



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА**

А.М. Никонов

Учебно-методическое пособие

Москва  
2022

## Содержание

	Стр.	
§1	Введение	3
§2.	Физические процессы в тлеющем разряде	4
§3.	Физические свойства тлеющего разряда	7
§4.	Определение параметров тлеющего разряда	11
§5.	Экспериментальная установка и методика измерений	13
§6.	Задание	15
§7.	Литература	17

# ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Изучаются характеристики тлеющего разряда низкого давления, переходной формы нормального тлеющего разряда в аномальный режим горения

## § 1. ВВЕДЕНИЕ

Газовый разряд – это совокупность сложных физических явлений, представляющих собой электрический пробой газа, формирование в нем проводящего канала и прохождением через него электрического тока. Термин «газовый разряд» произошел от процесса разрядки конденсатора через цепь, включающую в себя газовый промежуток. При условии, что напряжение между обкладками конденсатора достаточно велико, происходит пробой газа и появляются электроны и ионы.

В значительной степени интерес к изучению разрядов обусловлен созданием в них плазмы – квазинейтрального ионизованного газа или так называемого четвертого состояния вещества. Возможности практического применения плазмы чрезвычайно многообразны: создание жизненно важных для человечества источников энергии с помощью управляемого термоядерного синтеза, разработка методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, использование плазмы в качестве активной среды лазеров, в плазмохимии, плазменных технологиях и др. Газовые разряды в настоящее время являются основным средством создания плазмы с заданными физическими свойствами. Наиболее удобно изучать основные закономерности образования газоразрядной плазмы на примере тлеющего разряда, чаще других находящего практические применения. В настоящей работе изучаются процессы в катодных частях тлеющего разряда, ответственных за формирование электрического тока в первоначально нейтральном газе под действием постоянного электрического поля, а также характеристики газоразрядной плазмы.

## § 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

Для получения разряда постоянного тока чаще всего используют кварцевую или стеклянную газоразрядную трубку (см рис.1), заполненную газом при нужном давлении. В трубке размещают два металлических электрода: катод и анод. Между электродами подают напряжение  $U$ . При достижении  $U$  пороговых значений происходит пробой газа, возникает разряд и между электродами начинает течь ток  $i$ .

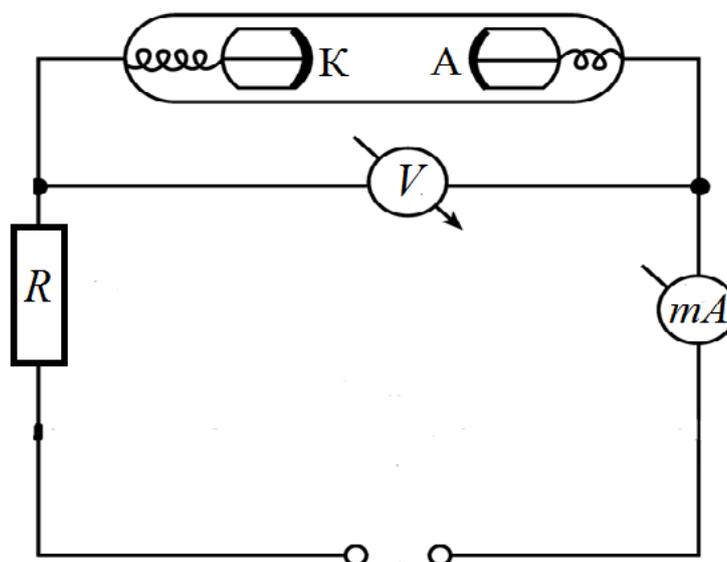


Рис. 1 Газоразрядная трубка и схема измерений. К – катод, А – анод, R – сопротивление 30 кОм, V - электростатические вольтметр, P - разрядная трубка, B – источник питания, mA - миллиамперметр.

Тлеющий разряд существует в определенном интервале значений разрядного тока. Для установления места, занимаемого тлеющим разрядом среди других видов разряда, рассмотрим вольт-амперную характеристику (ВАХ) разряда постоянного тока в широком диапазоне изменения разрядного тока  $i$ . На рисунке 2 представлена ВАХ разряда в неоне с холодными плоскими электродами из меди при давлении газа  $p = 1$  Тор [1].

