов ионные токи на оба зонда близки к току насыщения и компенсируют друг друга, а значит величина результирующего тока полностью связана с разностью электронных токов. Пусть потенциалы на зондах

$$U_1 = -U_f + \Delta U_1,$$

$$U_2 = -U_f + \Delta U_2.$$

Между зондами  $U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1$ . Через первый электрод

$$I_1 = I_{иn} + I_{e1} = I_{иn} - \frac{1}{4}neS\langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{иn} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (8)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{иn} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (9)$$

Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ( $I_1 = -I_2 = I$ ):

$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{иn}}\right)$$

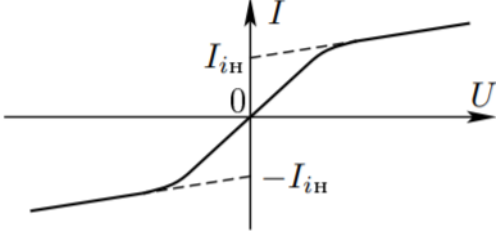
$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln\left(1 + \frac{I}{I_{иn}}\right)$$

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

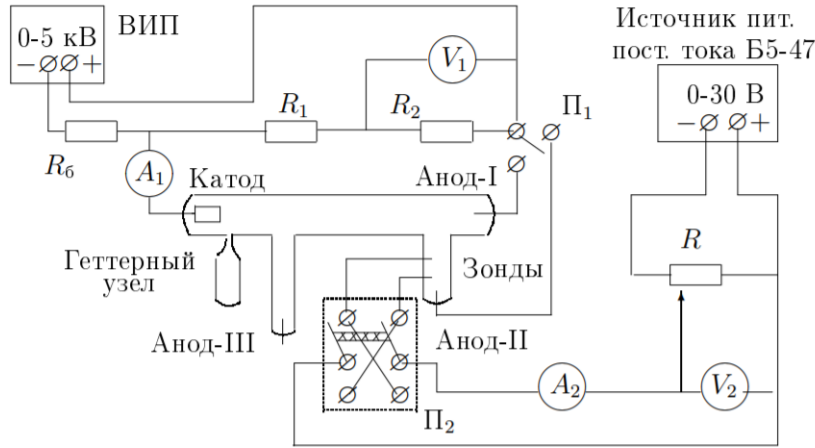
$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$



Из этой формулы можно найти формулу для  $T_e$ : для  $U = 0$  мы найдём  $I_{in}$ , продифференцируем в точке  $U = 0$  и с учётом  $\operatorname{th} \alpha \approx \alpha$  при малых  $\alpha$  и  $A \rightarrow 0$  получим:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{in}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}. \quad (12)$$

## Описание установки



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) полый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (*геттер*). Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  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.

