

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

**Лабораторный практикум
“ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ”**

Учебно-методическое пособие

Электрический ток в газах и жидкостях

ВЫПУСК 3

Новосибирск
2008

Данный выпуск является третьим из шести выпусков сборников описаний лабораторных работ лабораторного практикума «Электричество и магнетизм», выполняемого в рамках учебного плана третьего семестра по специальности «физика».

Во введении настоящего выпуска изложена краткая теория протекания электрического тока в газах и жидкостях, приведены табличные данные, далее приведено описание лабораторных работ раздела «Электрический ток в газах и жидкостях».

Составители: Б. А. Князев, А. А. Корепанов, А. С. Кудрявцев,
И. И. Морозов

Отв. за выпуск: И. И. Морозов

Под общей ред. доктора физ.-мат. наук, проф. Б. А. Князева

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доцент В. Т. Астрелин

© Новосибирский
государственный
университет, 2008

© Б. А. Князев, А. А. Корепанов,
А. С. Кудрявцев, И. И. Морозов

ОГЛАВЛЕНИЕ

3. Электрический ток в газах и жидкостях

1. Электрический ток в газах 4

2. Электрический ток в жидкостях 7

Работа 3.1. Несамостоятельный разряд в газах 8

Работа 3.2. Самостоятельный разряд в газах 19

Работа 3.3. Влияние неупругих столкновений электронов на вольт-амперную характеристику..... 30

Работа 3.4. Электропроводность жидкостей 36

Литература 40

1. Электрический ток в газах

В обычном состоянии газы обладают низкой проводимостью, так как состоят из незаряженных частиц. Чтобы вызвать в газе электропроводность нужно создать и поддерживать в нем достаточную концентрацию заряженных частиц. Отрыв электрона от атома или молекулы (ионизация) требует передачи электрону определенной энергии. Величина энергии ионизации зависит от строения атома или молекулы. Для появления электропроводности достаточно и появления отрицательных и положительных ионов (ионной диссоциации молекул). Но в результате столкновений положительно заряженных ионов с электронами или с отрицательно заряженными ионами возможна нейтрализация (рекомбинация) частиц ионизированного газа. При рекомбинации энергия может уноситься излучением фотонов. То есть, для поддержания нужной концентрации заряженных частиц в газе требуется вкладывать в него энергию. Это может быть достигнуто нагревом газа до высоких температур, воздействием ионизирующего излучения или протеканием тока через газ. В качестве ионизирующего излучения могут использоваться фотоны с энергией больше потенциала ионизации - ультрафиолетовое излучение и более коротковолновое. Также ионизация происходит при столкновении с газом заряженных частиц с кинетической энергией больше потенциала ионизации. Например, электрон с большой кинетической энергией, при соударении с нейтральным атомом выбивает из него один или несколько атомных электронов, в результате чего нейтральный атом превращается в положительно заряженный ион. Выбитые электроны при движении во внешнем электрическом поле могут сами давать вклад в электрический ток, а могут присоединиться к нейтральным атомам и вклад в электрический ток будут давать образовавшиеся отрицательные ионы. При нагреве газа до больших температур (свыше десяти тысяч градусов) в газе появляются частицы (в соответствии с распределением Максвелла) имеющие кинетическую энергию достаточную, чтобы при столкновении произошла ионизация.

Во время движения заряженных частиц в электрическом поле происходит их ускорение, но одновременно они испытывают столкновения, в основном, с атомами газа. В результате

заряженные частицы приобретают определенную среднюю скорость, которая пропорциональна электрическому полю и времени между столкновениями.

$$v_{\pm} = b_{\pm} E \quad (3.0.1),$$

где b_{\pm} = подвижность заряженных частиц соответствующего знака заряда. Она равна средней скорости, приобретаемой заряженной частицей в электрическом поле единичной напряженности. Подвижность разного сорта ионов будет отличаться между собой и от подвижности электронов. Выражение (3.0.1) справедливо, если число столкновений достаточно велико, то есть длина свободного пробега заряженных частиц во много раз меньше расстояния между электродами. Это условие выполняется при давлении газа в несколько десятых мм рт. ст. В противоположном случае можно считать, что заряженные частицы движутся в вакууме с ускорением и влияние на них оказывает только объемный заряд ионов и поле между электродами.

Подвижность ионов определенного типа тем больше, чем меньше сила трения, испытываемая ими со стороны окружающих атомов или молекул. А сила трения пропорциональна частоте столкновений, которая пропорциональна давлению (концентрации частиц) газа. Поэтому в очень широком диапазоне давлений подвижность обратно пропорциональна давлению газа p . То есть:

$$bp = const \quad (3.0.2)$$

Таблица 3.1

Газ	Подвижность ионов $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{Вс})$		Газ	Подвижность ионов $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{Вс})$	
	b_{+}	b_{-}		b_{+}	b_{-}
Водород	5,91	8,26	Окись		
Кислород	1,29	1,79	углерода	1,1	1,14
Азот	1,27	1,84	Хлор	0,65	0,51

Значения подвижностей при комнатных условиях для некоторых газов приведены в таблице 3.1 /1,2 /.

В газе, в отличие от металлов, заряженные частицы могут быть распределены неравномерно. Отличный от нуля градиент концентрации ионов приводит к потоку диффузии ионов с плотностью тока:

$$-qD_i \frac{dn_i}{dx},$$

Где D_i – коэффициент диффузии ионов, q – заряд иона.

Плотность тока ионов обусловленная приложенным электрическим полем равна:

$$qn_i b_i E.$$

Плотность тока данных ионов будет равна:

$$-qD_i \frac{dn_i}{dx} + qn_i b_i E \quad (3.0.3)$$

Полная плотность тока равна сумме плотностей токов всех ионов, находящихся в газе.

Локальные концентрации положительных и отрицательных ионов в газе могут отличаться друг от друга, что приводит к появлению объемного заряда. Объемный заряд, в свою очередь, приводит к дополнительному электрическому полю.

Существует еще одна очень важная особенность проводимости газов. Концентрация заряженных частиц может изменяться в процессе разряда в результате ионизации и рекомбинации и зависеть от напряженности электрического поля.

В свою очередь, протекание тока по газу может изменять свойства газа, такие как давление или температура. Более подробно эти явления рассмотрены в /4/. Указанные причины приводят к тому, что газовые проводники, как правило, не подчиняются закону Ома.

Рассмотрим начальную стадию появления проводимости газа. Если газовый промежуток находится в электрическом поле с небольшой напряженностью, его проводимость близка к нулю. Появление конечной проводимости называется пробоем газового

промежутка. Основной причиной электрического пробоя газового промежутка является появление в нем заряженных частиц. Их источником может быть, например, эмиссия электронов с поверхности электродов, ионизация газа космическим излучением или искусственным ионизатором, молекулярные процессы. Эти первичные электроны, дрейфуя в электрическом поле, при достаточной величине напряженности, могут возбуждать и ионизовать атомы или молекулы среды, что приводит к размножению электронов и появлению в объеме ионов и фотонов. Ток в промежутке увеличивается. Образовавшиеся в промежутке ионы и фотоны достигают электродов, вызывая эмиссию вторичных электронов. Это может привести к развитию самостоятельного или несамостоятельного газового разряда. В развитии разряда определяющую роль играют электроны, так как они более легкие, по сравнению с ионами частицы, способны быстрее набирать энергию в электрическом поле и ионизовать газ в промежутке.

3.0.2. Электрический ток в жидкостях.

В жидкостях электрический ток, как и в других средах, может протекать благодаря направленному движению заряженных частиц. Характерной особенностью жидкостей является то, что в роли заряженных частиц могут выступать только ионы, так как электроны обладают чрезвычайно малой длиной пробега до прилипания к атому или молекуле. К тому же, многие растворы, называемые электролитами характеризуются диссоциацией молекул на положительно заряженные и отрицательно заряженные ионы. К электролитам относятся многие водные растворы солей, кислот и оснований. Спиртовые растворы неорганических соединений также проявляют свойства электролитов. Основное свойство электролитов – разложение его составных частей электрическим полем. Отрицательно заряженные ионы движутся (и осаждаются) к положительному электроду, положительно заряженные к отрицательному электроду. Диссоциация молекул в электролитах происходит в результате взаимодействия с полями молекул растворителя.

Важной характеристикой электролита является степень диссоциации α равная числу диссоциировавших молекул к общему числу растворенных молекул. Величина α зависит от концентрации n растворенного вещества. В равновесном состоянии /2/

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha} = \frac{K}{n}, \quad (3.0.4)$$

Где K – константа, зависящая в свою очередь от температуры и давления раствора. Это соотношение называется законом разведения Освальда и следует из равенства скоростей диссоциации и рекомбинации ионов.

При движении в жидкости ион испытывает силу трения, которая при установившемся движении пропорциональна скорости. Аналогично движению в газовой среде, движение иона в жидкости можно характеризовать подвижностью. Подвижности положительно заряженных ионов b^+ отличаются от подвижности отрицательно заряженных b^- . Скорости ионов в электрическом поле с напряженностью E будут:

$$u^+ = b^+ E, \quad u^- = -b^- E \quad (3.0.5)$$

Концентрации отрицательны ионов и положительных равны αn , так как раствор остается нейтральным на макроскопических размерах и плотность электрического тока в электролите:

$$j = \alpha n (q^+ u^+ + q^- u^-). \quad (3.0.6)$$

В таблице 3.2 приведены значения подвижности ионов в воде при комнатной температуре для малой концентрации /2/.