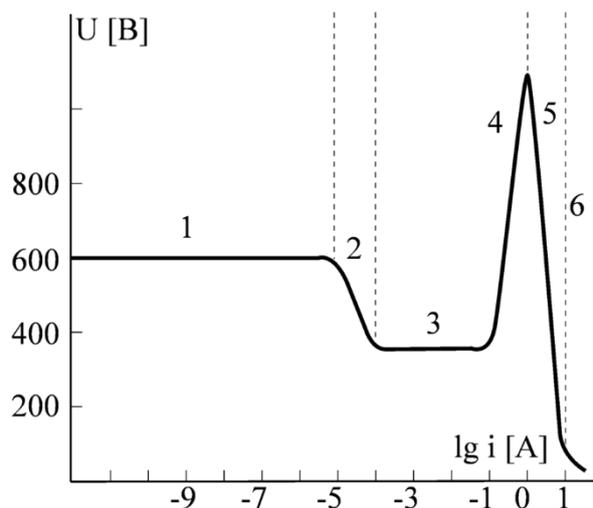


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика различных видов разряда в неоне с медными электродами ( $p = 1$  мм. рт. ст., длина разрядной трубки  $d = 50$  см) [1]

При малых разрядных токах ( $i < 10^{-5}$  А) реализуется таунсендовский разряд (участок 1 на рисунке 2). Для разряда характерны малая плотность тока и отсутствие заметного свечения. Вследствие малости концентрации заряженных частиц электрическое поле, создаваемое внешним источником напряжения, не искажается, и потенциал линейно изменяется вдоль газоразрядной трубки.

Таунсендовский разряд является самостоятельным. Это означает, что разряд горит самостоятельно без внешнего ионизатора. Стационарное состояние разряда достигается, если каждый вышедший из катода электрон, двигаясь к аноду, производит столько актов ионизации и возбуждения атомов, что под действием образованных им ионов и фотонов из катода эмитируется один электрон. Критерий Таунсенда или условие стационарности разряда имеет вид [1 – 3]:

$$\gamma \left( e^{\int_0^d \alpha dx} - 1 \right) = 1, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - первый коэффициент Таунсенда (коэффициент объёмной ионизации), характеризующий число актов ионизации, производимых электроном на пути в 1 см в направлении действия поля;  $\gamma$  - третий коэффициент Таунсенда (коэффициент поверхностной ионизации), равный

отношению числа эмитированных электронов к числу приходящих на катод ионов;  $d$  – расстояние между катодом и анодом. Коэффициент  $\alpha$  зависит от рода газа и отношения напряжённости поля к давлению газа  $\frac{E}{p}$ , а коэффициент  $\gamma$  – от материала электрода, рода газа и энергии, с которой ион приходит на катод [1,2].

