

Изучение электрического разряда в неоновой лампе: Описание к лабораторной работе/ Сост. Е.З. Грибова, И.Я. Королев – Н.Новгород: ННГУ, 2000. 12 с.

Описание предназначено для студентов радиофизического факультета, выполняющих работы в лабораториях общего практикума кафедры общей физики.

В описании рассматриваются процессы возникновения тлеющего разряда в лампе, заполненной неоном. Изучается вольтамперная характеристика такого разряда. Излагаются принципы работы генератора релаксационных колебаний на неоновой лампе и исследуются его характеристики.

Рис. 9. Библиогр. назв. 3.

Составители Е.З. Грибова, И.Я. Королев

Редактор М.И. Бакунов

Рецензент М.С. Гитлин

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2000

Введение

Электрический разряд в газе – прохождение электрического тока через газовую среду. Газы становятся электропроводными в результате их ионизации, т.е. образования ионов и свободных электронов из нейтральных атомов (молекул). Электрический разряд, который не возможен без воздействия внешних ионизаторов, называется *несамостоятельным разрядом*. Электрический разряд, продолжающийся и после прекращения действия внешнего ионизатора, называется *самостоятельным разрядом*. В данной работе исследуется самостоятельный разряд в неоновой лампе.

Неоновая лампа – простейшая разновидность широкого класса газоразрядных приборов – представляет собой стеклянный баллон, заполненный неоном при давлении порядка 10-20 мм рт. ст. В баллон запаяны два металлических электрода. В данной работе исследуется лампа типа ТН-30-2* с электродами в форме дисков, причем расстояние между электродами меньше диаметра электрода (своего рода плоский конденсатор). Внутри лампы последовательно с электродами впаян балластный резистор с сопротивлением порядка 10 кОм.

Тлеющий разряд в газе

Прохождение тока через газы носит довольно сложный характер и, его вольтамперная характеристика, вообще говоря, не описывается законом Ома. Поэтому при рассмотрении разряда мы ограничимся качественным анализом.

Неоновая лампа работает в режиме так называемого *тлеющего разряда*. Процесс развития тлеющего разряда можно представить следующим образом. Даже в отсутствие внешнего электрического поля в газе всегда имеется некоторое количество свободных носителей заряда – электронов и ионов, причиной появления которых являются, в частности, ионизация космическими лучами и соударения между атомами при их хаотическом тепловом движении. При создании электрического поля между электродами лампы электроны начинают двигаться к аноду, а положительные ионы – к катоду. Если поле слабое (энергия, набираемая электроном на длине свободного пробега, меньше энергии ионизации ато-

* Буквы и цифры означают следующее: Т – тлеющий разряд, Н – неоновая лампа, 30 – наибольшее зна-

ма), оно мало изменяет энергии электронов и ионов и не меняет их общего количества (*соударение* электрона с атомом *упругое*). В этих условиях разряд в газе может существовать лишь при воздействии внешних ионизирующих факторов (несамостоятельный разряд). При увеличении разности потенциалов между электродами до так называемого *напряжения зажигания* происходит резкое увеличение тока, сопровождающееся появлением свечения газа. Возникает самостоятельный разряд.

Причина зажигания самостоятельного разряда состоит в том, что при достаточно большой напряженности электрического поля электрон на длине свободного пробега приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтрального атома. В результате соударения электрона с атомом, которое в этом случае становится *неупругим*, возникает положительный ион и еще один, вторичный, электрон. Уже два электрона устремляются к аноду, ионизируя на пути встречные атомы. Таким образом, возникает лавина электронов,двигающихся к аноду. Но сама по себе объемная ионизация электронами еще недостаточна для поддержания самостоятельного разряда. Необходим также механизм, обеспечивающий возникновение первичных электронов в области около катода, т.е. в начале их пути к аноду. Существование такого механизма связано с формированием сложной неоднородной структуры электрического поля между электродами вследствие появления пространственного заряда.