Таблица 3.2

Ион	Подвижность $10^{-3} \text{ см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$	Ион	Подвижность $10^{-3} \text{ см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$
H^+	3,26	OH^-	1,80
Li^+	0,346	Cl^-	0,677
Na^+	0,450	NO_3^-	0,639
K^+	0,669	I^-	0,688

Лабораторная работа 3.1

НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД В ГАЗЕ.

Лабораторная работа посвящена изучению несамостоятельного разряда и измерению электрических характеристик воздуха, ионизированного α -частицами.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Проводимость атмосферного воздуха в нормальных условиях очень мала ($\sigma_{\text{воздуха}} \sim 10^{-15} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$) и обусловлена наличием в нем небольшого числа ионов и электронов, образованных при ионизации атомов газа под действием космических лучей и естественной радиоактивности земной коры. Однако, подвергая газ различным внешним воздействиям, можно вызвать в нем электропроводность. Источниками образования заряженных частиц в газе могут служить высокая температура, радиоактивное излучение, столкновения с электронами и другими быстрыми частицами. Влияние этих источников приводит к тому, что от атомов газа отщепляется один или несколько электронов, в результате чего вместо нейтрального атома возникает положительный ион и электроны. Часть образовавшихся электронов может быть при этом захвачена другими нейтральными атомами, и тогда появятся еще отрицательные ионы. В результате, плотности положительных ионов и отрицательных могут быть различны. Время жизни таких ионов в условиях атмосферы составляет доли миллисекунды, так как образовавшийся ион становится центром нуклеации других молекул или захватывается аэрозольной частицей [5]. Образующийся вокруг первичного молекулярного иона за счет присоединения к нему группы нейтральных молекул кластер имеет электрический заряд иона. Участвуя в тепловом движении, кластерный ион сталкивается с другими кластерными ионами, аэрозольными частицами, молекулярными ионами и нейтральными молекулами. При каждом столкновении кластерного аэроиона с нейтральной молекулой может произойти химическая реакция. Основу кластерного иона составляет молекула какого-то активного вещества. В случае отрицательных ионов активность веществ зависит от сродства к электрону. Наибольшим сродством к электрону характеризуются

VII группы (Cl, F). Активно участвуют в химии отрицательных ионов также окислы азота и серы. Активность веществ в реакциях с положительными ионами коррелирована с потенциалом ионизации. Основой положительного иона могут быть, в частности, аммиак и сернистый водород. Наиболее активными веществами (относительно реакции с положительными ионами) являются щелочные металлы (литий, калий, натрий). Кроме молекулы активного вещества, которая составляет основу иона, легкий ион содержит еще несколько добавочных молекул, «прилипших» к основной молекуле и удерживаемых как электрическими, так и молекулярными силами. Число таких молекул может меняться от столкновения к столкновению и обычно не превышает десяти. В течение своей жизни кластерный (легкий) ион участвует в большом количестве столкновений и химических превращений. При этом, чем старше кластерный ион, тем более редкие примеси могут определять его состав. Если воздух не содержит каких-то специальных примесей, то к основной молекуле кластера (молиону) прилипают молекулы воды. Для отрицательных ионов их количество меньше (2–5), чем для положительных ионов (5–12). При естественном уровне ионизации кластерный (легкий) ион живет около одной минуты, причем примерно 5% легких ионов заканчивают свою жизнь рекомбинацией с легким ионом противоположной полярности, а 95% легких ионов погибают при встрече с нейтральными или противоположно заряженными аэрозольными частицами.

Если образование ионов происходит только под действием внешнего ионизатора, то такой газовый разряд и соответствующая ему проводимость называются *несамостоятельными*.

В отсутствии электрического поля столкновения носителей заряда (ионов, электронов) с атомами (молекулами) газа и взаимодействие друг с другом приводят к беспорядочному движению с максвелловским распределением по скоростям. Под действием внешнего электрического поля возникает направленное движение носителей заряда, часто называемое дрейфом. Дрейф происходит не с ускорением, как при движении в пустоте, а вследствие непрерывных столкновений с атомами газа, “трений” о газ с некоторой постоянной средней скоростью $V_{др.}$, величина которой зависит от напряженности электрического поля E , а

направление совпадает с направлением силовых линий поля. В работе используется сравнительно большое давление (атмосферное) газа и малая напряженность электрического поля. При таких условиях можно считать, что характерное для беспорядочного движения максвелловское распределение носителей заряда по скоростям сохраняется в присутствии поля, не искажается наличием слабого дрейфа. Величина $V_{др.}$ имеет линейную зависимость от электрического поля E .

$$\vec{V}_{др.} \approx \frac{e\lambda_i}{m_i V_i} \vec{E} = b_i \vec{E} \quad (3.1.1)$$

где λ_i – длина свободного пробега иона в газе, V_i – тепловая скорость иона. Коэффициент пропорциональности b_i называют подвижностью иона. Плотность тока может быть записана через концентрацию ионов n_i и скорость их направленного движения $V_{др.}$:

$$\vec{j} = en_i \vec{V}_{др.} = en_i b_i \vec{E} \quad (3.1.2)$$

Разделив плотность тока на величину электрического поля, получим удельную проводимость газа:

$$\sigma = j / E = en_i b_i \quad (3.1.3)$$

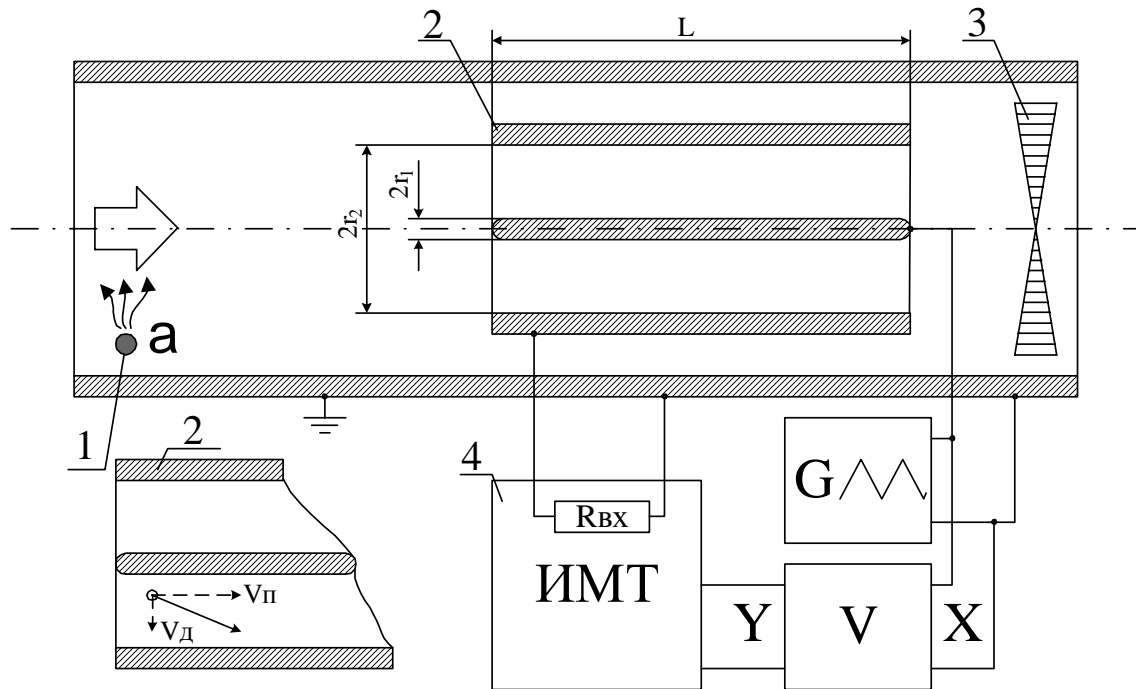
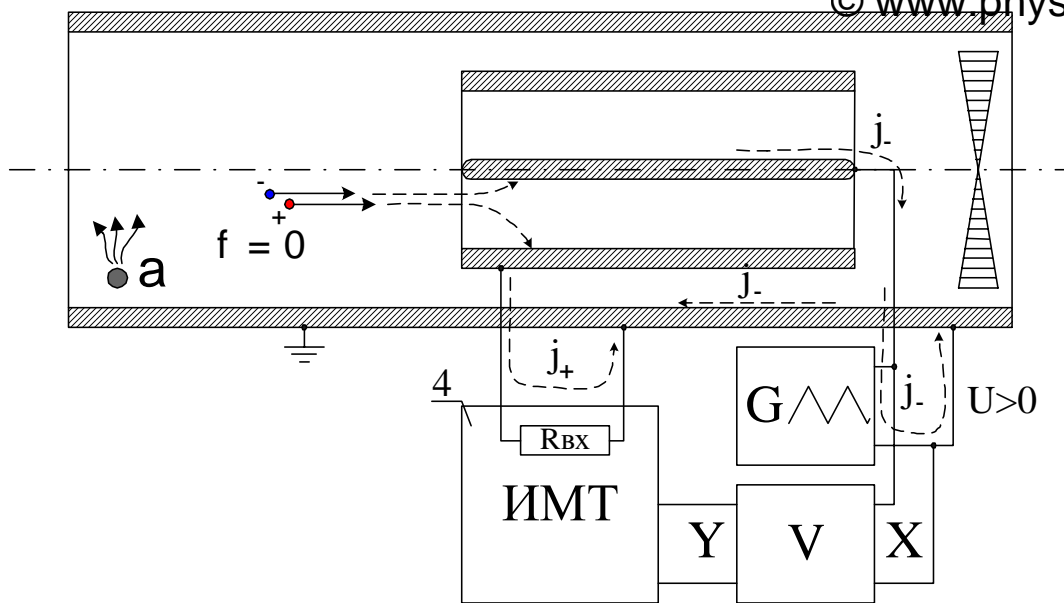


Рис.3.1.1. Схематическое изображение установки для изучения несамостоятельного разряда в газах: 1 – источник α -частиц; 2 – измерительный цилиндрический конденсатор; 3 – вентилятор; 4 – измеритель малых токов.

