

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

Вакуумная и плазменная электроника

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ПОДОБИЯ РАЗРЯДОВ (ЗАКОН ПАШЕНА)

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

Аксенов, Александр Иванович

Проверка закона подобия разрядов (закон Пашена) = Вакуумная и плазменная электроника: методические указания к лабораторной работе для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника / А.И. Аксенов. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2013. - 15 с.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка закона подобия разрядов (закон Пашена) или зависимости потенциала зажигания самостоятельного разряда от произведения давления газа на расстояние между электродами в разрядной двухэлектродной трубке

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9); способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100.62 – Электроника и наноэлектроника по курсу «Вакуумная и плазменная электроника».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2013 г.

Вакуумная и плазменная электроника

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ПОДОБИЯ РАЗРЯДОВ (ЗАКОН ПАШЕНА)

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления 210100.62 – Электроника и нанoeлектроника

Разработчик

канд. техн. наук, доц. каф.ЭП
_____ А.И. Аксенов
_____ 2013 г

2013

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	5
2 Теоретическая часть	5
2.1 Классификация разрядов в газе	5
2.2 Развитие несамостоятельного разряда	5
2.3 Условие перехода несамостоятельного разряда в самостоятельный	8
2.4 Зависимость напряжения зажигания самостоятельного разряда от давления газа и расстояния между электродами	9
2.5 Контрольные вопросы	12
3 Экспериментальная часть	12
3.1 Задание	12
3.2 Описание схемы измерений	13
3.3 Порядок проведения работы и методические указания	14
3.4 Обработка результатов измерений	14
3.5 Содержание отчета	14
Рекомендуемая литература	14

1 Введение

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка закона подобия разрядов (закона Пашена) или зависимости потенциала зажигания самостоятельного разряда от произведения давления газа на расстояние между электродами в разрядной двухэлектродной трубке.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9); способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

2 Теоретическая часть

2.1 Классификация разрядов в газе

Прохождение электрического тока в газовой среде называется электрическим газовым разрядом. В процессах, определяющих прохождение тока в газе, участвуют электроны, положительные и отрицательные ионы, нейтральные атомы и молекулы, и кванты электромагнитного излучения.

Электрические разряды в газе подразделяют на несамостоятельные и самостоятельные.

Несамостоятельные разряды требуют для своего поддержания внешнего источника ионизации при постоянно существующем электрическом поле между электродами. Источниками ионизации могут быть: ионизирующее излучение, фотоны различных энергий, пучки заряженных частиц.

В самостоятельных разрядах появление заряженных частиц, необходимых для поддержания разряда, обусловлено наличием электрического поля между электродами и процессами, проходящими в самом приборе при протекании тока разряда.

Для определения газа напряжение зажигания самостоятельного разряда U_3 зависит не от давления P и расстояния между электродами d в отдельности, а от их произведения $U_3 = f(Pd)$. Этот закон экспериментально установлен Пашеном в 1856 г. и теоретически обоснован Таундсендом.

2.2. Развитие несамостоятельного разряда

В теории Таундсенда сделаны следующие допущения: первое – ток разряда столь мал, что можно пренебречь искажением электрического поля в разрядном промежутке объемным зарядом электронов и ионов. Тогда при плоских электродах поле будет однородным. Второе – отношение

напряженности электрического поля между электродами к давлению газа $\frac{E}{P}$ достаточно велико, т.е. электроны и ионы двигаются преимущественно вдоль направления электрического поля.

Под действием на катод излучения с поверхности катода выходит за одну секунду n_0 электронов, при этом плотность электрического тока с катода равна:

$$j_0 = en_0 \quad (2.1)$$

Каждый электрон при движении от катода к аноду на расстоянии, равном средней длине свободного пробега, приобретает энергию в электрическом поле и может ионизировать атомы газа, если эта энергия равна или больше энергии ионизации. Созданные при акте ионизации новые электроны также направляются к аноду, тоже набирают энергию и тоже ионизируют газ. Таким образом, число электронов нарастает в направлении анода, развивается электронная лавина. Механизм образования электронной лавины показан на рис. 2.1.