На рис. 1–3 схематично показаны сглаженные распределения пространственного заряда, напряженности электрического поля и потенциала в межэлектродном пространстве (пунктирная кривая на рис. 3 дает распределение потенциала до появления пространственного заряда). При тлеющем разряде, происходящем в цилиндрической трубке и на постоянном токе, в разрядном пространстве выделяют четыре основных области: *катодное темное пространство*, *тлеющее* (или отрицательное) *свечение*, *фарадеево темное пространство*, *положительный столб*. Первые три области находятся вблизи катода и образуют катодную часть разряда, в которой, как видно из рис. 3, происходит резкое падение потенциала (катодное падение), связанное с большой концентрацией

чение тока в миллиамперах, 2 – конструктивный номер.

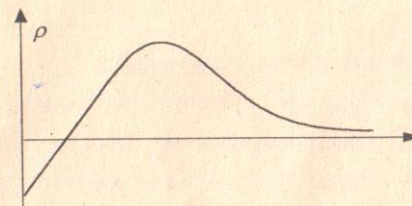


Рис. 1

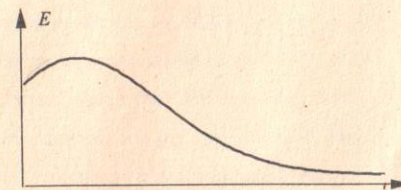


Рис. 2

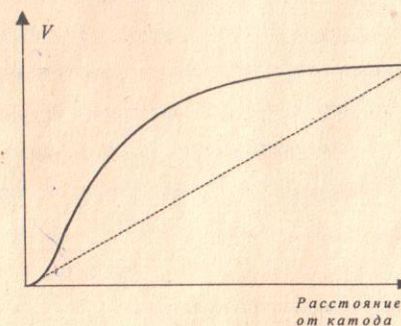


Рис. 3

положительных ионов на границе катодного темного пространства и области тлеющего свечения. Электроны, ускоренные в сильном поле катодного пространства, производят в области тлеющего свечения интенсивную ударную ионизацию (само свечение обусловлено частичной рекомбинацией ионов и электронов). Образовавшиеся положительные ионы разгоняются в поле вблизи катода. Имея большую массу, они не могут ионизовать атомы, но способны, однако, выбивать электроны из металлического катода (работа выхода электронов из металла существенно ниже энергии, необходимой для ионизации газов). Эти электроны становятся первичными для новых лавин, что и обеспечивает самостоятельность разряда. Таким образом, область катодного темного пространства наиболее важна для

поддержания разряда, т.к. созданные здесь положительные ионы обеспечивают необходимую эмиссию электронов с катода.

Для положительного столба разряда вследствие постоянной и большой концентрации электронов (большой электропроводности) характерно незначительное падение потенциала в нем. Свечение положительного столба вызвано возвращением возбужденных атомов на более низкие энергетические уровни. Длины волн излучаемого света определяются родом газа и энергией возбужде-

ния.

От чего же зависит величина разности потенциалов на электродах, при которой начинается самостоятельный разряд? Прежде всего, потенциал зажигания зависит от рода газа (энергия ионизации атома разная для газов разного сорта) и от материала катода (чем меньше работа выхода, тем легче ионам выбить электроны из катода). Потенциал зажигания зависит также от плотности газа. Чем

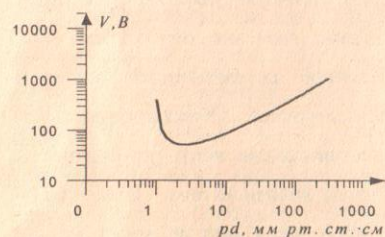


Рис. 4

сильнее разрежен газ, тем больше средняя длина свободного пробега электрона, а, следовательно, и энергия, набираемая электронами за время между двумя последовательными соударениями (при фиксированной разности потенциалов между электродами). С другой стороны, чем разреженнее газ, тем меньше число ионизуемых нейтральных атомов. Поэтому существует вполне определенная величина давления (при данном расстоянии между электродами), для которой потенциал зажигания будет минимальным. Экспериментально установлено, что потенциал зажигания V_z зависит от произведения pd , где p — давление газа, d — расстояние между плоскими электродами. Эта зависимость для неона изображена на рис. 4.