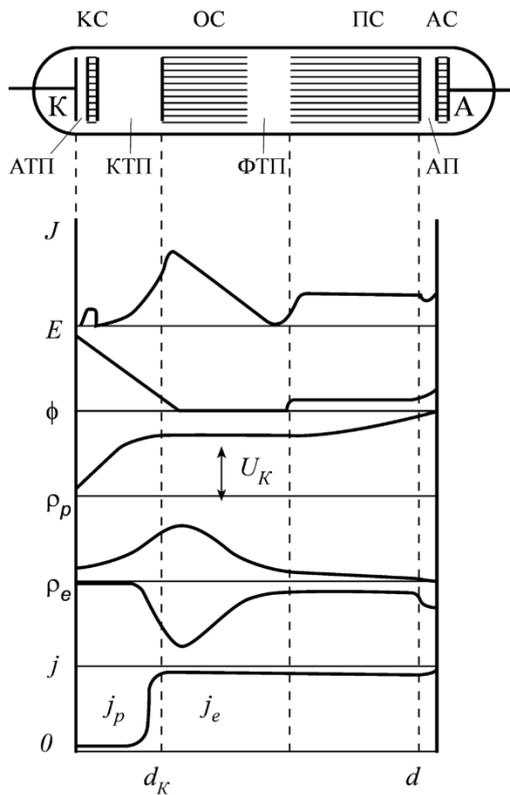
Падающий участок ВАХ в интервале токов ( $10^{-5} - 10^{-4}$ ) А (участок 2 на рисунке 2) соответствует переходу от тёмного таунсендовского разряда к тлеющему. В эксперименте разряд скачком переходит от тёмного к тлеющему, так как в пределах падающего участка ВАХ отсутствует устойчивое состояние разряда. При токах, бóльших  $10^{-4}$  А, реализуется тлеющий разряд. Согласно определению Г.С. Солнцева [5], тлеющий разряд – это самостоятельный электрический разряд с холодными электродами при токах  $10^{-5} - 1$  А. В тлеющем разряде концентрация заряженных частиц существенно выше, чем в таунсендовском, в связи с этим распределение потенциала в пространстве между катодом и анодом отличается от линейного (см § 3).

Различают два режима тлеющего разряда: нормальный и аномальный. При реализации нормального режима горения (участок 3 на рисунке 2) увеличение тока происходит при практически постоянном напряжении. Рост тока происходит в результате увеличения площади катода, с которой происходит эмиссия электронов. После того, как вся поверхность катода покрывается разрядом, увеличение силы разрядного тока возможно только при существенном увеличении напряжения горения разряда. Возрастающая ветвь ВАХ разряда (участок 4 на рисунке 2) характерна для аномального тлеющего разряда. Внешне аномальный тлеющий разряд ничем не отличается от нормального. Дальнейшее увеличение тока сопровождается разогревом катода, увеличением роли термоэлектронной эмиссии и уменьшением напряжения на разряде до потенциалов, близких к потенциалу ионизации. Разряд с низким напряжением горения называется дуговым (участок 6 на рисунке 2), а переходная область между тлеющим

разрядом и дугой – переходом к дуге (участок 5 на рисунке 2).

### § 3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Тлеющий разряд в пространстве между электродами имеет характерную структуру чередующихся областей различного цвета и интенсивности свечения. На рисунке 3 показаны структура тлеющего разряда, продольные распределения интенсивности свечения, осевой напряженности электрического поля  $E$ , плотностей зарядов и токов электронов и ионов. Пространство между катодом и анодом обычно делят на ряд характерных областей: катодный слой, отрицательное свечение, тёмное фарадеево пространство, положительный столб и анодный слой.



Светящиеся области:

КС – катодное свечение

ОС – отрицательное свечение

ПС – положительный столб

АС – анодное свечение

Тёмные области:

АТП – Астаново тёмное пространство

КТ – катодное тёмное пространство

ФТП – Фарадеево тёмное пространство

АП – область анодного падения

Рис. 3. Структура тлеющего разряда и распределения интенсивности свечения  $I$ , напряжённости поля  $E$ , потенциала  $\phi$ , плотностей зарядов и токов положительных ионов и электронов  $\rho_p, \rho_e, j_p, j_e$  [1]

В тлеющем разряде в отличие от таунсендовского вблизи катода (в катодном слое) существует сильное электрическое поле и значительный положительный объёмный заряд. Основные процессы, обеспечивающие существование самостоятельного тлеющего разряда, аналогичны лавинным процессам в таунсендовском разряде, однако, они происходят в катодной части, где сосредоточено практически все разрядное падение потенциала, называемое катодным падением  $V_k$ . В связи с этим, условие стационарности тлеющего разряда можно описать соотношением (1), где в качестве  $d$  надо брать длину  $d_k$  катодной области, начинающейся у катода и заканчивающейся в начале области отрицательного свечения [1,4].

