

3.5.2 (4.16А). ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

23 июля 2018 г.

В работе используются: газоразрядная трубка с высокочастотным (ВЧ)-генератором, источник постоянного тока, генератор звуковой частоты (ЗГ), осциллограф (ЭО), форвакуумный насос, вакуумметр, натекатель, вакуумный кран, делитель (Д), повторители-фазовращатели — нерегулируемый (ПФ1) и регулируемый (ПФ2).

Экспериментальная установка. Схема установки представлена на рис. 1. Заполненная газом диэлектрическая камера представляет собой цилиндрическую стеклянную трубку диаметром 15 мм и длиной 100 мм, на одном из торцов которой впаяны две молибденовые проволочки (зонды) диаметром $d = 0,5$ мм и длиной $l = 10$ мм, расположенные на расстоянии 5 мм друг от друга. Другой конец трубки не запаян. Он служит для откачки и для заполнения камеры газом. Трубка вставлена в катушку индуктивности колебательного контура ВЧ-генератора, работающего на частоте 10 МГц. Камера откачивается форвакуумным насосом и с помощью натекателя заполняется воздухом до давления $2 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Давление контролируется вакуумметром (термопарным манометром).

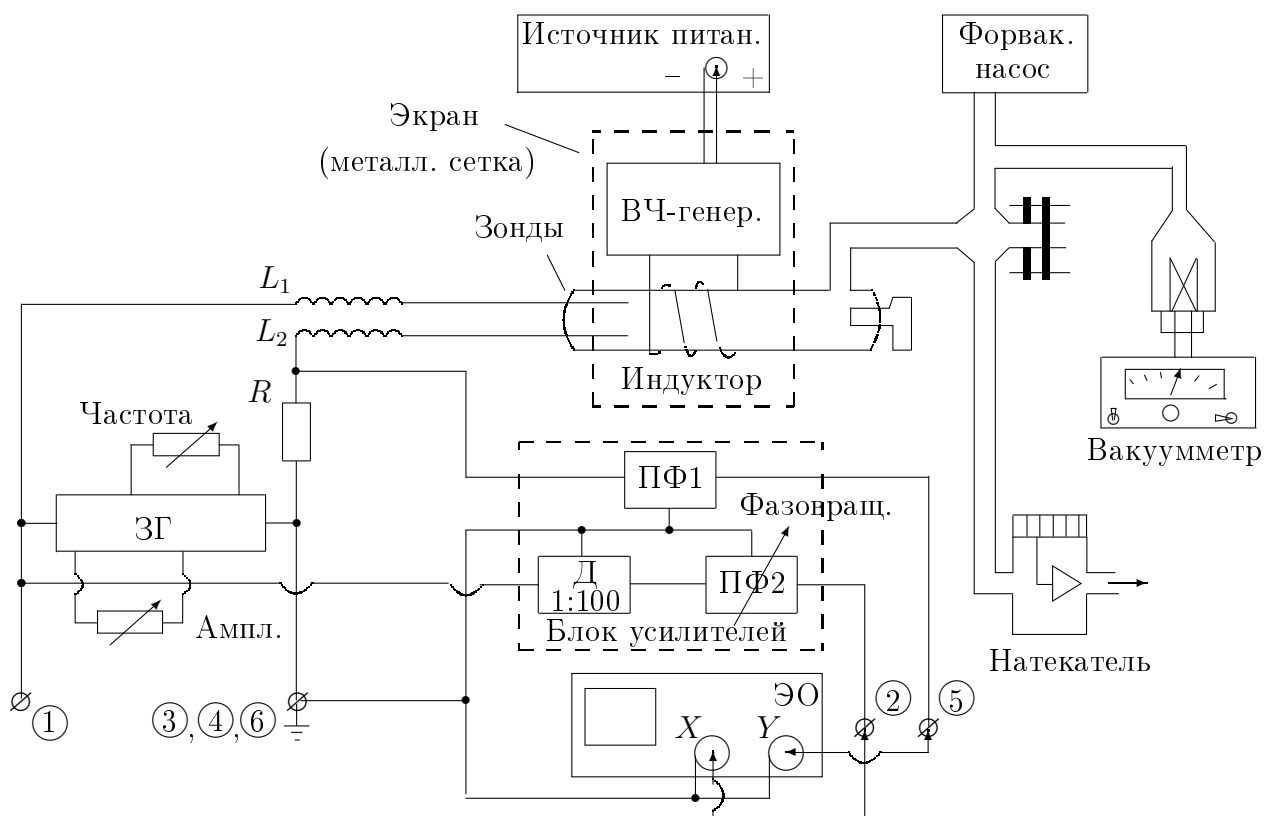


Рис. 1. Схема установки для исследования газового разряда

Следует отметить некоторые особенности процедуры установки рабочего давления в разрядной камере. Установка требуемого давления осуществляется путём изменения проходного сечения натекателя, соединённого с атмосферой, при непрерывной работе откачивающего насоса. При этом скорость откачки сохраняется постоянной, а приток воздуха в разрядную камеру определяется изменением аэродинамического сопротивления натекателя. Таким

образом устанавливается новое значение давления, при котором скорость откачки насоса уравнивается расходом воздуха через натекаТЕЛЬ.