Для изучения несамостоятельной проводимости воздуха в данной работе используется установка, схема которой приведена на рис.3.1.1. Вентилятор (3), питаемый от специального источника, протягивает ионизованный энергичными α -частицами воздух через измерительный конденсатор (аспирационный конденсатор),

выполненный в виде двух коаксиальных цилиндров (2), между которыми приложена разность потенциалов, создаваемая источником пилообразного напряжения (G). Под действием электрического поля ионы движутся к обкладкам конденсатора в соответствии со знаком их заряда и полярностью напряжения генератора. С помощью измерителя малых токов (ИМТ) измеряется ток, протекающий через одну из обкладок (собирающая обкладка). Выход измерителя подключен к входу Y (канал 2) цифрового осциллографа, на вход X (канал 1) которого подается линейно меняющееся напряжение генератора пилы. Таким образом производится запись вольт-амперной характеристики разряда. Причем, при положительном напряжении между внутренним электродом и собирающей обкладкой ток положительных ионов замыкается на землю через измеритель тока, а ток отрицательных ионов – через генератор (рис.3.1.2), при обратной полярности генератора ($U < 0$) вклад в ток собирающей обкладки будут давать только отрицательные ионы. Таким образом, снимаемая характеристика будет несимметричной, так как подвижности отрицательных и положительных ионов неодинаковы. Если заряды, входящего в измерительный конденсатор и выходящего из него воздуха не равны между собой, то сумма токов через обкладки конденсатора может отличаться от нуля.



3.1.2 Направление токов ионов разных знаков при положительной полярности напряжения генератора.

Объяснить полученную вольт-амперную характеристику можно исходя из закона сохранения заряда. Изменения заряда в единичном объеме определяется плотностями тока источника j_u и стока j_c :

$$\frac{dq}{dt} \sim j_u + j_c \quad (3.1.4)$$

В установившемся режиме $\frac{dq}{dt} = 0$ и следовательно,

$$|j_u| = |j_c|$$

Ток источника (поступление ионизованного α -частицами воздуха) в данном эксперименте постоянный. Сток заряженных частиц образуется за счет нескольких процессов:

- Взаимная рекомбинация

$$I_p \sim kn^2 \quad (3.1.5)$$

- Движение заряженных частиц под действием электрического поля

$$I_{np} \sim enV_{\partial p}. \quad (3.1.6)$$

- Вынос заряженных частиц с потоком воздуха I_n
- Диффузия заряженных частиц на стенки I_{∂} .

Здесь k – коэффициент рекомбинации, n – число заряженных частиц в единице объема.

Когда диффузия заряженных частиц на стенки мала, но электрическое поле недостаточно велико, чтобы уловить все ионы, попавшие в конденсатор, в измерительном цилиндре существует режим омической проводимости.

$$I_{np}^{\pm} \sim en^{\pm} b^{\pm} E \quad (3.1.7)$$

или

$$I_{np}^{\pm} \sim \sigma^{\pm} E \quad (3.1.8)$$

где σ^{+} и σ^{-} - проводимости воздуха при положительном и отрицательном напряжении между внутренним и собирающим электродами соответственно. В переходной области I_{np} , I_n , I_{∂} , I_p соизмеримы, т.е. для выполнения закона Ома в газах необходимы следующие условия:

- 1) Концентрация заряженных частиц в области проводимости достаточно высокая и не зависит от величины поля.
- 2) Поле, создаваемое электродами, больше поля, образованного самими заряженными частицами.
- 3) Подвижность заряженных частиц не зависит от внешнего поля.

Если поле в цилиндре настолько велико, что ионы достигают электродов, не успевая рекомбинировать и пройти через весь

конденсатор с потоком воздуха, то наблюдается режим насыщения, т.е. ток источника равен току насыщения

$$I_u = I_n$$

Зная скорость потока воздуха V_n и входное сечение конденсатора S , ток насыщения можно записать в виде

$$I_n = enV_n S \quad (9)$$

Из формулы (9) можно оценить концентрацию ионов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

(ДОПУСК К ЭКСПЕРИМЕНТУ)

- 1 Напишите формулу емкости цилиндрического конденсатора.
- 2 Оцените ток смещения через цилиндрический конденсатор, используемый в работе, для пилообразного источника напряжения амплитудой 50 В с периодом 200 сек.
- 3 Запишите точные формулы 7,8 для использования в расчетах.
- 4 Оцените количество ионов, образуемых α -частицами источника за 1 сек.

ЭКСПЕРИМЕНТ.

На установке, собранной по схеме 3.1.1, запишите 3-4 вольт-амперные характеристики несамостоятельного разряда для различных скоростей протяжки воздуха. Объясните полученные кривые.

Указания:

– Скорость протяжки воздуха регулируется с помощью ЛАТРа; рекомендуемые значения напряжения не более 120В.

– Использовать источник пилообразного напряжения на частоте не выше $5 \cdot 10^{-3}$ Гц (настраивать развертку осциллографа лучше на повышенной частоте).

– Для записи характеристик разряда в цифровом виде на карту памяти осциллографа тектроникс TDS1012 необходимо проводить измерения в режиме YT и сохранять каждую осциллограмму в отдельный файл данных.

По полученным характеристикам определить:

1) электропроводность ионизированного воздуха σ^+ и σ^- на участке омической проводимости,

2) подвижности отрицательных и положительных ионов b^+ и b^- ,

,

3) концентрацию ионов n^+ и n^- .

Оцените погрешность измерений. Полученные данные занесите в таблицу 3.3

Попробуйте объяснить отличия характеристик отрицательных и положительных ионов.

Знак носителей заряда	$U_{\text{ЛАТР}}, \text{ В}$	$v_n, \text{ м/с}$	$I_n, \text{ А}$	$n, \text{ м}^{-3}$	$\sigma, \text{ Ом}^{-1}\text{ м}^{-1}$	$b, \text{ м}^2/\text{с/В}$	$\frac{b^-}{b^+}$
+	60						
-							
+	80						
-							
+	100						
-							
+	120						
-							

Таблица 3.3.

Лабораторная работа 3.2

Самостоятельный разряд в газах

Цель работы – экспериментальное изучение явления самостоятельного разряда в газах.

1. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ

В обычных условиях при отсутствии источников ионизации газ представляет собой хороший диэлектрик, так как концентрация носителей зарядов в нем весьма мала. Можно увеличить концентрацию носителей зарядов, ионизуя газ фотонами или заряженными частицами с энергией, достаточной для ионизации. Например, облучая газ кварцевой лампой, продуктами распада радиоактивных изотопов, или ускоренными электронами, испущенными разогретым катодом. Протекание тока по газу, обусловленное зарядами, образованными внешними источниками, называется *несамостоятельным разрядом*.

При достаточно большом напряжении U между двумя электродами в газе может возникнуть *самостоятельный разряд*, поддержание которого не требует наличия внешних источников ионизации. Рассмотрим формирование электрического разряда в газе, находящемся между двумя электродами под разными потенциалами. В промежутке между электродами всегда имеется небольшое количество заряженных частиц, возникших из-за ионизации газа космическим излучением, ультрафиолетовой компонентой дневного света или по другим причинам.