Как видно из рисунка 3, катодная область включает в себя три области: астаново тёмное пространство, катодное свечение и катодное тёмное пространство. В астановом пространстве практически отсутствует свечение, так как эмитированные с катода электроны в этой области не успевают набрать энергию, достаточную для возбуждения атомов газа. В области катодного свечения электроны приобретают энергию порядка  $W_{kmax}$ , соответствующую максимальному значению сечения возбуждения для низших энергетических уровней атомов рабочего газа. Продвигаясь в сторону анода, электроны продолжают набирать энергию в области катодного падения. При достижении электронами энергии  $W$ , превышающей энергию  $W_{kmax}$ , при которой сечения возбуждения спектральных линий максимальны, вероятность возбуждения атомов падает, вследствие чего образуется тёмное катодное пространство.

Как только электроны в прикатодной части набирают энергию, превышающую потенциал ионизации атомов  $W_i$ ,  $W \geq W_i$ , начинается интенсивная ионизация атомов и появляются вторичные электроны. Вторичные электроны также как и первичные ускоряются полями. Таким образом, на границе катодной части и отрицательного свечения формируется пучок ускоренных электронов.

В области отрицательного свечения напряжённость электрического поля падает и ускорение электронов прекращается. Здесь происходит интенсивная ионизация атомов быстрыми электронами, сформированными в прикатодных частях. Одновременно происходит релаксация энергии быстрых электронов при столкновениях с тяжёлыми частицами.

Ионизованный газ в области отрицательного свечения квазинейтрален, т.е. является плазмой. Особенностью плазмы отрицательного свечения является тот факт, что электронный пучок, сформированный в прикатодной части разряда, является как бы внешним, основным источником ионизации. В этом случае можно говорить о том, что механизм формирования электронного энергетического спектра  $f_e(W)$  носит нелокальный характер. Нелокальность означает, что электрон набирает энергию в одном месте разряда (катодной области), а расходует ее в других точках разряда (в области отрицательного свечения).

Для плазмы отрицательного свечения характерны более высокие плотности заряженных частиц  $n_e$  по сравнению с другими частями разряда. Функция распределения электронов по энергии  $f_e(W)$  имеет сложный, неравновесный характер, обнаруживая три группы электронов: группу быстрых электронов пучка, группу электронов средних энергий и основную массу медленных электронов с энергией 0.1 – 0.3 эВ, имеющих квазимаксвелловское распределение. Электроны средних и малых энергий - это вторичные электроны, образованные при ионизации атомов электронами пучка, а также электроны пучка, частично потерявшие свою энергию вследствие столкновений.

Излучение в области отрицательного свечения обусловлено преимущественно возбуждением атомов быстрыми электронами. При приближении к аноду число быстрых электронов уменьшается. Уменьшение числа быстрых электронов сопровождается уменьшением интенсивности свечения плазмы при продвижении в сторону анода. Длина отрицательного свечения близка к длине релаксации энергии быстрых электронов.

Возникающее за отрицательным свечением фарадеево тёмное пространство является переходной областью от катодных частей к положительному столбу.

Положительный столб существует практически автономно, не будучи связан с физическими процессами в катодной области разряда. Механизм поддержания баланса заряженных частиц в плазме положительного столба принципиально отличается от такового в плазме отрицательного свечения.

Функция распределения электронов по энергии в плазме положительного столба, является изотропной и квазиравновесной. Для плазмы водорода и гелия, для которых частота упругих столкновений электронов с нейтральными частицами слабо зависит от скорости электронов  $v_{en}(v) \approx const$ , а сечение столкновений  $\sigma_{en}(v) \sim \frac{1}{v}$ , ФРЭЭ близка к максвелловской. В случае разряда в газах (например,  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ ), в которых длина свободного пробега электронов постоянна  $\lambda_e = \frac{v}{v_{en}} = const$  и сечение столкновений  $\sigma_{en}(v) \approx const$ . ФРЭЭ близка к функции распределения Дрювестейна. Таким образом, распределение электронов в плазме положительного столба представляет собой всего одну энергетическую группу электронов.