Изменение сечения натекаТеля выполняется микрометрическим винтом, который сжимает расположенную под ним пружину и изменяет её давление на подвижную мембрану клапана. Такая система обладает очень большой инерционностью и реагирует на вращение винта со значительным запозданием.

На электроды зонда поступает синусоидальное напряжение от звукового генератора ЗГ. Это же напряжение через делитель D (1:100) и регулируемый повторитель-фазовращатель ПФ2 подаётся на вход X ЭО. Последовательно с зондом подключён датчик тока – резистор R с сопротивлением 100 кОм. Напряжение с резистора, пропорциональное току, текущему через плазму, подаётся на вход Y ЭО через нерегулируемый повторитель-фазовращатель ПФ1. Два дросселя L_1 и L_2 , подключённые к зондам, не пропускают на осциллограф высокочастотный сигнал.

На экране осциллографа наблюдается кривая, представляющая собой вольт-амперную характеристику двойного зонда (см. рис. 5.12 введения). Следует отметить, что на некоторых частотах в измерительной цепи могут возникать фазовые сдвиги, и характеристика зондов приобретает вид петли. Такие частоты для измерений непригодны. Для устранения фазовых сдвигов используется регулятор фазовращателя ПФ2.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается при различных давлениях газа в трубке получить зондовые вольт-амперные характеристики на экране осциллографа и с их помощью рассчитать температуру и концентрацию электронов в плазме, степень ионизации, плазменную частоту и дебаевский радиус экранирования.

I. Подготовка приборов к работе

1. Не включая приборов, ознакомьтесь с установкой. На рисунке 2 изображён общий вид установки: разрядная камера (1) с вмонтированным в неё двойным зондом; генератор возбуждения разряда (2); натекаТЕЛЬ регулировки давления (3); термопарная вакуумметрическая лампа (4); аппаратная стойка с блоком генератора питания зонда ЗГ (5, верхний блок) и блоком усилителей, содержащим модули D , ПФ1, ПФ2 (6, нижний блок); пульт управления (7) с клеммами подключения осциллографа и регуляторами амплитуды и фазы. Разрядная камера с генератором возбуждения смонтирована на платформе (8), накрытой сетчатым экраном (9). Элементы вакуумной системы – камера, натекаТЕЛЬ и вакуумметрическая лампа – соединены через крестовину (10) с форвакуумным насосом. Вакуумметр связан кабелем с лампой-датчиком, а генератор возбуждения соединён со своим источником питания.

На пульт управления (7), кроме клемм подключения осциллографа введены органы управления амплитудой напряжения питания зонда («Амплитуда» – 11) и величиной поворота фазы управляемым повторителем-фазовращателем ПФ2 («Фазовращатель» – 12). Орган управления частотой питания зонда («Частота» – 13) находится на самом корпусе генератора. Рабочая частота питания (≈ 50 Гц) подобрана оптимальным образом при на-

стройке установки лаборантами и при выполнении лабораторной работы менять её величину не следует.

Убедитесь, что канал X ЭО подключён к клеммам 2,3 пульта управления; канал Y ЭО — к клеммам 4,5.

2. Перед откачкой ознакомьтесь с техническим описанием вакуумметра, расположенным на установке, и подготовьте вакуумметр для работы в диапазоне $1 \div 2 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.
3. Включите форвакуумный насос и вакуумметр, откачайте трубку до давления $\sim 2 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.