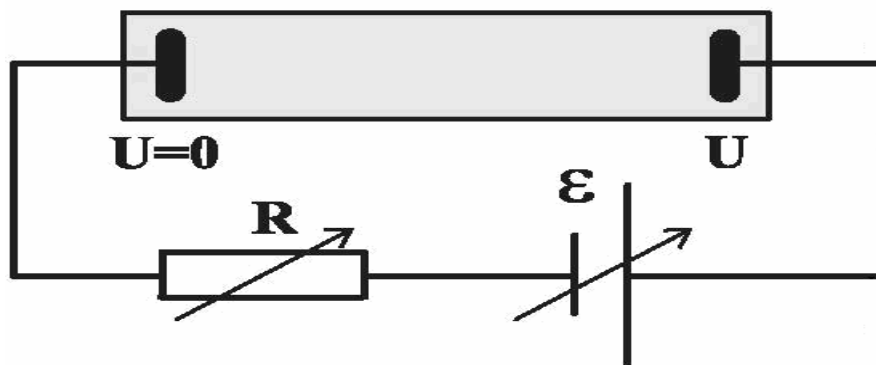


Рис.3.2.1. Электрическая схема разряда в газовой трубке

Если в цепи, изображенной на рисунке 3.2.1, поднимать напряжение на источнике, часть заряженных частиц будет приходить на электроды и в цепи появится ток. По мере роста напряжения ток будет расти за счет увеличения сбора заряженных частиц электродами вплоть до того момента, когда на электроды будут собираться все заряженные частицы, рожденные в промежутке. Это показано на рисунке 3.2.2, как фоновая ионизация (участок АВ). При дальнейшем повышении напряжения в режиме насыщения ток практически не изменяется (участок ВС). Очевидно, что если имеется внешний источник, дополнительно ионизирующий газ или вызывающий дополнительную эмиссию электронов с катода, то прямая ВС сместится вправо. Режим насыщения используется в ионизационных камерах для измерения мощности источников ионизирующего излучения. Эти два режима самостоятельного разряда характеризуются отсутствием газового усиления и малыми токами.

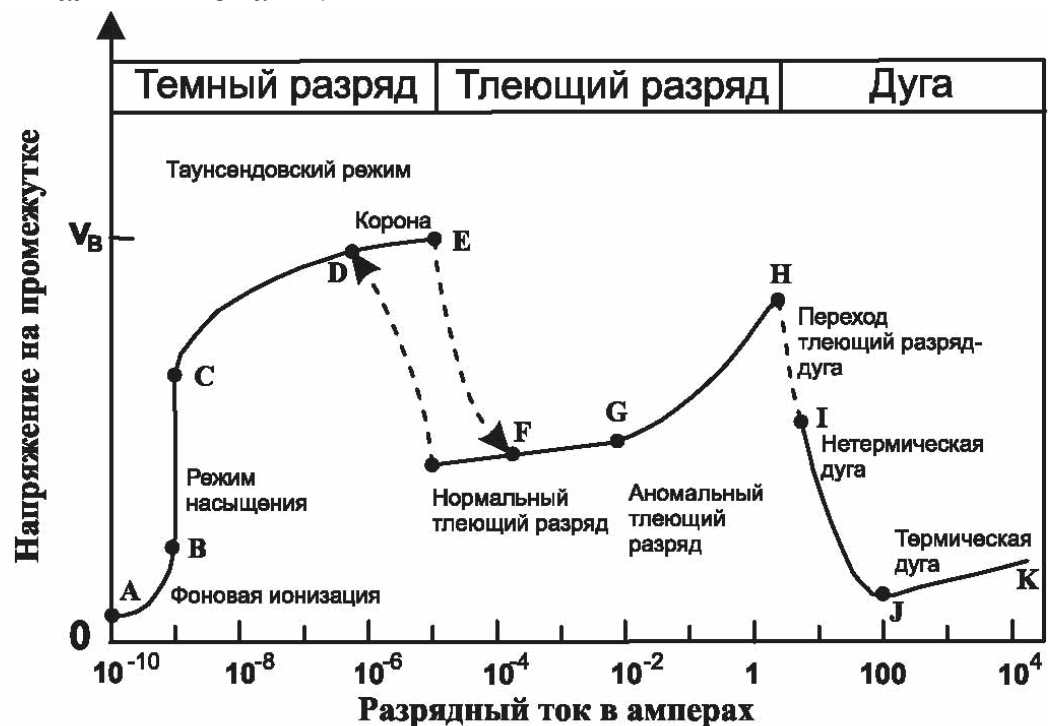


Рис. 3.2.2. Вольт-амперная характеристика электрического разряда постоянного тока

При дальнейшем увеличении напряжения источника в промежутке возникает газовое усиление - увеличение количества

свободных зарядов в промежутке за счёт того, что первичные электроны на своём пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов, вызывая генерацию лавин. Ток в промежутке, обусловленный газовым усилением, возрастает с ростом напряжения, разряд по-прежнему остается несамостоятельным (участок СЕ на Рис.3.2.2.). Участок АЕ носит название *темный разряд*, поскольку газ при таких условиях почти не излучает. Так как на этом участке ВАХ через сопротивление **R** протекает очень малый ток, практически все напряжение источника питания приложено к разрядному промежутку. По достижении коэффициента газового усиления промежутка, равного единице, разряд становится самостоятельным и не требует для своего поддержания внешнего ионизатора. Вблизи точки Е поле в промежутке начинает искажаться пространственным зарядом, вследствие чего разряд переходит в режим нестационарных пробоев промежутка (так называемый стримерный режим), проявляющийся в вольт-амперной характеристике на Рис.3.2.2. гистерезисной петлей D-E-F-D и приводящий к переходу в самостоятельный разряд (участок EF). Ток в промежутке возрастает, сопротивление промежутка становится сравнимым с сопротивлением внешней цепи R, и напряжение на промежутке падает. Увеличение тока можно осуществить, либо поднимая напряжение источника, либо уменьшая сопротивление резистора. В результате возникает нормальный тлеющий разряд с почти постоянным напряжением в широком диапазоне токов (участок FG). Начиная с некоторого тока, напряжение на промежутке возрастает. Эту ветвь ВАХ называют аномальным тлеющим разрядом (участок GH). Переход от нормального к аномальному тлеющему разряду связан с перераспределением потенциала по длине газоразрядной трубки. В точке H напряжение снова падает и возникает сначала нетермический дуговой разряд (участок IJ), а затем – термический дуговой разряд (участок JK). Для нетермического дугового разряда ВАХ – спадающая. Он характеризуется относительно небольшой концентрацией заряженных частиц и, как следствие, отсутствием теплового равновесия между частицами газа и электронами, в отличие от термического разряда, где возникает равновесие.

Минимальная разность потенциалов, при которой происходит переход газового разряда в стадию самостоятельного, называется потенциалом зажигания U_z . Величина его зависит от природы и давления газа, от материала, формы и состояния поверхности электродов, от расстояния между ними. Сильное влияние на величину потенциала зажигания оказывает наличие даже незначительных примесей к основному газу, заполняющему междueleктродный промежуток.

Снижая разность потенциалов между электродами, можно погасить установившийся самостоятельный разряд, причем потенциал гашения U_g , при котором самостоятельный разряд прекращается, ниже U_z , так что $\Delta U = U_z - U_g$ имеет величину порядка десяти вольт. Разница ΔU объясняется тем, что во время горения самостоятельного разряда весьма велико количество свободных носителей заряда и фотонов, образовавшихся при разряде, так что их достаточно для поддержания самостоятельного разряда и при пониженном напряжении. Наличие заряженных частиц повышает проводимость промежутка и может привести к появлению пространственного заряда, что приводит к локальному повышению напряженности электрического поля.

При самостоятельном разряде одним из способов ионизации атомов или молекул является ионизация электронным ударом. Она становится возможной, тогда, когда электрон на длине свободного пробега приобретает кинетическую энергию, достаточную для совершения работы по отрыву электрона от атома или молекулы (эта величина называется потенциалом ионизации).

Помимо рассмотренных выше, известны такие нестационарные электрические разряды в газах, как искровой и коронный.

Искровой разряд возникает между электродами, имеющими большую разность потенциалов. Механизм формирования искрового разряда - электронный удар. Один из видов искрового разряда - это молния, в которой разность потенциалов достигает десятков тысяч вольт. Искровой разряд имеет вид ярких зигзагообразных разветвляющихся нитей-каналов, которые пронизывают разрядный промежуток и исчезают, сменяясь новыми. Каналы искрового разряда начинают расти, иногда, от положительного электрода, иногда, от отрицательного, а, иногда, и от какой-нибудь точки между электродами. Это объясняется тем,

что ионизация ударом в случае искрового разряда происходит не по всему объему газа, а по отдельным каналам, проходящим в тех местах, в которых концентрация ионов оказалась наибольшей. Искровой разряд сопровождается выделением большого количества теплоты, ярким свечением газа, треском или громом. Все эти явления вызываются электронными и ионными лавинами, которые возникают в искровых каналах и приводят к увеличению давления, достигающему $10^7 - 10^8$ Па, и повышению температуры свыше 10^4 С°. При малой длине разрядного промежутка искровой разряд вызывает специфическое разрушение анода, называемое *эрозией*. Это явление было использовано в электроискровом методе резки, сверления и других видах точной обработки металла.

Коронный разряд возникает при нормальном давлении в газе, находящемся в сильно неоднородном электрическом поле (например, около остриев или проводов линий высокого напряжения). При коронном разряде ионизация газа и его свечение происходят лишь вблизи электродов. В случае коронирования катода (отрицательная корона) электроны, вызывающие ударную ионизацию молекул газа, выбиваются из катода при его бомбардировке положительными ионами. Если коронирует анод (положительная корона), то рождение электронов происходит вследствие фотоионизации газа вблизи анода. Для линий электропередач корона - вредное явление, сопровождающееся утечкой тока и потерей электрической энергии. Для уменьшения коронирования увеличивают радиус кривизны проводников, а их поверхность делают более гладкой. При достаточно высоком напряжении между электродами коронный разряд переходит в искровой. При повышенном напряжении коронный разряд на острие приобретает вид исходящих из острия и перемежающихся во времени светлых линий. Эти линии, имеющие ряд изломов и изгибов, образуют подобие кисти, вследствие чего такой разряд называют *кистевым*.

2. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

При понижении давления увеличивается длина свободного пробега электрона, и за время между столкновениями он успевает приобрести достаточную для ионизации энергию в электрическом поле с меньшей напряженностью. Разряд осуществляется

электронно-ионной лавиной. Тлеющий разряд происходит при низкой температуре катода, отличается сравнительно малой плотностью тока на катоде и большим (порядка сотен вольт) катодным падением потенциала. Тлеющий разряд может возникать при давлениях газа вплоть до атмосферного, однако подавляющее большинство исследований тлеющего разряда проведено при давлении от сотых долей до нескольких миллиметров ртутного столба. Электроны из катода тлеющего разряда испускаются главным образом под действием ударов положительных ионов и быстрых атомов (и, частично, за счёт фотоэффекта). Явление самостоятельного разряда нашло широкое применение в технике: основным режимом работы различных тиратронов с холодным катодом, неоновых ламп, плазменных мониторов и других газоразрядных приборов является самостоятельный тлеющий разряд.

Газоразрядные приборы, преимущественно, наполняются инертными газами. Использование химически активных газов снижает срок службы электродов и стабильность характеристик разряда.

Тлеющий разряд наблюдается в газах при низких давлениях порядка нескольких десятков миллиметров ртутного столба и меньше. Если рассмотреть трубку с тлеющим разрядом, то можно увидеть, что основными частями тлеющего разряда являются *катодное темное пространство*, резко отдаленное от него *отрицательное*, или *тлеющее свечение*, которое постепенно переходит в область *фарадеева темного пространства*. Эти три области образуют катодную часть разряда, за которой следует основная светящаяся часть разряда, определяющая его оптические свойства и называемая *положительным столбом*. Основную роль в поддержании тлеющего разряда играют первые две области его катодной части. Характерной особенностью этого типа разряда является резкое падение потенциала вблизи катода, которое связано с большой концентрацией положительных ионов на границе первой и второй областей, обусловленной сравнительно малой скоростью движения ионов у катода. В катодном темном пространстве происходит сильное ускорение электронов и положительных ионов, выбивающих электроны из катода. В области тлеющего свечения электроны производят интенсивную ударную ионизацию молекул

газа и теряют свою энергию. Здесь образуются положительные ионы, необходимые для поддержания разряда. Напряженность электрического поля в этой области мала. Тлеющее свечение в основном вызывается рекомбинацией ионов и электронов. Протяженность катодного темного пространства определяется свойствами газа и материала катода. В области положительного столба концентрация электронов и ионов приблизительно одинакова и очень велика, что обуславливает большую электропроводность положительного столба и незначительное падение в нем потенциала. Свечение положительного столба определяется свечением возбужденных молекул газа. Вблизи анода вновь наблюдается сравнительно резкое изменение потенциала, связанное с процессом генерации положительных ионов. В ряде случаев положительный столб распадается на отдельные светящиеся участки - *страты*, разделенные темными промежутками. Положительный столб не играет существенной роли в поддержании тлеющего разряда, поэтому при уменьшении расстояния между электродами трубки длина положительного столба сокращается и он может исчезнуть совсем. Иначе обстоит дело с длиной катодного темного пространства, которая при сближении электродов не изменяется. Если электроды сблизятся настолько, что расстояние между ними станет меньше длины катодного темного пространства, то тлеющий разряд в газе прекратится. Опыты показывают, что при прочих равных условиях длина катодного темного пространства обратно пропорциональна давлению газа. Следовательно, при достаточно низких давлениях электроны, выбиваемые из катода положительными ионами, проходят через газ почти без столкновений с его молекулами, образуя *электронные*, или *катодные лучи*. Тлеющий разряд используется в газосветных трубках, лампах дневного света, стабилизаторах напряжения и для получения электронных и ионных пучков. Если в катоде сделать щель, то сквозь нее в пространство за катодом проходят узкие ионные пучки, часто называемые *канальными лучами*. Широко используется явление *катодного распыления*, т.е. разрушение поверхности катода под действием ударяющихся о него положительных ионов. Ультрамикроскопические осколки материала катода летят во все

стороны по прямым линиям и покрывают тонким слоем поверхность тела.

Типичная вольтамперная характеристика тлеющего разряда приведена на Рис.3.2.3.

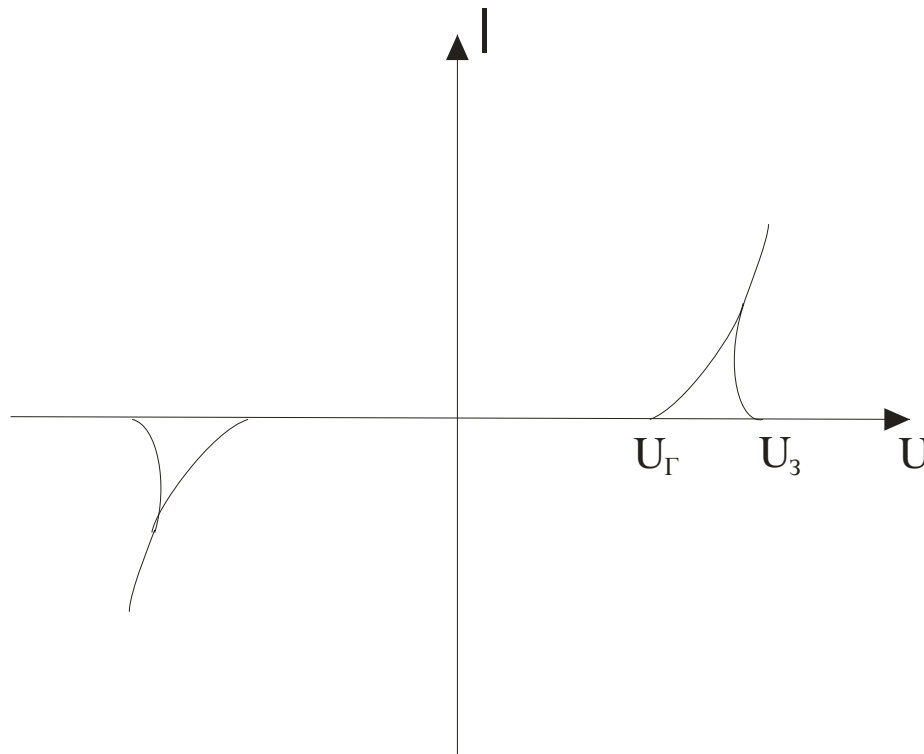


Рис.3.2.3. Вольтамперная характеристика газоразрядной неоновой лампы

Контрольные вопросы.

1. Что такое ток гашения неоновой лампы, как его измерить?
2. Какие физические процессы обуславливают наличие участка с отрицательным динамическим сопротивлением ($R_d = dU/dI$) на ВАХ газоразрядной лампы?
3. Приведите оценку времени гашения тлеющего разряда.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЗАДАНИЯ

1. Соберите схему, приведенную на Рис. 3.2.4. Если ток разряда через лампу слишком велик, она быстро изнашивается из-за эрозии электродов. Для предотвращения быстрого выхода лампы из строя используйте **$R > 5 \text{ кОм}$** .
2. Используя генератор синусоидального или пилообразного

напряжения и осциллограф со входами “X” и “Y”, получите на экране вольтамперную характеристику (ВАХ) неоновой лампы. Определите потенциал зажигания и гашения разряда для положительной и отрицательной ветвей ВАХ.

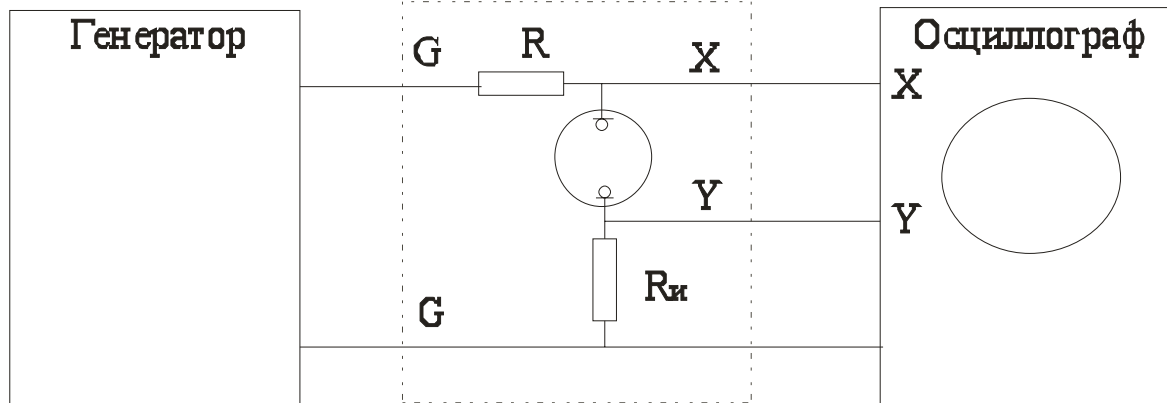


Рис.3.2.4. Схема для измерения ВАХ неоновой лампы

3. Изменяя частоту следования импульсов пронаблюдайте изменение формы ВАХ. Объясните причины этих изменений, принимая во внимание характерные времена, обусловленные наличием сопротивлений и паразитных емкостей в измерительной схеме. Подтвердите экспериментально правильность Вашего объяснения. Зарисуйте ВАХ при частотах 50 Гц, 500 Гц, 5 кГц и 50 кГц.
4. Установите постоянное напряжение на несколько вольт ниже измеренного потенциала зажигания неоновой лампы. Попытайтесь вызвать в ней самостоятельный разряд, поднося к ней наэлектризованное тело (например, пластмассовую расческу) или включая яркий источник света.
5. Измерьте минимальное значение тока через неоновую лампу, при котором самостоятельный разряд еще существует.
6. Используя приведенную на рисунке 3.2.5 принципиальную схему релаксационного генератора на неоновой лампе, рассчитайте значения U_a , R_n , R и C и соберите генератор. При разных значениях U_a , R_n , R и C измерьте основные характеристики генератора: частоту генерации, амплитуду и