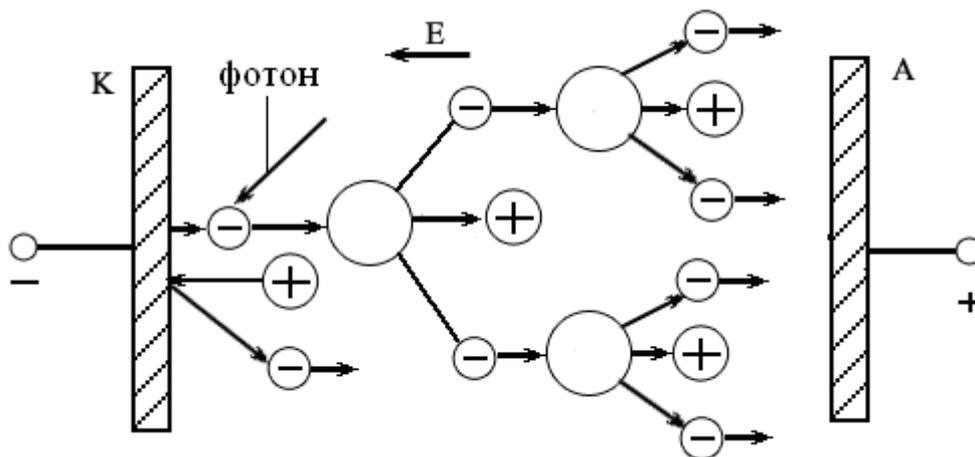


Рисунок 2.1 - Механизм образования лавины

Для характеристики ионизирующей способности электронов Таунсенд вводит коэффициент α , называемый коэффициентом объемной ионизации, который показывает, сколько ионизаций производит электрон на 1 м. пути при столкновениях с атомами газа. В случае однородного электрического поля закон нарастания электронной лавины имеет вид:

$$n = n_0 \cdot e^{\alpha \cdot x}, \quad (2.2)$$

где n - число электронов, проходящих в одну секунду через площадь в 1см^2 , параллельную электродам; α - коэффициент объемной ионизации; x - расстояние этой площадки от катода.

Тогда закон нарастания электронного тока можно записать:

$$j_e = j_0 e^{\alpha \cdot x}, \quad (2.3)$$

где j_e - плотность электронного тока на расстоянии x от катода.

Появляющиеся при ионизации газа положительные ионы движутся к катоду, образуя ионную составляющую тока j_i . Плотность полного тока в

любом сечении разрядного промежутка должна быть равна сумме плотностей электронного и ионного токов:

$$j = j_e + j_i. \quad (2.4)$$

При этом к аноду течет чисто электронный ток, величина которого согласно выражению (2.2) равна:

$$j_{ea} = j_0 e^{\alpha \cdot d}, \quad (2.5)$$

где d - расстояние между анодом и катодом. Входящая в уравнение (2.5) величина $e^{\alpha \cdot d}$ называется коэффициентом газового усиления.

Сравнение расчетов по уравнению (2.5) с экспериментальными данными показывает, что экспериментальный коэффициент газового усиления значительно больше расчетного. Тогда Таунсенд учел ионизацию молекул газа положительными ионами при их движении к катоду. Однако, оказалось, что характеризующий этот процесс коэффициент β - коэффициент объемной ионизации ионами в большинстве случаев весьма мал и учет ионизации ионами не объясняет расхождения между расчетом и экспериментом.

Тогда Таунсенд учел вторичные процессы на катоде. Положительные ионы газа, проходя на катод, вызывают вторичную электронную эмиссию с его поверхности. Так как при ионизации создается равное количество положительных ионов и новых электронов, то число ионов, созданных электронами в первой лавине во всем межэлектродном промежутке равно:

$$n_{i1} = n_0 (e^{\alpha \cdot d} - 1). \quad (2.6)$$

Попадая на катод, эти ионы выбивают из него $\gamma \cdot n_{i1}$ вторичных электронов. При этом γ - коэффициент вторичной эмиссии под действием ионной бомбардировки, показывающий отношение числа выбитых из катода электронов к числу прошедших на катод ионов. Величина коэффициента γ в условиях несамостоятельного разряда мала (порядка 0,01-0,001).