Вольтамперная характеристика неоновой лампы

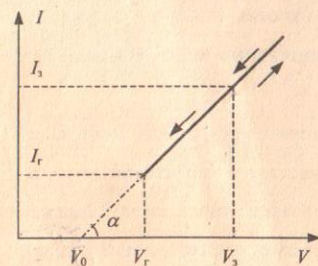


Рис. 5

На рис. 5 приведена идеализированная вольтамперная характеристика неоновой лампы (ВАХ). При малых напряжениях лампа практически не пропускает тока ("не горит"). Ток в лампе возникает только в том случае, если разность потенциалов между электродами достигнет "напряжения зажигания" V_z . При этом скачком устанавливается конечная сила тока I_r . Дальнейшее увеличение напряжения

приводит к возрастанию тока по закону, близкому к линейному. Если теперь уменьшать напряжение на горячей лампе, то при напряжении V_z лампа не погаснет, и сила тока будет продолжать уменьшаться. Лампа перестанет пропускать ток лишь при напряжении гашения V_r , которое всегда меньше V_z . Сила тока при этом скачком падает от значения I_r ($I_r < I_z$) до нуля.

У реальной лампы характеристика несколько отличается от приведенной на рис. 5. Во-первых, на ней нет идеально линейных участков, во-вторых, ветви характеристики, снятые при возрастании и убывании напряжения, обычно совпадают не полностью.

Релаксационный генератор на неоновой лампе

Тот факт, что напряжение гашения неоновой лампы меньше напряжения зажигания, позволяет получить незатухающие колебания в схеме, содержащей лампу, конденсатор и сопротивление (рис. 6). Как правило, электрические колебательные системы имеют два накопителя (емкость и индуктивность), между которыми происходит периодическая перекачка энергии. В схеме с неоновой лампой всего один накопитель энергии — конденсатор. Разряд конденсатора через сопротивление представляет собой аperiodический процесс. Однако разряд можно придать периодический характер, вновь заряжая конденсатор через постоянные промежутки времени. Колебания в этом случае являются последовательностью двух аperiodических процессов — зарядки конденсатора и его разрядки.

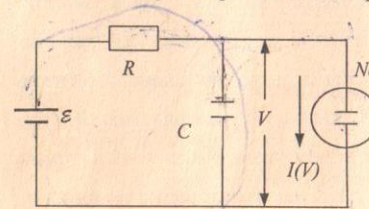


Рис. 6

Такие колебания называют релаксационными, а роль «кнопки», обеспечивающего попеременную зарядку и разрядку, играет как раз неоновая лампа.

Рассчитаем период колебаний генератора, схема которого представлена на рис. 6. Обозначая ток в лампе через $I(V)$, составим уравнение цепи:

$$C \frac{dV}{dt} + I(V) = \frac{\mathcal{E} - V}{R}. \quad (1)$$

Handwritten notes:

$$I = \frac{q}{t}$$

$$q = eN$$

$$\frac{dq}{dt} = e \frac{dN}{dt}$$

Рассмотрим вначале стационарный режим (напряжение V на конденсаторе постоянно). Сила тока при этом определяется уравнением

$$I_{ст} = \frac{\mathcal{E} - V}{R}. \quad (2)$$

Представим равенство (2) графически (см. рис. 7). При разных значениях R графики $I(V)$ представляют собой прямые, пересекающиеся в точке $V = \mathcal{E}$, $I = 0$.

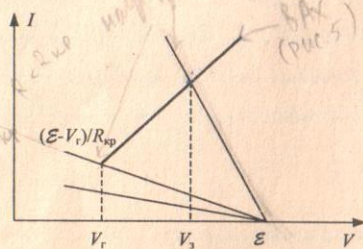


Рис. 7

Стационарный режим работы схемы определяется путем совместного решения уравнения (2) и уравнения $I = I(V)$, описывающего вольтамперную характеристику лампы. На графике решение определяется точкой пересечения вольтамперной характеристики и нагрузочной прямой (2). Из рис. 7 видно, что такая точка существует не при всех R . Случай, когда

$$R = R_{кр} = \frac{\mathcal{E} - V_r}{I_r},$$

является критическим, при дальнейшем увеличении сопротивления графики не пересекаются, и стационарный режим оказывается невозможным. Именно в этом случае ($R > R_{кр}$) в системе устанавливаются колебания.