Ионизация и возбуждение газа, в отличие от области отрицательного свечения, производится не пучковыми, а тепловыми, наиболее быстрыми электронами функции распределения электронов по энергиям  $f_e(W)$ . Средняя энергия электронов достаточно велика и составляет  $\varepsilon_e \sim 3 \dots 5$  эВ. Необходимую энергию электроны приобретают, ускоряясь продольным градиентом потенциала в плазме положительного столба, самосогласованно устанавливающимся в разряде. При этом характерная напряжённость продольного электрического поля  $E \sim 1 \dots 5$  В/см.

Оценки длины релаксации электронного энергетического спектра плазмы положительного столба по формуле [4]

$$\Lambda_e = v_{др} \tau_\varepsilon, \quad (2)$$

где  $v_{др} = \frac{eE}{mv_{en}}$  - скорость дрейфа электронов,  $\tau_\varepsilon = \frac{1}{\delta v_{en}}$  - время релаксации

энергии,  $v_{en}$  - частота столкновений электрона с атомами,  $\delta$  - доля энергии электрона, передаваемая атому при столкновении, показывают, что длина  $L_\varepsilon$  значительно меньше длины области положительного столба для рассматриваемых условий ( $p \sim 1$  Тор). Отсюда, функция распределения  $f_e(W)$  этой плазмы является локальной, т.е. определяется значением параметра  $E/p$  в окрестности любой точки пространства.

## § 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

### 4.1. Нахождение напряжённости продольного электрического поля

Положительный столб представляет собой плазму с высокой проводимостью, которая играет просто роль проводника, приближающего анод к той области разрядного промежутка, в которой заканчивается формирование электронной лавины. Поэтому при изменении длины разрядного промежутка происходит прежде всего простое сокращение или увеличение длины положительного столба, в то время как при фиксированном значении силы разрядного тока  $i$  характеристики области катодного падения катодное падение  $V_k$  и длина катодной части  $dk$  не изменяются. Получив две вольт-амперные характеристики разряда с разными межэлектродными расстояниями  $d$  (рис. 4), которые будут смещены относительно друг друга по оси напряжений  $V$ , для фиксированного значения тока  $i$  можно получить продольную напряжённость поля  $E$ :

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta l}$$

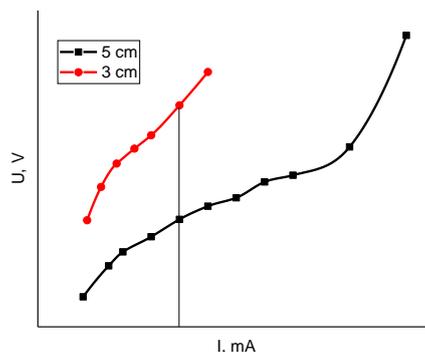


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики для разных межэлектродных расстояний при давлении 0.08 Торр.

В случае, если измерена вольт-амперная характеристика разряда только при одной длине разряда величину напряжённости продольного электрического поля в положительном столбе можно получить, используя участок кривой  $V(l)$ , где происходит сокращение длины области плазмы положительного столба:  $E = \frac{\Delta V}{\Delta l}$

#### 4.2. Нахождение величины катодного падения потенциала

Величина нормального катодного падения потенциала определяется экспериментально методом так называемого затрудненного разряда, суть которого заключается в следующем. Поддерживая постоянной силу разрядного тока (что достигается изменением сопротивления во внешней цепи разряда), приближают постепенно анод к катоду и определяют зависимость напряжения горения разряда  $V$  от расстояния  $l$  между анодом и катодом. При этом величина  $V$  сначала постепенно уменьшается за счет уменьшения длины положительного столба.

Начиная с некоторого расстояния, при котором положительного столба уже нет, уменьшение напряжения сначала идет быстрее (вследствие сокращения области ФТП см рис.2), а затем в некотором интервале изменения  $l$  оно практически не изменяется (область ОС). При дальнейшем уменьшении расстояния между катодом и анодом для поддержания разряда при заданной силе тока требуется быстрый рост напряжения. Причина такого роста видна из соотношения (1), откуда следует, что уменьшение  $d$  можно компенсировать только ростом  $\gamma$  и  $\alpha$ . Последнее возможно только за счет увеличения напряжённости электрического поля в катодной области, т.е. за счет роста  $V_k$ . Значение  $l$ , при котором происходит резкое возрастание напряжения на разрядной трубке, определяет длину катодного падения потенциала  $d_k$ , а величина  $V(d_k)$  определяет  $V_k$ .