Не выключайте насос до конца работы

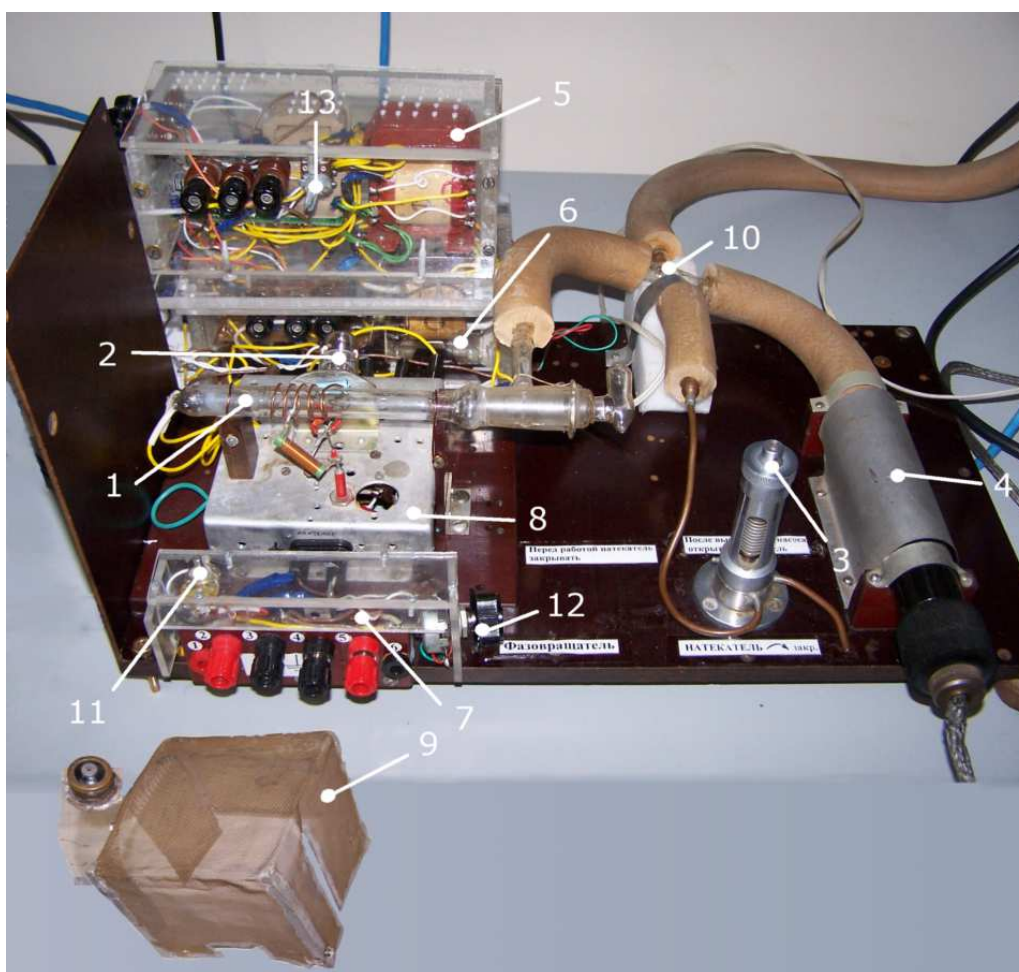


Рис. 2. Общий вид установки

Отсчёт давления ведётся ТОЛЬКО по шкале 2 (100 дел. – 10 мВ) с последующим переводом в мм рт. ст. по градуировочным кривым.

Ввиду инерционности системы следует вращать винт накателя очень медленно и малыми порциями, каждый раз ожидая некоторое время (5 – 10 секунд) реакции системы — начала движения стрелки вакуумметра:

- если давление не меняется (стрелка не двигается), поверните винт ещё раз на малый угол в том же направлении, после чего вновь ожидайте реакции;
- если показания вакуумметра начали меняться, немедленно прекратите вращение винта и ожидайте остановки стрелки.

Если полученное давление отличается от желаемого, итерационно (методом последовательных приближений) повторяйте описанную последовательность действий, изменяя направление и величину поворота винта в соответствии с требуемыми направлением и величиной изменения давления.

Работа с системой регулировки давления требует некоторого двигательного навыка, поэтому в начале лабораторной работы студенту рекомендуется выполнить несколько тренировочных операций, устанавливая в камере какие-либо заранее выбранные значения давлений, и добиться уверенной и точной работы с органами управления установки.

4. Включите источник питания ВЧ-генератора и проследите за разрядом в трубке: после зажигания разряд должен устойчиво гореть по всей трубке, включая область расположения зондов.
5. Включите осциллограф и звуковой генератор, при этом на зонды подаётся переменное напряжение от ЗГ с частотой около 50 Гц. Используя регулятор «Амплитуда», подберите напряжение, при котором на экране осциллографа появится кривая, похожая на теоретическую зависимость, изображённую на рис. 5.12 введения.

Если на кривой не наблюдается области насыщения, следует увеличить амплитуду выходного напряжения ЗГ. Если вместо кривой на экране возникает петля, её следует устранить регулировкой фазовращателя.