Итак, вторая электронная лавина развивается в результате выхода из катода уже не n_0 электронов, а n_{02} :

$$n_{02} = n_0 + \gamma \cdot n_0 (e^{\alpha \cdot d} - 1). \quad (2.7)$$

Аналогично рассуждая, можно получить для третьей лавины:

$$n_{03} = n_0 + \gamma \cdot n_{02} (e^{\alpha \cdot d} - 1). \quad (2.8)$$

и для k - ой лавины:

$$n_{0k} = n_0 + \gamma \cdot n_{0k-1} (e^{\alpha \cdot d} - 1). \quad (2.9)$$

Установление стационарного разряда характеризуется тем, что каждая последующая лавина воспроизводит предыдущую. Тогда можно записать:

$$n_{0k} = n_{0k-1} = n. \quad (2.10)$$

Уравнение (2.9) можно записать:

$$n = n_0 + \gamma \cdot n (e^{\alpha \cdot d} - 1). \quad (2.11)$$

Решая уравнение (2.11) относительно n получим:

$$n = \frac{n_0}{1 - \gamma (e^{\alpha \cdot d} - 1)}. \quad (2.12)$$

Тогда число электронов, достигающих анода в каждой лавине при стационарном разряде, равно:

$$n_{e0} = n_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}. \quad (2.13)$$

Переходя к плотности тока, получим уравнение газового усиления:

$$j = j_{e0} = j_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}. \quad (2.14)$$

В разряде наряду с вторичной эмиссией электронов из катода под действием ионной бомбардировки есть эмиссия электронов под действием возбужденных и быстрых нейтральных атомов. Все эти процессы характеризуются коэффициентом γ , который определяет суммарную вторичную электронную эмиссию катода, отнесенную к одному положительному иону.

2.3 Условие перехода несамостоятельного разряда в самостоятельный

Проанализируем уравнение (2.14). Когда $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \leq 1$, знаменатель представляет собой сколь угодно малую конечную величину. Тогда, при $j_0 = 0$, где j_0 - плотность фототока с катода под действием фотонов, получим $j_{ea} = 0$.

Такой разряд, который гаснет, если нет начальной эмиссии с катода, называется несамостоятельным.

Плотность разрядного тока j_{ea} при прекращении действия фотонов, т.е. при $j_0 = 0$ может иметь конечное значение, если выполняется соотношение:

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0. \quad (2.15)$$

Уравнение (2.15) – условие, при котором происходит переход несамостоятельного разряда в самостоятельный:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = \mu, \quad (2.16)$$

где μ - коэффициент ионизационного нарастания.

Тогда условие зажигания самостоятельного разряда записывается:

$$\mu = 1 \quad (2.17)$$

Разряд становится самостоятельным, если каждый вышедший из катода электрон, создает столько положительных ионов $(e^{\alpha d} - 1)$, что они, подойдя к катоду, снова вызовут эмиссию по крайней мере одного электрона.

На рис.2.2 представлена наиболее типичная характеристика разряда, которая в зависимости от различных условий (внешняя цепь, геометрия электронов и т.д.) может сильно меняться. По оси абсцисс откладывается ток разряда в логарифмическом масштабе ($\ln I$), так как на протяжении характеристики ток меняется от микроампер до ампер. В этой характеристике 1 - несамостоятельный разряд, 2 - переходная область к тлеющему разряду, 3 - нормальный тлеющий разряд, 4 - аномальный тлеющий разряд, 5 - переходная

область к дуговому разряду, 6 - дуговой разряд. В данной работе исследуются условия зажигания самостоятельного тлеющего разряда.