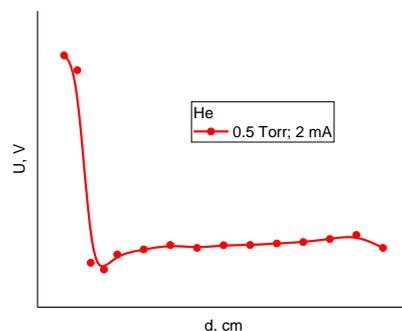


Рис.5. Зависимость напряжения горения от длины межэлектродного промежутка для гелия при различных давлениях и фиксированном разрядном токе.

## § 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная установка состоит из газоразрядной трубки 1, где реализуется тлеющий разряд, источника постоянного тока, системы измерительных приборов. Для создания и поддержания нужного давления в газоразрядной трубке используются системы откачки и напуска рабочих газов.

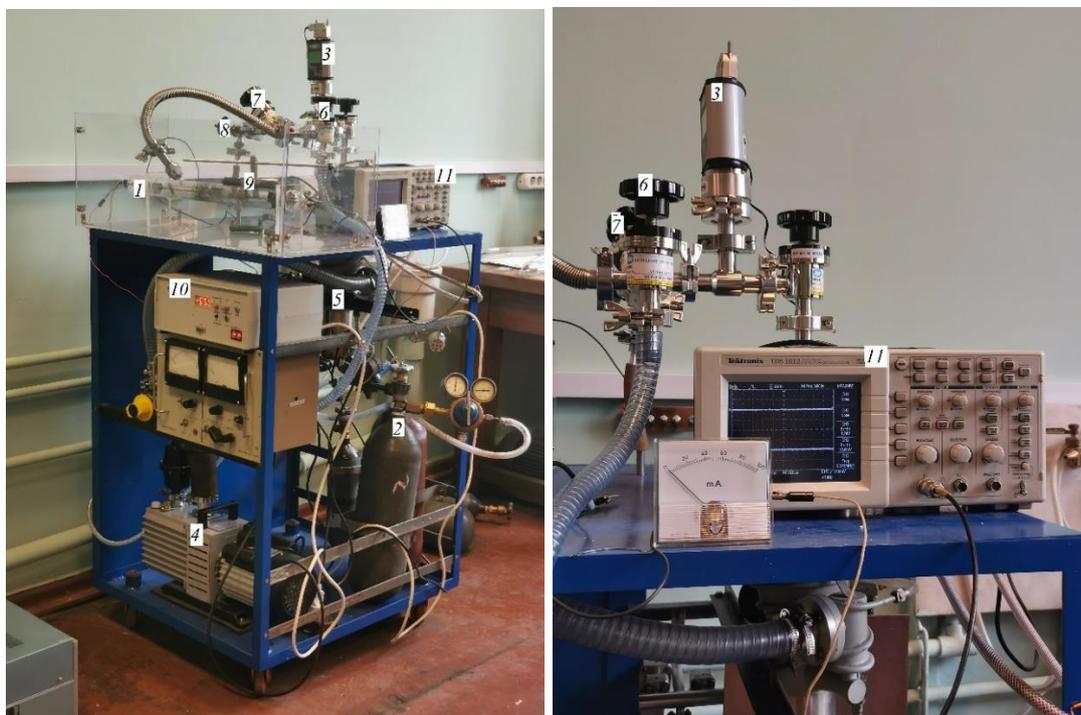


Рис.6. Экспериментальная установка. 1 – газоразрядная камера, 2 – баллоны с газом (аргон и гелий), 3 – датчик давления, 4 – форвакуумный насос, 5 – турбомолекулярный насос, 6 – байпас, 7 – главный затвор, 8 – вентиль точной регулировки, 9 – манипулятор для электродов, 10 – источник постоянного тока, 11 – вольтметр (осциллограф).