6. Посмотрите, как ведёт себя разряд, насколько он устойчив при изменении давления в диапазоне $2 \cdot 10^{-1}$ – $2 \cdot 10^{-2}$. Отметьте, в каком диапазоне давлений наблюдаемая на экране кривая соответствует теоретической.

II. Измерения

7. Получите на экране осциллографа вольт-амперную характеристику зондов (см. рис. 5.12 введения) для максимального давления из выбранного диапазона.
8. Убедитесь, что ручки плавной регулировки усиления по осям X и Y выведены вправо до щелчка (при таком положении ручки чувствительность каналов соответствует величине, указанной возле дискретного переключателя усиления). Регулируя напряжение звукового генератора и подбирая чувствительность осциллографа, добейтесь того, чтобы кривая занимала почти весь экран. При чрезмерно большом напряжении генератора возникает искажение зондовой характеристики, в её конечных областях появляются изломы и выпучины. Это происходит вследствие влияния электрического поля зондов на характер плазменного разряда. Такого допускать не следует, уменьшая при необходимости напряжение питания зонда до исчезновения искажений.
9. Зарисуйте кривую с экрана на кальку. Укажите на кальке давление (в мВ и мм рт. ст.) и чувствительность осциллографа по осям X и Y .
10. Повторите измерения п. 6 для 3–4-х давлений внутри диапазона, выбранного Вами в п. 6.
11. Закончив работу, сначала выключите насос и немедленно откройте натека- тель; затем отключите вакуумметр и остальные приборы.

III. Обработка результатов

1. Для каждой кривой пересчитайте масштаб по оси Y из В/см в А/см, зная сопротивление, с которого сигнал, пропорциональный зондovому току, подавался на ось Y осциллографа.
2. Рассчитайте масштаб по оси X в В/см с учётом наличия делителя в канале измерения зондovого напряжения (1:100).
3. Постройте зондovые характеристики в координатах $I = f(U)$ и определите по ним температуру электронов, используя формулу (5.43) Введения к теме:

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

ток $I_{\text{ин}}$ (точка 1) найдите из пересечения асимптоты к току насыщения с осью $U = 0$ (см. рис. 5.12 Введения);

$(dI/dU)|_{u=0}$ — наклон характеристики $I = f(U)$ в точке $U = 0, I = 0$ (проведите касательную);

от точки 1 ($I_{\text{ин}}$) проведите горизонталь до пересечения с касательной (точка 2);

определите ΔU в вольтах между точками 1 и 2 и энергию («температуру») электронов kT_e в электрон-вольтах (здесь $e = 1$): $kT_e = (e\Delta U/2)$ эВ.

Рассчитайте температуру T , соответствующую энергии 1 эВ (полезно помнить). Какова температура электронов?

4. Полагая концентрацию электронов n_e равной концентрации ионов n_i , определите её, используя формулу Бома (5.31):

$$I_{\text{ин}} = 0,4n_e eS \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad [\text{СИ}]$$

Здесь $S = \pi \cdot d \cdot l$ — площадь поверхности зонда; значения d и l приведены в описании экспериментальной установки; $m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг — масса иона неона.

5. Постройте графики $T_e = f(I_p)$, $n_e = f(I_p)$.
6. Рассчитайте плазменную частоту колебаний электронов по формуле (5.16):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e \text{ см}^{-3}} \text{ рад/сек.}$$

Какие частоты пройдут через такую плазму при падении на неё э-м излучения?

7. Рассчитайте дебаевский радиус r_D , используя формулу (5.18), где $T_e \gg T_i$, а температура ионов равна комнатной ($T_i \simeq 300$ К):

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_i e^2}} \text{ см.} \quad [\text{СГС}]$$

8. Убедитесь, что среднее число ионов в дебаевской сфере — число Дебая — $N_D \gg 1$ (в этих условиях плазму можно рассматривать как идеальный газ):

$$N_D = n_i \frac{4}{3} \pi r_D^3.$$

9. Оцените степень ионизации плазмы (долю ионизованных атомов α), если давление в трубке $P \simeq 1$ мбар, а температура равна комнатной:

$$\alpha = \frac{n_i}{n},$$

где n — общее число частиц в единице объёма ($P = nkT$).

При нормальных условиях $n = N_{\text{Л}}$ — число Лошмидта.

10. Сведите результаты расчётов в таблицу и оцените погрешности.

R_{max} Ом	I_p мА	kT_e эВ	n_e см ⁻³	ω_p рад/сек	r_D см	$\langle N_D \rangle$	α

Исправлено 23-VII-2018 г.