длительность переднего фронта импульса, выходное сопротивление генератора. Стремясь получить наибольшую частоту генерации импульсов при выбранном значении C , учитывайте, что разряд должен иметь возможность потухнуть: $U_a/R_r < I_{\min}$. (см. п. 4 задания). Используя радиочастотный кабель при измерении временных характеристик импульса, учитывайте, что погонная емкость кабеля составляет 100 пф/м.

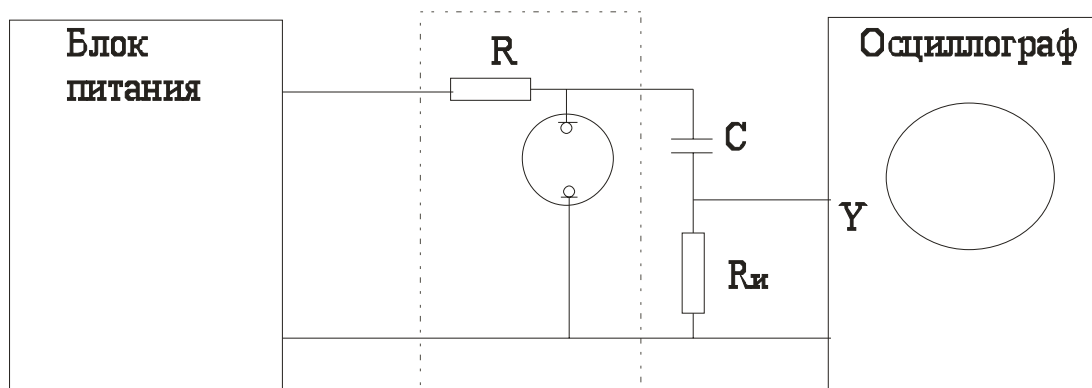


Рис. 3.2.5. Принципиальная схема релаксационного генератора на неоновой лампе.

Лабораторная работа 3.3

Влияние неупругих столкновений электронов с атомами на вольт-амперную характеристику газового промежутка

Цель работы – экспериментальное изучение явления взаимодействия электронов малой энергии с атомами газа и измерение потенциалов возбуждения и ионизации.

Протекание электрического тока в газах обуславливается движением электронов и ионов. Можно создать условия, когда основная доля тока обеспечивается движением электронов.

При этом средняя скорость потока электронов будет определяться столкновениями с атомами или молекулами газа. Атомы газа могут находиться в состояниях с различными значениями энергии – в основном состоянии, когда энергия атома минимальна (W_0), и в одном из возбужденных состояний. Энергия возбужденного состояния может принимать только дискретные значения $W_n > W_0$, определяемые структурой данного атома.

Разность

$$\Delta W_{mn} = W_m - W_n \quad (3.3.1)$$

называют энергией перехода из состояния (или энергетического уровня) номер m в состояние (на уровень) номер n . Величину

$$U_n = \frac{W_n - W_0}{e} \quad (3.3.2)$$

принято называть потенциалом возбуждения n -го уровня. При переходе на более высокий (с большей энергией) уровень атомы поглощают энергию, а на более низкий – отдают ее.

Переходы атомов на более высокий уровень могут происходить как в результате поглощения фотона (радиационные переходы), так и в результате столкновения с другими частицами (безизлучательные или релаксационные переходы). Безизлучательные переходы в возбужденное состояние могут

происходить, в частности, под действием электронного удара – столкновения движущихся свободных электронов с неподвижными атомами. При этом оказывается, что поглощение энергии электронов проходящих через газ существенно зависит от значения энергии электронов. Изучение этой зависимости является целью данной работы. Для этого используется схема на основе тиратрона заполненного инертным газом, приведенная на рисунке 3.3.1.

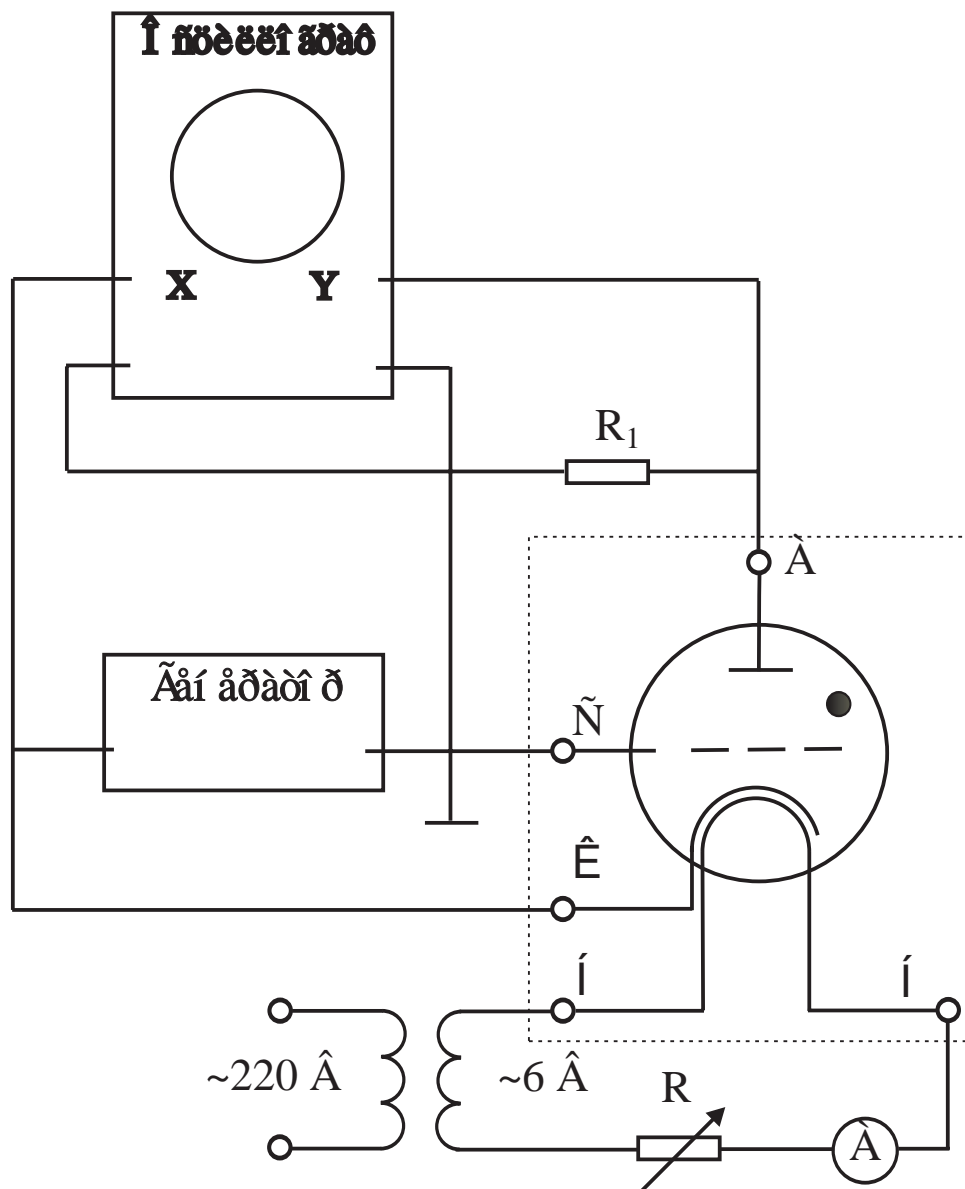


Рис.3.3.1 Схема установки для измерения потенциалов возбуждения и ионизации по вольт-амперной характеристике тиратрона.

Электроны, эмитируемые катодом тиратроном, приобретают под действием ускоряющего поля в пространстве катод – сетка кинетическую энергию $W_k = eU_{CK}$, где U_{CK} – разность потенциалов сетка – катод. Сетка и анод тиратрона находятся почти под одинаковым потенциалом (разность потенциалов между сеткой и анодом $U_{CA} = R_1 I_e \ll U_{CK}$, где I_e – ток электронов). В пространстве сетка – анод электроны испытывают многократные столкновения с атомами газа, заполняющего тиратрон.