Тлеющий разряд создается в стеклянной газоразрядной трубке 1 (см. рис. 6) с внутренним диаметром  $D = 5$  см. В трубке находятся два электрода: катод и анод. Электроды из никеля впаяны в стеклянные цилиндры с металлическими вставками. Электроды могут перемещаться по длине трубки с помощью специальной ручки 9, оборудованной двумя магнитами, которые взаимодействуют с металлическими вставками внутри цилиндров с электродами.

Откачка газоразрядной трубки осуществляется с помощью системы форвакуумного 4 и турбомолекулярного 5 насосов. В данной задаче диапазон используемых давлений позволять обойтись только форвакуумным насосом. Напуск рабочих газов осуществляется с помощью системы подачи, включающий в себя магистраль, затвор 7 и вентиль 8 для контроля напуска газа. Давление контролируется датчиком 3.

Электрическая схема для исследования тлеющего разряда представлена на рис.7. Напряжение для питания трубки подается от источника питания постоянного тока 10, который может работать как в режиме стабилизации по напряжению, так и по току. Диапазон изменения напряжения 0 – 2 кВ, тока 0 - 15 мА. Сила разрядного тока измеряется миллиамперметром. Вольтметр 11  $V$  служит для измерения падения напряжения на трубке.

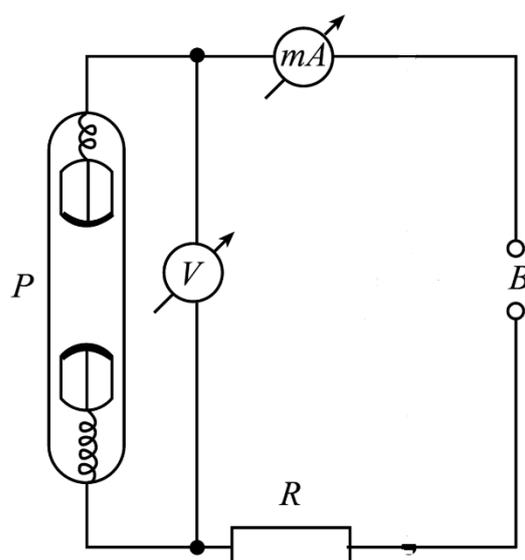


Рис. 7. Электрическая схема измерений при изучении тлеющего разряда:  $R$  – сопротивление 30 кОм,  $V$  - электростатический вольтметр,  $P$  - разрядная трубка,  $B$  –

источник питания,  $mA$  - миллиамперметр.

## § 6. ЗАДАНИЕ

### *I. Изучение нормального и аномального режимов тлеющего разряда*

1) Получить вольт-амперную характеристику тлеющего разряда для двух расстояний между электродами  $l=3$  см,  $l=5$  см. Построить кривые  $V=f(i)$  на одном графике. Определить интервал тока, соответствующий нормальному катодному падению.

2) Используя полученные ВАХ, определить напряжённость поля  $E$  в плазме положительного столба для нормального режима тлеющего разряда.

3) Определить области нормального и аномального режимов тлеющего разряда.

Необходимо включить форвакуумный насос 4. Сразу после его включения нужно открыть вентиль 6: обход для неиспользуемого в данной работе турбомолекулярного насоса и откачать камеру до давления 0.01-0.02 Торр. Далее необходимо прокачать магистраль, ведущую от баллона с аргоном в камеру. Для этого затвор 7 и вентиль 8 открываются полностью. После достижения необходимого давления вентиль точной регулировки закрыть. Дальнейшая регулировка давления осуществляется именно вентилем 8 (рис. 8). При этом затвор остаётся в максимально открытом положении. Открыть баллон с газом 2, подняв давление до 1.5 атм. Диапазон изменения давления – от 0.02 Торр до 7 Торр. Для аргона выставить поочерёдно два давления 0.05 и 0.08 Торр, регулируя расход вентилем 8.



Рис. 8. Вентиль точной регулировки.