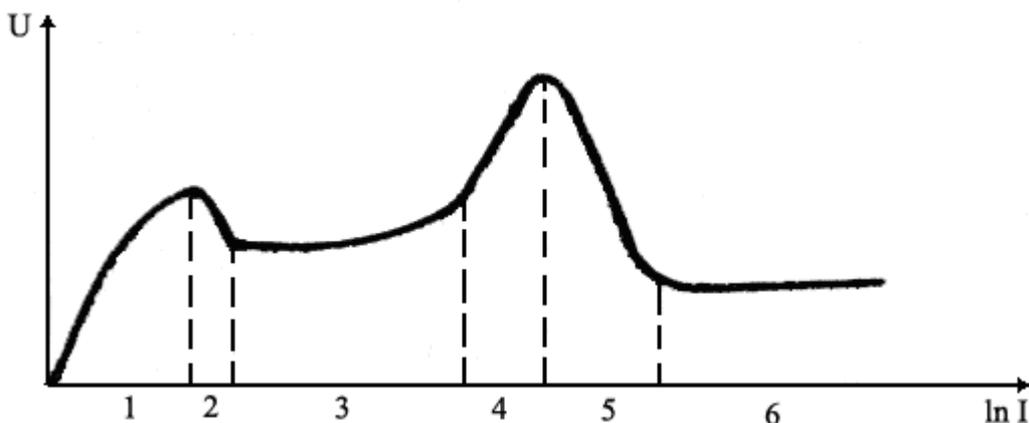


Рисунок 2.2 - Вольтамперная характеристика разряда

2.4 Зависимость напряжения зажигания самостоятельного разряда от давления газа и расстояния между электродами

Напомним, что Таунсенд в теории пренебрегает влиянием объемных зарядов электронов и ионов на распределение электрического поля между электродами. Такое пренебрежение справедливо лишь в момент зажигания разряда, так как объемные заряды при этом невелики. Однако после зажигания разряда в большинстве случаев появляются значительные объемные заряды, наличие которых необходимо учитывать при анализе различных форм разряда.

Известно, что для данного газа коэффициент объемной ионизации α должен зависеть от напряжения электрического поля E . Очевидно, он должен зависеть и от давления газа, поскольку оно определяет число столкновений электронов с атомами газа на 1 м пути. Зависимость α от напряженности электрического поля и давления газа в теории Таунсенда записывается как

$$\frac{\alpha}{P} = Q_{eo} \cdot \exp\left(-\frac{eU_i Q_{eo}}{E P}\right), \quad (2.18)$$

где Q_{eo} - эффективное сечение взаимодействия (число столкновений электрона с атомами газа на пути в 1 м при давлении 133,3 Па); U_i - потенциал ионизации газа.

Из-за грубых допущений уравнение (2.18) правильно отражает качественный характер зависимости α от E и P , оно не дает количественного совпадения с экспериментальными данными. На практике используют полуэмпирическое уравнение:

$$\frac{\alpha}{P} = A \exp\left(-\frac{B}{\frac{E}{P}}\right), \quad (2.19)$$

где A и B - постоянные, экспериментально определяемые для данного газа (приложение).

Приняв в уравнение (2.19) постоянной напряженности электрического поля E , можно найти зависимость α от давления газа (рис.2.3)

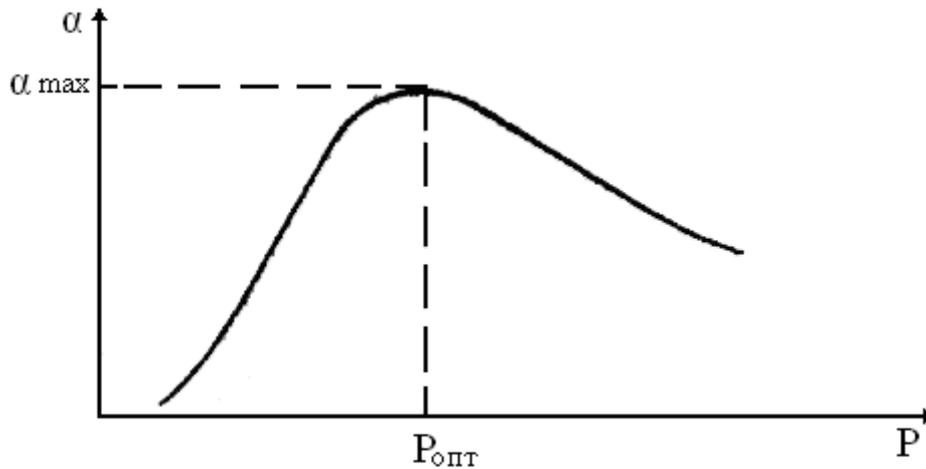


Рисунок 2.3 - Зависимость α от давления P

С ростом давления α увеличивается, достигая максимума при некотором оптимальном давлении и потом падает.