Проследим за изменением анодного тока тиратрона по мере роста ускоряющего напряжения U_{CK} . Если энергия электронов меньше энергии возбуждения первого уровня атомов газа ($W_k < \Delta W_{10}$), происходят только упругие соударения. Так как масса электрона много меньше массы атома, электроны при этом изменяют направление скорости, сохраняя практически неизменной ее величину. Преодолев разность потенциалов U_{CA} , электроны попадают на анод.

Если энергия электрона равна энергии возбуждения какого-либо из уровней атома, удар происходит неупругий, так как часть кинетической энергии расходуется на возбуждение атома. Электроны, претерпевшие соударение, теряют всю свою энергию и не могут преодолеть задерживающий потенциал анода. На вольт-амперной характеристике это выглядит, как уменьшение анодного тока с образованием провала, как изображено на Рис.3.3.2. Аналогично, провалы будут появляться при энергии электронов равной энергиям других уровней возбуждения.

Можно наблюдать провалы при напряжениях кратных второму потенциалу возбуждения атома, или при напряжении равных сумме первого и второго потенциалов возбуждения. Однако экспериментальная методика при этом должна быть видоизменена.

При неупругом соударении электронов с атомами газа может произойти не только возбуждение, но и ионизация атома.

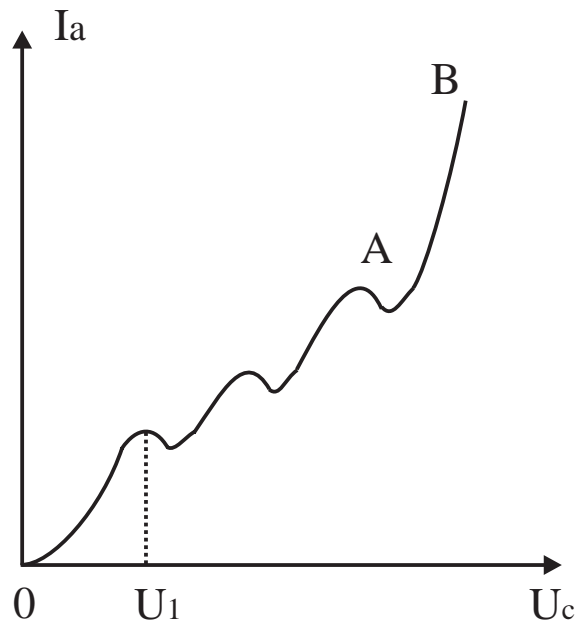


Рис.3.3.2 Вольт-амперная характеристика тиратрона.

Для реализации режима ионизации необходимо ускоряющий потенциал сетки увеличить до значения, соответствующий потенциалу ионизации атома. Тогда в процессе соударения появляются вторичные свободные электроны и положительно заряженные ионы. Двигаясь под действием поля к катоду, ионы нейтрализуют часть пространственного заряда. Вследствие этого термоэлектронный ток значительно увеличивается и происходит резкий рост анодного тока (участок АВ на рис. 3.3.2).

Таким образом, зависимость электронного тока от величины ускоряющего напряжения сетки позволяет определить потенциалы возбуждения и ионизации атомов.

Измерение потенциалов возбуждения и ионизации также можно произвести на установке, схема которой изображена на рис. 3.3.3.

Ускоряющее напряжение в пространстве сетка – катод создает выпрямитель с цифровой установкой напряжения. Анод тиратрона находится под отрицательным напряжением относительно катода. Поэтому электроны не могут попасть на анод и собираются сеткой, сеточный ток измеряется миллиамперметром.

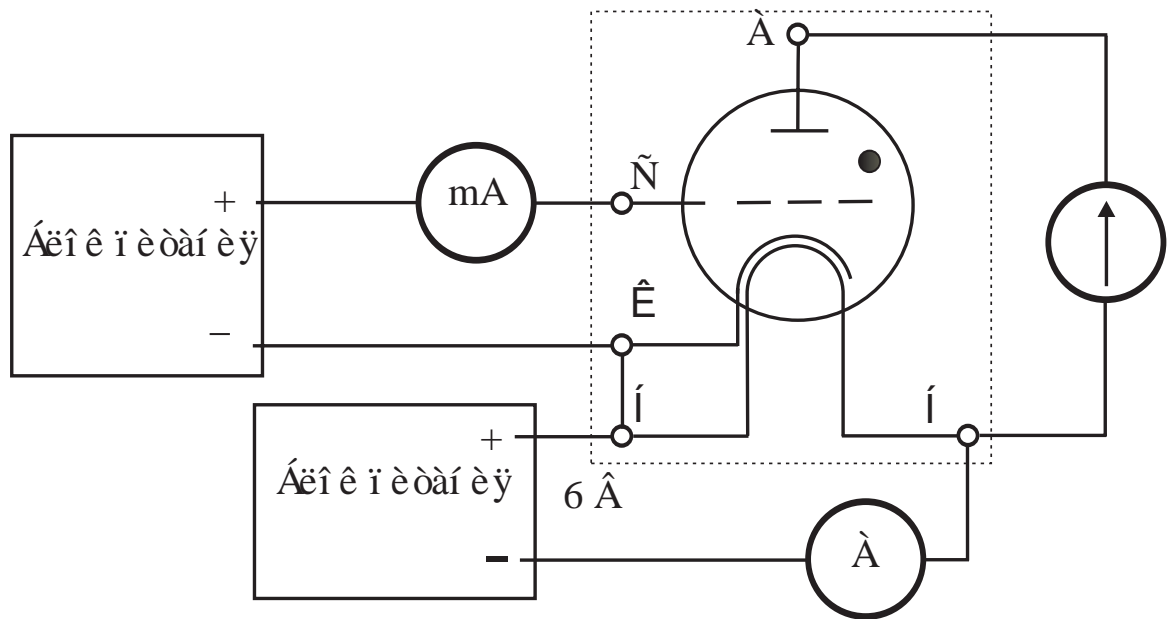


Рис.3.3.3 Схема установки для измерения потенциалов возбуждения и ионизации.

Возбужденные атомы, возвращаясь в основное состояние, излучают кванты света. Попадая на анод тиратрона, эти кванты вызывают фотоэффект, выбивая электроны. Фотоэлектронный ток анода (теперь этот электрод следовало бы называть фотокатодом) измеряется чувствительным гальванометром (предел измерения 0,1 мкА) или цифровым наноамперметром. При достижении потенциала ионизации атомов газа положительные ионы нейтрализуют пространственный заряд электронов у катода, что приводит к резкому возрастанию тока сетки. Чтобы не испортить тиратрон или миллиамперметр в цепи сетки, нужно установить на источнике ускоряющего напряжения предельный ток 30 - 40 мА. Таким образом, потенциалы возбуждения и ионизации четко фиксируются на зависимостях сеточного и анодного токов тиратрона от напряжения между сеткой и катодом (рис. 3.3.4). Погрешность их связана в основном с контактной разностью потенциалов между катодом и сеткой.

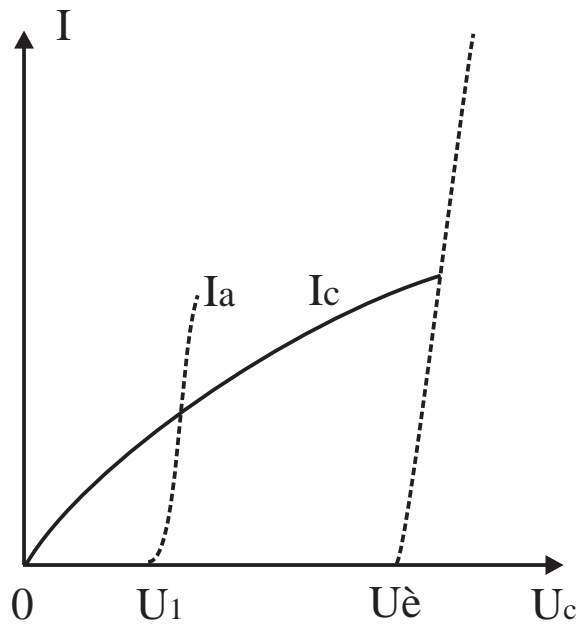


Рис. 3.3.4. Зависимость сеточного I_c и анодного I_a токов тиратрона от напряжения сетка – катод U_c .

Задания

1. Соберите схему Рис. 3.3.1. Регулировкой тока накала найдите оптимальный тепловой режим тиратрона ($I_n=0,47$ А, число провалов на вольт – амперной характеристике 2 - 3). Зарисуйте осциллограмму и измерьте потенциалы возбуждения.
2. Увеличьте ток накала на 20%. Изменяя ускоряющее напряжение, найдите режим ионизации газа и измерьте потенциал ионизации.
3. Соберите схему Рис. 3.3.3 и проведите измерения зависимости сеточного I_c и анодного I_a токов тиратрона от напряжения сетка – катод U_c . Определите потенциал ионизации
4. По полученным экспериментальным данным рассчитайте частоту и длину волны излучения возбужденных атомов, определите тип газа, заполняющего тиратрон. Укажите источник ошибок и оцените их величину.
5. Рассчитайте величину скорости “первичных” электронов.

Лабораторная работа 3.4

Электропроводность жидкостей.