Далее включить источник питания, переключить в режим регулировки напряжения (рис. 9а.) и выставить максимально возможное (чуть менее 2 кВ).



Рис.9. Источник питания, регулировка напряжения (а), регулировка тока (б).

Далее переключить на регулировку тока (рис. 9а) и выставлять необходимые значения. Первое значение – сила тока, при которой загорелся газовый разряд, далее через 1 мА. Напряжение считывать по вольтметру (осциллографу).

Закрывать баллон с аргоном, откачать газоразрядную камеру и магистраль. Повторить ту же последовательность действия для гелия, выставив давления 0.5 и 0.8 Торр.

## *II. Изучение катодного падения тлеющего разряда*

1) Определить параметры катодного падения тлеющего разряда методом затрудненного разряда. Схема измерений остается прежней. Выставить давление в 0.08 Торр для аргона, а также давления 0.2, 0.5, 0. Торр для гелия. Зафиксировать разрядный ток 2 мА, напряжение также, как и в предыдущем упражнении развязано (на максимуме источника питания). Постепенно уменьшая расстояние между электродами и поддерживая силу разрядного тока постоянной, получить кривую зависимости напряжения

горения как функцию расстояния между электродами  $V = f(l)$  для двух значений силы разрядного тока. Найти величину нормального катодного падения  $V_{kn}$  и ее ширину  $d_{kn}$ .

2) Аналогичные измерения провести для аномального катодного падения.

### *III. Изучения положительного столба тлеющего разряда*

Повторить условия предыдущего упражнения. Установить максимально возможную длину разрядного промежутка. Постепенно сближая электроды измерить величину падения потенциала в положительном столбе. Наблюдать за уменьшением положительного столба вплоть до его полного исчезновения (рис. 10).

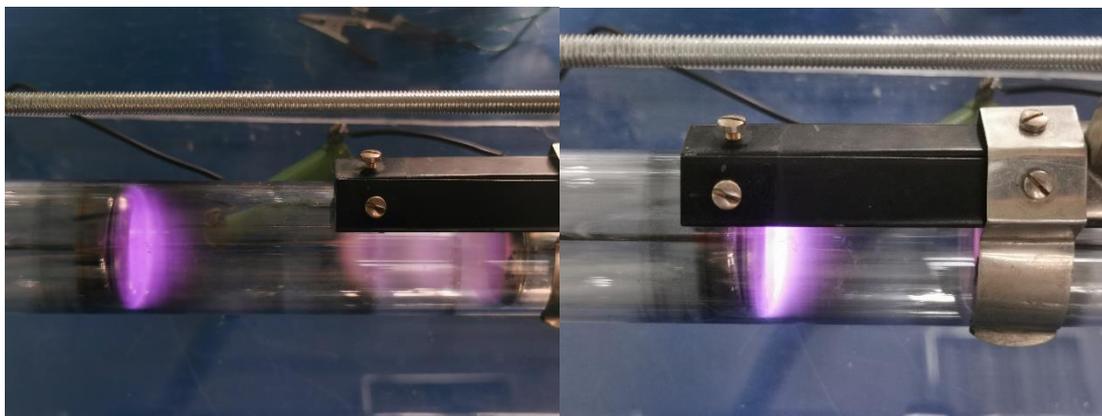


Рис. 10. Исчезновение положительного столба при сближении электродов.

Используя участок кривой  $V=f(l)$ , соответствующий сокращению области плазмы положительного столба, определить напряжённость поля в плазме  $E = \frac{\Delta V}{\Delta l}$ . Сравнить с результатами измерений  $E$  в предыдущем упражнении при том же значении разрядного тока.

## **§ 7. ЛИТЕРАТУРА**

1. Грановский В.Л. *Электрический ток в газе*, т.2, с.292-332, 1971.
2. Энгель А. *Ионизованные газы*, с.179,224-247, 1959.
3. Капцов Н.А. *Радиофизическая электроника*, с. 371-384, 462- 474, 487-494, 1960.
4. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*, 1992.
5. Солнцев Г.С. *Специальный практикум по газовой электронике и физике плазмы. ч.1*, 1988.