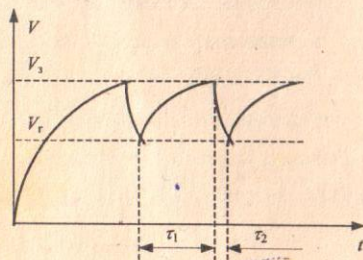


Рис. 8

Рассмотрим, как происходит колебательный процесс. Пусть вначале конденсатор не заряжен. При включении схемы он начнет заряжаться через сопротивление R , напряжение V при этом будет увеличиваться. Как только оно достигнет напряжения зажигания $V_з$, газ в лампе начнет проводить ток, причем прохождение тока через лампу сопровождается разрядкой конденсатора. Действительно, нагрузочная прямая в этом случае не пересекается с характеристикой лампы, и значит, батарея \mathcal{E} ,

включенная через сопротивление R , не может поддерживать необходимую для горения лампы величину тока. Пока лампа горит, конденсатор разряжается, и напряжение на нем падает. Когда оно достигнет напряжения гашения V_r , лампа перестанет проводить ток, и конденсатор вновь начнет заряжаться. Кривая напряжения на конденсаторе изображена на рис. 8. Очевидно, амплитуда колебаний равна $V_з - V_r$. Как ясно из предыдущего, условие возникновения колебаний имеет вид

$$R > R_{кр} = \frac{\mathcal{E} - V_r}{I_r}.$$

Вычислим период колебаний. Полное время одного колебания T состоит из времени зарядки τ_1 и времени разрядки τ_2 . Найдем сначала τ_1 . Во время зарядки конденсатора лампа не горит, ток через нее $I(V) = 0$, и уравнение (1) принимает вид

$$RC \frac{dV}{dt} = \mathcal{E} - V. \quad (3)$$

Будем отсчитывать время от момента гашения лампы. Это дает начальное условие

$$V(t=0) = V_r,$$

и уравнение (3) имеет решение

$$V(t) = \mathcal{E} - (\mathcal{E} - V_r) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (4)$$

В момент зажигания лампы $t = \tau_1$ напряжение $V = V_з$. Подставляя это условие в (4):

$$V_з = \mathcal{E} - (\mathcal{E} - V_r) \exp\left(-\frac{\tau_1}{RC}\right),$$

получаем время зарядки

$$\tau_1 = RC \ln \frac{\mathcal{E} - V_r}{\mathcal{E} - V_з}. \quad (5)$$

Найдем теперь время разрядки τ_2 . Для этого представим идеализированную вольтамперную характеристику лампы в виде

$$I(V) = \frac{V - V_0}{R_0}.$$

При этом уравнение (1) примет вид

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{V - V_0}{R_0} = \frac{\mathcal{E} - V}{R}. \quad (6)$$

С учетом нового обозначения

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_0}$$

перепишем уравнение (6):

$$\rho C \frac{dV}{dt} + V = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{V_0}{R_0} \right).$$

При решении этого уравнения удобно сместить начало отсчета времени к моменту максимальной зарядки конденсатора, т.е. полагать, что при $t = 0$ напряжение $V = V_3$. При таком начальном условии напряжение на конденсаторе убывает по закону

$$V(t) = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{V_0}{R_0} \right) + \left[V_3 - \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{V_0}{R_0} \right) \right] \exp \left(-\frac{t}{\rho C} \right).$$

За время $t = \tau_2$ напряжение упадет до V_r :

$$V_r = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{V_0}{R_0} \right) + \left[V_3 - \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{V_0}{R_0} \right) \right] \exp \left(-\frac{\tau_2}{\rho C} \right),$$

что дает время разрядки

$$\tau_2 = \rho C \ln \frac{(V_3 - V_0)R + (V_r - \mathcal{E})R_0}{(V_r - V_0)R + (V_3 - \mathcal{E})R_0}. \quad (7)$$

Период колебаний

$$T = \tau_1 + \tau_2,$$

где τ_1 и τ_2 определяются равенствами (5), (7).