Коэффициент γ должен зависеть от энергии, с которой положительные ионы бомбардирует поверхность катода:

$$\gamma = \Psi\left(\frac{E}{P}\right). \quad (2.20)$$

Зависимость α от E и P в общем виде:

$$\alpha = P \cdot f\left(\frac{E}{P}\right). \quad (2.21)$$

Поставив уравнения (2.20 и 2.21) в уравнение (2.15), получим следующую запись условия самостоятельного разряда:

$$1 - \Psi\left(\frac{E}{P}\right) \left[\exp\left(P \cdot f \cdot d \cdot \left(\frac{E}{P}\right)\right) - 1 \right] = 0. \quad (2.22)$$

При плоских электродах распределение потенциала по длине разрядного промежутка в момент, предшествующий зажиганию разряда, линейно. Тогда E можно записать:

$$E = \frac{U_3}{d}, \quad (2.23)$$

где U_3 - напряжение зажигания самостоятельного разряда.

Тогда условие зажигания можно записать:

$$\Psi\left(\frac{U_3}{P \cdot d}\right) \left[\exp\left(P \cdot f \cdot d \cdot \left(\frac{U_3}{P \cdot d}\right)\right) - 1 \right] = 1. \quad (2.24)$$

Важнейшая особенность этого уравнения состоит в том, что давление газа P и расстояние между электродами d входят в него в виде произведений. Каждому значению произведения соответствует определенное значение U_3 , при котором развивается самостоятельный разряд.

Таким образом, напряжение зажигания самостоятельного разряда является функцией произведения давления и расстояния между электродами. Эта зависимость была установлена экспериментально Пашеном еще до появления теории Таунсенда, получила название закона Пашена. Закон Пашена выполняется для всех газов в интервале давлений $0,133 - 20 \cdot 10^3 \text{ Па}$ и для расстояний от единиц миллиметров до нескольких сантиметров.

На рис.2.4 показаны характерные кривые, соответствующие закону Пашена.