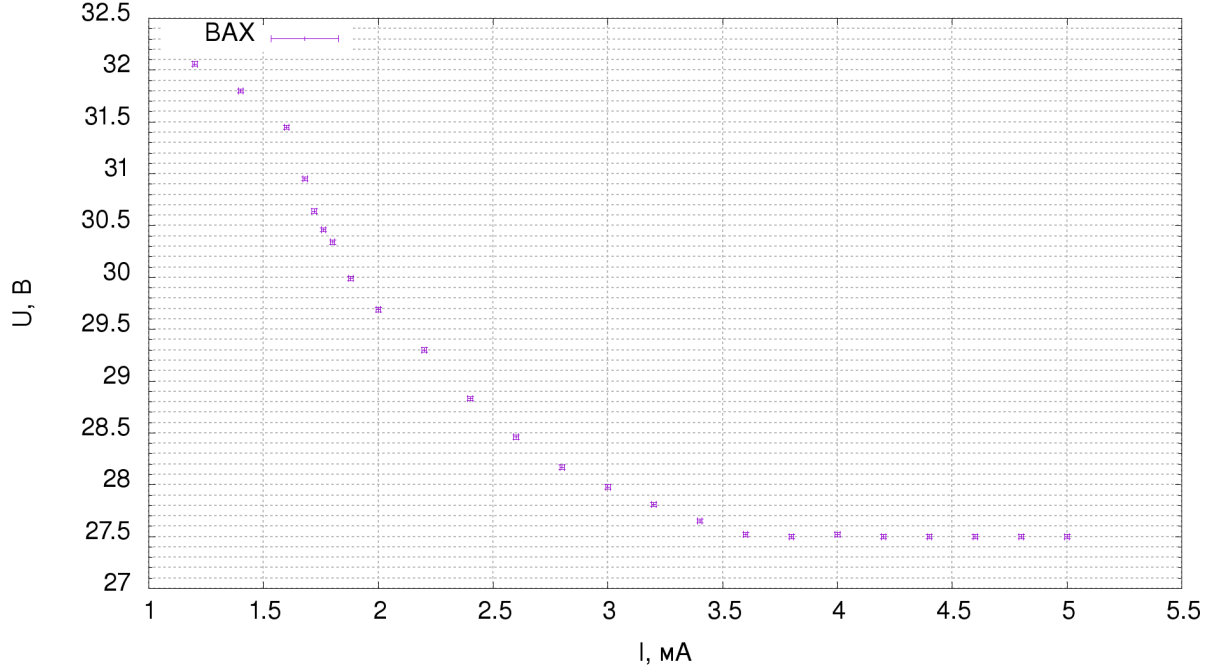
При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром  $A_1$ , а падение напряжения на разрядной трубке – цифровым вольтметром  $V_1$ , подключённым к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффициентом  $(R_1 + R_2)/R_2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

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находятся двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром  $d = 0.2$  мм и имеют длину  $l = 5.2$  мм. Они подключены к источнику питания GPS через потенциометр  $R$ . Переключатель  $\Pi_2$  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 цифровым вольтметром  $V_2$ . Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$ .

## Ход работы

Измеряем напряжение зажигания в лампе:  $U_{\text{зж}} = 20.4 \pm 0.2$  В.

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  снимаем ВАХ разряда  $U_1 = f(I_p)$  для тока в диапазоне  $0.5 \div 5$  мА (см. Таблица 1). Построим график:



Вольт-амперная характеристика разряда.

<написать рпо максимальное сопротивление>

С помощью вольтметра  $V_2$  и амперметра  $A_2$  снимем ВАХ двойного зонда  $I_2 = f(U_2)$  при фиксированного тока разряда  $I_p$  в трубке в диапазоне  $-25 \div 25$  В, процессе измерений меняя полярность зонда при нулевом токе. Измерения проведём для  $I_p = 5$  мА,  $I_p = 3$  мА и  $I_p = 1.5$  мА.

Используя МНК, найдем коэффициенты в формуле тока через двойной зонд от напряжения:

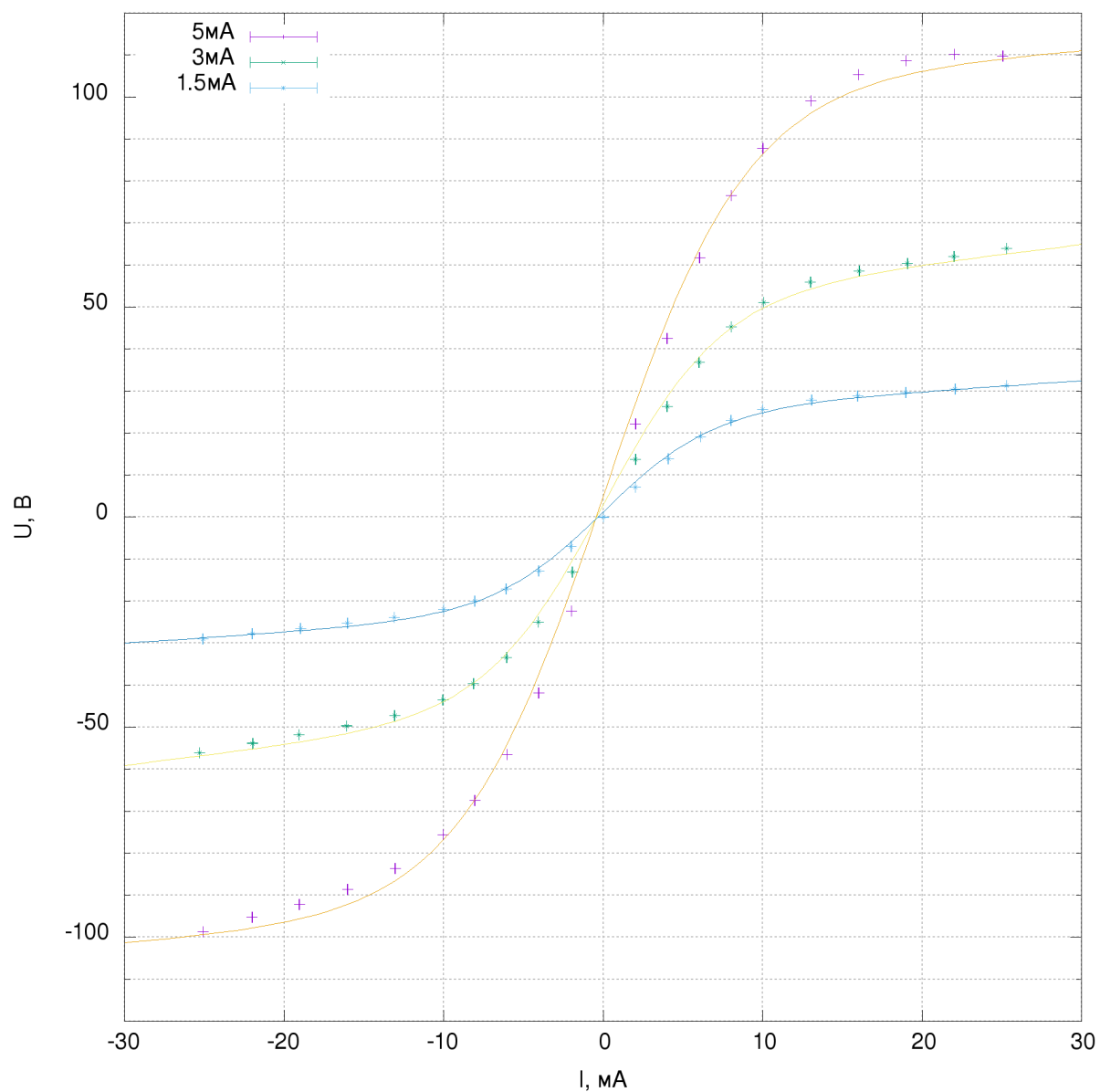
$$I = I_{in} \operatorname{th}(BU) + AU.$$

Из него вычислим  $I_{in}$  и  $kT_e$ , используя формулу

$$B = \frac{e}{2kT_e}.$$

Также найдем концентрацию ионов  $n_e$  из формулы  $I_{in} = 0.4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$ , дебаевский радиус  $r_D$ , число электронов в дебаевской сфере  $N_D$  и степень ионизации плазмы  $\alpha$ .

$I_{in}$ , мкА	$T_e$ , эВ	$n_e$ , $10^{16}$ м $^{-3}$	$\omega_p$ , $10^{25}$ рад/с	$N_D$ , $10^5$	$\alpha$ , $10^{-7}$
$105.4 \pm 0.2$	$4.97 \pm 0.06$	$7.64 \pm 0.09$	$4.32 \pm 0.05$	$26 \pm 1$	$3.16 \pm 0.04$
$47.9 \pm 0.1$	$3.73 \pm 0.06$	$3.73 \pm 0.06$	$5.97 \pm 0.09$	$36 \pm 1$	$1.66 \pm 0.03$
$24.41 \pm 0.02$	$3.68 \pm 0.06$	$2.06 \pm 0.03$	$8.34 \pm 0.13$	$50 \pm 1$	$0.85 \pm 0.01$



Вольт-амперная характеристика разряда.

## Вывод

В данном эксперименте проводилось изучение ВАХ плазменного разряда и двойного зонда, находящегося в ней. Все зависимости имеют вид, предсказанный теорией, а полученные результаты совпадают с табличными.