Таким образом, мы определили условие возникновения колебаний, их амплитуду, период и форму колебаний.

Очевидно, что форма кривой тока через лампу $I(t)$ носит разрывный характер, а кривая $V(t)$ имеет в соответствующих местах разрыв производной, но сама непрерывна. Графики $I(t)$ и $V(t)$ легко построить, пользуясь приведенными выше соотношениями.

ЗАДАНИЕ 1

1. Снимите ВАХ неоновой лампы с помощью схемы, изображенной на рис. 9.

При снятии ВАХ особое внимание обратите на возможно более точное определение V_3 и V_r .

2. Снятую ВАХ аппроксимируйте прямой линией и определите V_0 и R_0 .

При снятии характеристики следует помнить, что внутри лампы имеется резистор

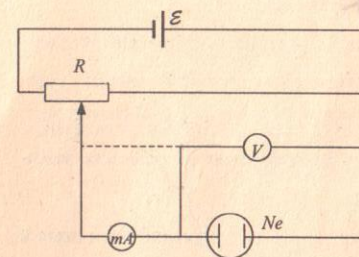


Рис. 9

10 кОм, поэтому на самом деле снимается ВАХ последовательно соединенных лампы и резистора. Этот резистор служит для ограничения тока через лампу в момент зажигания. Без него ток мог бы достичь такой величины, при которой электроды лампы разрушатся.

ЗАДАНИЕ 2

Исследуйте работу релаксационного генератора на неоновой лампе. Для этой цели служит схема, изображенная на рис. 6 (она собрана на отдельной панели).

1. Получите колебания для различных значений R , C и \mathcal{E} в схеме. С помощью секундомера измерьте время, за которое наблюдается определенное число (не менее 10) вспышек неоновой лампы, и вычислите периоды колебаний. Результаты сравните с теоретическими значениями периода колебаний при этих параметрах.

2. По полученным экспериментальным данным постройте графики $T = f_1(R)$, $T = f_2(C)$, $T = f_3(\mathcal{E})$.

3. Получите осциллограммы релаксационных колебаний для нескольких различных значений периода. С помощью соответствующих формул постройте теоретические кривые колебаний и сравните их с экспериментальными осциллограммами.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему объемной ионизации атомов электронами недостаточно для поддержания самостоятельного разряда в газе? Какой механизм обеспечивает существование самостоятельного разряда?
2. Почему напряжение гашения лампы оказывается меньше напряжения зажигания?
3. Изобразите с помощью силовых линий распределение напряженности поля в межэлектродном пространстве при наличии пространственных зарядов.
4. Почему неоновую лампу наполняют газом при пониженном давлении?
5. Как повлияет на точность измерений включение вольтметра в схеме на рис. 9 способом, показанным пунктирной линией? Сопротивление вольтметра 10 МОм, сопротивление амперметра 10 Ом.
6. Какие колебания называют релаксационными?
7. При каких условиях возможны колебания в схеме с неоновой лампой?
8. Изобразите качественно зависимость тока в лампе от времени при релаксационных колебаниях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983. С. 523-528.
2. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия. 1983. С. 761.
3. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. Гл. 3, с. 119-123; гл. 4, с. 172-191.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В НЕОНОВОЙ ЛАМПЕ

Описание к лабораторной работе

СОСТАВИТЕЛИ

Евгения Зиновьевна Грибова
Игорь Яковлевич Королев

Подписано в печать 20.10.2000. Формат 60×84 1/16.
Бумага газетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Зак. 1403. Тир. 300.

Типография Нижегородского госуниверситета.
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.