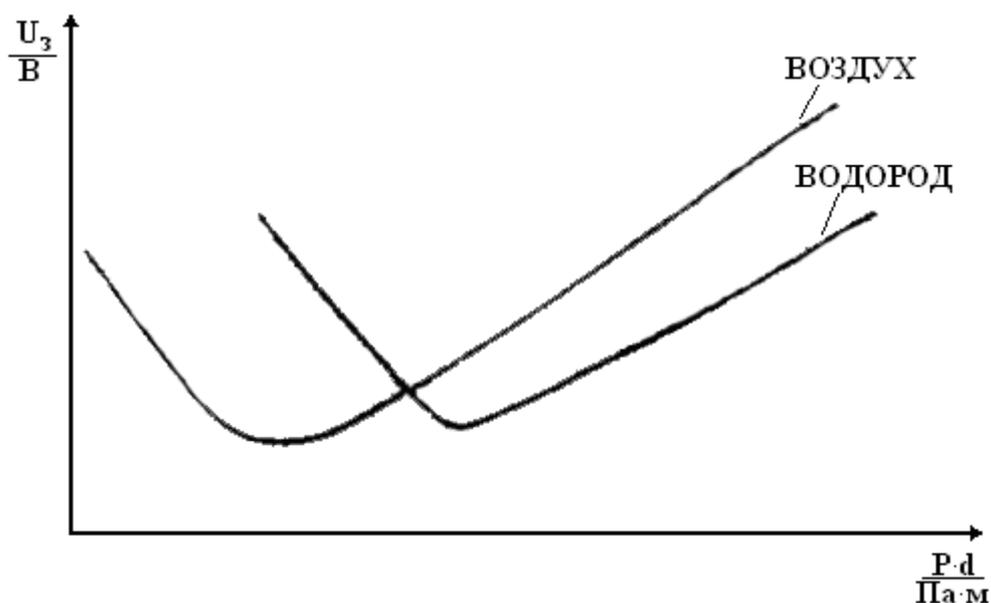


Рисунок 2.4 - Кривые Пашена

На каждой кривой имеется минимум при некотором оптимальном значении произведения Pd . Наличие минимума связано с характером зависимости α от давления газа. При увеличении давления и постоянном расстоянии между электродами происходит, с одной стороны, увеличение числа столкновений электрона с атомами газа на единице пути, что является предпосылкой увеличения α , а с другой стороны, происходит уменьшение средней длины свободного пробега $\bar{\lambda}$, на которой электрон приобретает энергию от поля. Последнее является фактором, ведущим к уменьшению α . При малых давлениях преобладает влияние первого фактора и U_3 растет с увеличением давления, а при больших давлениях преобладает влияние второго фактора и U_3 уменьшается. Если давление остается постоянным, а d увеличивается, то при малых расстояниях будет больше сказываться увеличение расстояния, на котором развивается лавина, а при больших

расстояниях – уменьшение напряженности электрического поля E , вызывающее уменьшение α .

Так как коэффициент γ зависит от материала катода, то кривые Пашена для одного и того же газа идут тем ниже, чем меньше работа выхода катода.

2.5 Контрольные вопросы

1. Какой разряд называется несамостоятельным?
2. Чем отличается самостоятельный разряд от несамостоятельного?
3. Как формулируется закон развития лавины?
4. Объясните значение трех коэффициентов Таунсенда.
5. Как коэффициент α зависит от давления?
6. Как коэффициент α зависит от напряженности электрического поля?
7. Каково условие зажигания самостоятельного разряда?
8. Объясните ход кривой Пашена при изменении давления.
9. Объясните ход кривой Пашена при изменении расстояния между электронами.
10. Объясните как кривая Пашена зависит от рода газа.
11. Объясните почему минимальное значение Pd зависит от материала катода
12. Почему коэффициент β , не учитывается в законе Пашена?

3 Экспериментальная часть

3.1. Задание

1. Разобраться в электрической и вакуумной схемах установки.
2. Изучить инструкцию по технике безопасности к данной работе.
3. Закрывать натекатель, отсоединив вакуумную систему от атмосферы.
4. Установить нулевое значение напряжения, переключить предел измерения вольтметра на 1500 В.
5. Установить между электродами одно из крайних расстояний.
6. Включить вакуумный насос (под наблюдением преподавателя).
7. Измерить вакуум в разрядной трубке.
8. Включить электрическую схему установки (под наблюдением преподавателя).
9. Снять зависимость $U_s = f(P \cdot d)$ при изменении α и при $P = const$. После каждого измерения разряд погасить, снимая напряжение между электродами.
10. Снять семейство зависимостей $U_s = f(P \cdot d)$ при изменении P при шести – восьми значениях d .

3.2 Описание схемы измерений

При изучении зависимости напряжения зажигания U_z от произведения давления газа на расстояние между электродами Pd используется источник постоянного напряжения 1,5 кВ.

При работе надо строго соблюдать руководство данного описания и общие правила техники безопасности.

Источник постоянного напряжения (рис.3.1) состоит из повышающего трансформатора $T1$, выпрямителя с удвоением напряжения на диодах $V1, V2$ и из конденсаторов $C1, C2$ сглаживающего фильтра. Автотрансформатор $T2$ позволяет регулировать величину напряжения на первой обмотке трансформатора $T1$ и, следовательно, величину высокого напряжения.

Для исследования зависимости напряжения зажигания от давления газа и расстояния между электродами используется газоразрядная трубка Λ , смонтированными в нее подвижными электродами. Откачка газа из трубки производится форвакуумным насосом $BH-1$, измерение давления осуществляется с помощью термпарного вакуумметра $BT-2$ и манометрического датчика ($ЛМ-2$). Давление регулируется в необходимых пределах с помощью натекателя. В качестве рабочего газа используется воздух или другой газ, напускаемый в трубку из отдельного баллона. В цепь разрядной трубки включен резистор $R2$, ограничивающий величину тока при разряде. Измерение напряжения зажигания U_z осуществляется вольтметром $PV1$, а индикация разрядного тока миллиамперметром $PA1$. Момент зажигания разряда следует фиксировать по максимальному отклонению стрелки вольтметра и по начальному отклонению стрелки миллиамперметра.