Цель работы – экспериментальное изучение явления протекания электрического тока в растворах электролита.

Явления, происходящие в электролите, подробно рассмотрены в учебнике /2/. Укажем здесь лишь некоторые особенности происходящих в электролитах процессов, с которыми приходится сталкиваться при выполнении данной работы.

Протекание электрического тока в жидкостях обуславливается движением положительно и отрицательно заряженных ионов. Можно создать условия, когда основная доля тока обеспечивается движением ионов определенного сорта. Положительно заряженные ионы называются катионами, так как они в электрическом поле движутся к катоду, а отрицательно заряженные – анионами.

Погружение металла или диэлектрика в электролит сопровождается появлением в месте соприкосновения двойного электрического слоя толщиной в несколько характерных молекулярных расстояний r_m . Граница двойного слоя не резкая, а диффузная. Между жидкостью и твердым телом возникает разность потенциала. Напряженность поля внутри двойного слоя определяется контактирующими веществами и может достигать больших значений.

При продавливании электролита через капилляр или пористую перегородку некоторая часть зарядов двойного слоя на расстояниях больших $(2-3)r_m$ от поверхности твердого тела может двигаться в направлении жидкости. Приближенная теория этого явления была разработана М. Смолуховским (1903г.). В соответствии с этой теорией движение электролита вдоль капилляра под действием электрического поля и возникновение электрического поля при продавливании электролита через капилляр представляют собой взаимно обратные явления.

Под действием поля E электролит в капилляре или пористой перегородке движется со скоростью v , определяемо соотношением

$$v = \frac{Ef \varepsilon \xi}{\pi \eta} \quad (3.4.1)$$

Где η и ε - вязкость и диэлектрическая постоянная раствора соответственно, f – числовой коэффициент, зависящий от размеров, проводимости материала капилляра и от концентрации ионов, образующий двойной электрический слой, обычно $0 < f < 0,25$. А ξ - электрокинетический потенциал, то есть часть разности потенциалов двойного электрического слоя, соответствующая разности потенциала той части этого слоя, которая перемещается относительно твердого тела. Для частиц кварца в воде, например, величина ξ (0,03 – 0,06) В.

Соотношение (3.4.1) позволяет оценить и разность потенциалов, возникающую при продавливании электролита через пористую перегородку. Следует при этом учитывать что v – скорость электролита не в центральной, а в пристеночной части капилляра.

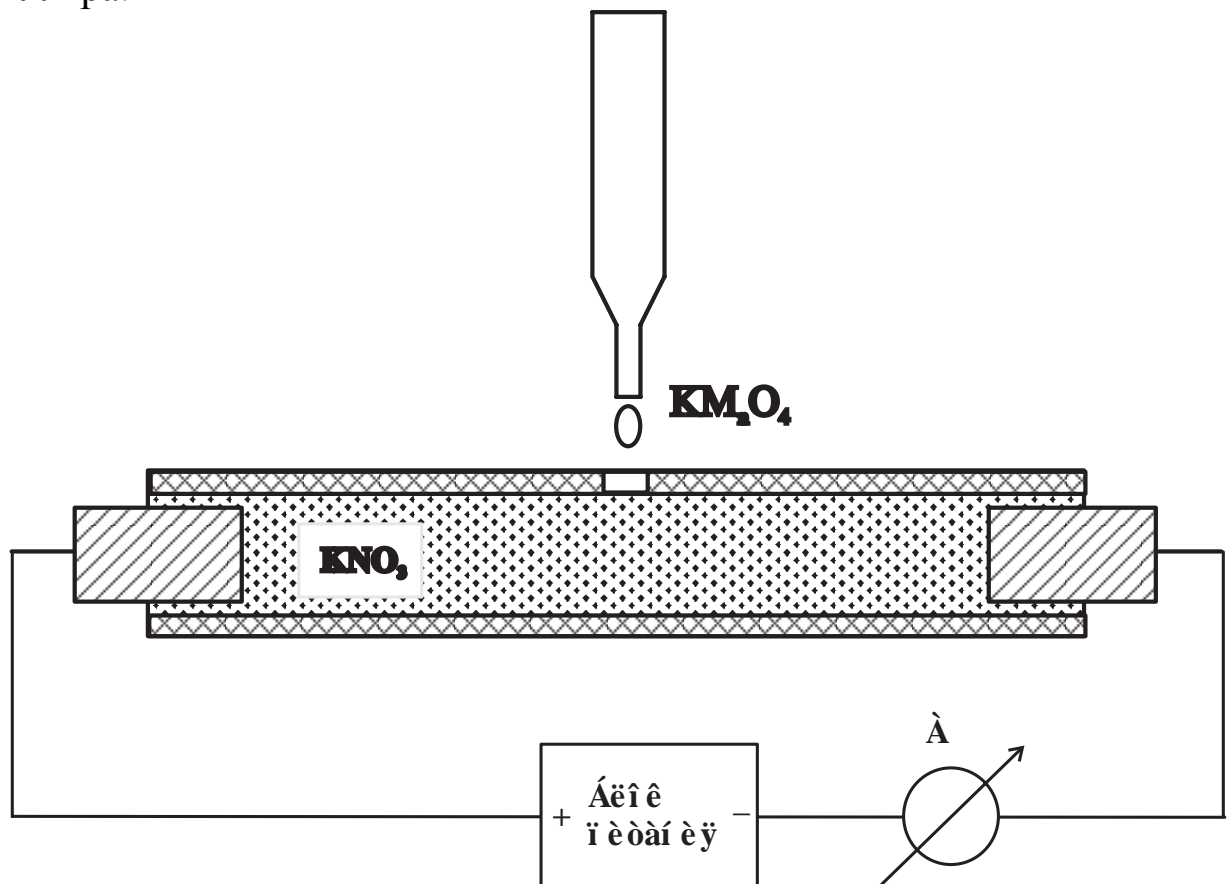


Рис. 3.4.1 Схема экспериментальной установки.

Для проведения эксперимента используется плоская камера с электродами (см. Рис. 3.4.1), которая заполняется водным раствором нитрата калия (KNO_3) малой концентрации. Вместо камеры можно использовать смоченную в этом растворе фильтровальную бумагу, аккуратно разложенную на плоском изоляторе. При подаче напряжения между двумя плоскими металлическими электродами, положенными в камеру или на бумагу возникает электрический ток. Для визуализации движения ионов используется водный раствор перманганата калия (KMnO_4) малой концентрации. Измеряя зависимость перемещения фиолетовых ионов MnO_4^- от времени можно определить их скорость u и подвижность μ , зависимость этих величин от напряженности электрического поля E , в котором движутся ионы. В измеряемые величины вносит вклад диффузия ионов MnO_4^- в растворе KNO_3 . Проводя измерения с полем и без поля можно оценить коэффициент диффузии D и учесть его вклад в величины u и μ .

Скорость движения ионов u в электрическом поле E определяется соотношением

$$u = \mu E \quad (3.4.2)$$

Подвижность ионов K^+ , Na^+ , Cl^- , NO_3^- в водных растворах имеет величину порядка $10^{-3} \text{ см}^2/(\text{Вс})$. Смещение ΔX ионов за счет диффузии за время наблюдения t определяется выражением

$$\Delta X = \sqrt{Dt} \quad (3.4.3)$$

Характерные значения D для указанных выше ионов в водных растворах порядка $10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$.

Если диффузия происходит в электрическом поле, то подвижность и коэффициент диффузии связаны соотношением

$$\frac{\mu}{D} = \frac{e}{kT} \quad (3.4.4)$$

Где e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура в градусах Кельвина.

Задания

1. Измерьте подвижность μ анионов MnO_4^- . Оцените электропроводность раствора и концентрацию анионов.
2. Изучите зависимость тока от напряжения и проверьте, как выполняется закон Ома для электролитов.
3. Наблюдая за расплыванием пятна KMnO_4 в камере при отсутствии напряжения, измерьте величину D .
4. Проверьте, с какой точностью измеренные величины удовлетворяют соотношению (3.4.4)

Указания и рекомендации

1. Используйте слабые растворы KNO_3 и KMnO_4 так как в растворах высокой концентрации изучение процессов существенно усложняется.
2. При измерении D раствор KMnO_4 наносите на фильтровальную бумагу с помощью стеклянной палочки так, чтобы нанесена была маленькая капля. Измерения следует начинать не раньше чем через минуту после нанесения капли.
3. Определяя напряженность электрического поля, в котором находятся ионы, учитывайте образование двойного электрического слоя при контакте электролита с твердым телом и связанные с этим явления.

Контрольные вопросы

1. Докажите, что ионы MnO_4^- придают водному раствору KMnO_4 фиолетовую окраску.
2. Каковы основные источники погрешностей при определении μ и D ?
3. Укажите достоинства и недостатки использования фильтровальной бумаги, смоченной водным раствором, вместо тонкого слоя этого раствора на дне камеры.

Литература:

1. Таблицы физических величин. Справочник /Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М. Наука, 1983.
3. Калашников С.Г. Электричество. изд.6 Москва. Физматлит. 2003
4. Князев Б.А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд. Новосибирск: НГУ, 2003.
5. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. Ученые записки Тартуского государственного университета. 1967, выпуск 195.