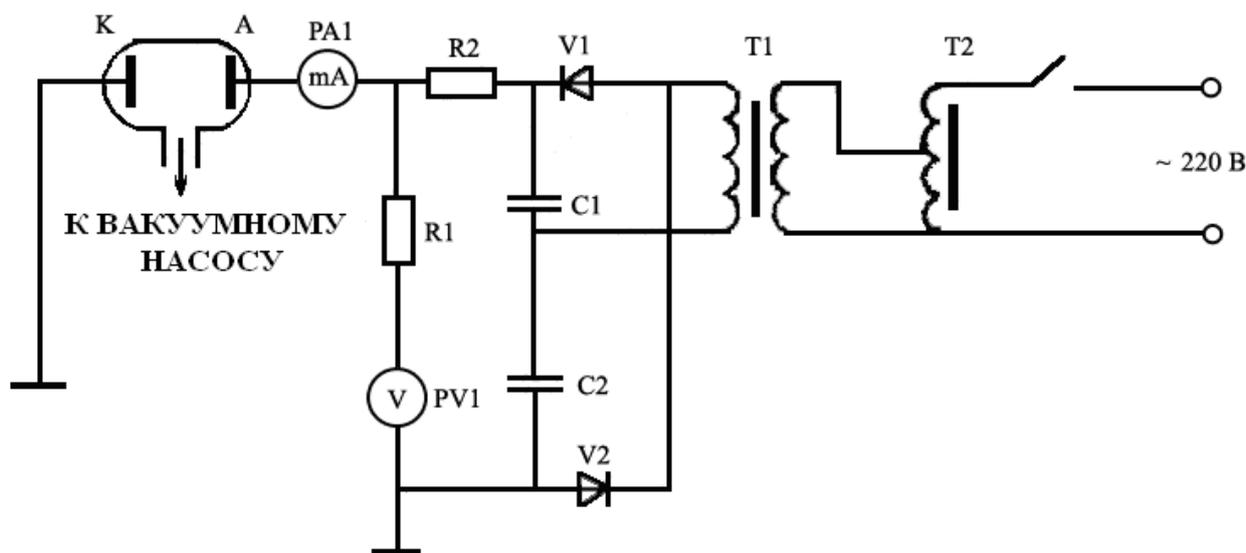


Рисунок 3.1 – Схема для измерений

3.3 Порядок проведения работы и методические указания

1. Перед началом работы преподаватель определяет подготовленность студентов к проведению работы. С заданием и теорией по этой работе студент обязан ознакомиться заранее.

2. Категорически запрещается перемещение электродов, переключения в схеме без снятия напряжения.

3. Каждый раз при снятии напряжения зажигания напряжение на электроды подавать, начиная с нулевого.

4. Включение и выключение вакуумной установки производить только под наблюдением лаборанта или преподавателя.

3.4 Обработка результатов измерений

1. Построить семейство кривых Пашена $U_z = f(P \cdot d)$ при изменении P для нескольких значений d .

2. Построить семейство кривых Пашена $U_z = f(P \cdot d)$ при изменении d для нескольких значений P .

3. Определить минимальное значение потенциала зажигания для каждой кривой.

4. Провести анализ экспериментальных результатов и написать отчет.

3.5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) введение;
- 2) схему для снятия характеристик;
- 3) семейство кривых Пашена;
- 4) выводы (ПК-9, ПК-20);
- 5) список используемой литературы.

Рекомендуемая литература

1. Капцов Н.А. Электроника. – М.: Госиздат. техн.-теор.лит., 1956. – 467 с.

2. Гапонов В.Н. Электроника. Ч.1. – М.: Физматгиз, 1960.- 603 с.

3. Сливков И.Н., Михайлов В.И. и др. Электрический пробой и разряд в вакууме. – М.: Атомиздат, 1966. – 420 с.

4. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1979.-448 с.

Учебное пособие

Аксенов А.И.

Проверка закона подобия разрядов (закон Пашена)

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника»

Усл. печ. л. _____. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40