

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского»

В.Н.Мануилов, В.Г.Павельев

Исследование биполярных процессов переноса тока в тлеющем разряде

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки 010800 «Радиофизика»

Нижний Новгород, 2007

УДК 621.380
ББК 3 85
М23

М23. Мануилов В.Н., Павельев В.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТОКА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ: Учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета, 2007. - 18 с.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, снс ИПФ РАН М.Ю.Глявин

В настоящем пособии изложены методические указания по выполнению лабораторной работы общего радиотехнического практикума по курсу физической электроники. В описании рассмотрены особенности генерации носителей тока в тлеющем разряде, условия зажигания разряда и методика измерения его вольт-амперной характеристики, включая области как нормального, так и аномального разряда.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов старших курсов естественнонаучных и технических высших учебных заведений, начинающих изучать физическую электронику.

Введение

Электрические разряды в газах можно классифицировать по различным признакам. По непосредственному зрительному впечатлению отличают тлеющий, свечение которого вполне заметно; и ярко светящиеся искровой и дуговой разряды. В названии разряда часто находят отражение и форма светящейся его части (кистевой, коронный разряды). Исходя из условия существования разрядов, их делят на несамостоятельные, длительно существующие только при условии образования в них заряженных частиц за счет внешних воздействий, и самостоятельные, в которых электроны и ионы, необходимые для поддержания разряда, производятся им самим в объеме газа и на электродах, и участие внешнего ионизатора не требуется. С точки зрения протекания разряда во времени различают установившиеся и неустановившиеся разряды.

Из различных типов разрядов в технических газоразрядных приборах чаще всего приходится встречаться с тлеющими и дуговыми разрядами. Тлеющий разряд, некоторые свойства которого изучаются в нашей работе, принадлежит к числу самостоятельных разрядов, т.е. разрядов, не гаснущих после прекращения действия постороннего ионизатора и практически не нуждающихся в действии постороннего ионизатора для своего зажигания.

Несмотря на то, что тлеющий разряд был открыт вскоре после появления первых источников высокого напряжения – электрических машин, т.е. более 150 лет назад, до последнего времени существовало мало надежных сведений о его свойствах, и дело, по существу, ограничивалось наблюдениями его внешнего вида. Даже теперь многие стороны тлеющего разряда исследованы только качественно. Это обстоятельство связано со сложностью строения тлеющего разряда, в котором существуют отдельные области с резко различными электрическими условиями (градиент электрического поля, пространственный заряд и т.д.) и сильно отличающиеся в отношении элементарных актов ионизации, возбуждения и излучения. В настоящей работе изучаются некоторые свойства тлеющего разряда.

1. Возникновение пробоя и установление тлеющего разряда

Как известно из курса общей физики, при достаточно большом напряжении, наложенном на разрядный промежуток (в простейшем случае на параллельные пластины), кроме ионов и электронов, производимых действием постороннего ионизатора, будут появляться ионы и электроны, производимые действием самого разряда. Во-первых, электроны, двигаясь к аноду, будут производить объемную ионизацию газа. Это явление принято характеризовать коэффициентом α - числом ионизаций, производимых

одним электроном на пути в 1 см, отсчитанном в направлении поля. Во-вторых, возможно, что плюс-ионы, двигаясь к катоду, будут производить в объеме газа такое же действие, которое характеризуется коэффициентом β -числом ионизаций, производимых положительным ионом на пути в 1 см. В-третьих, разряд, действуя на катод, заставляет его эмитировать электроны. Это действие называется поверхностной ионизацией, которая вызывается несколькими причинами. Во-первых, излучение самого разряда, попадающее на катод, вызывает фотоэлектронную эмиссию. Во-вторых, бомбардирующие катод положительные ионы вызывают ионно-электронную эмиссию. Наконец, в некоторых случаях приходится считаться с эмиссией электронов из катода за счет энергии возбужденных атомов, остающихся длительное время в состоянии возбуждения (так называемых метастабильных атомах) и попадающих на катод. Все процессы, служащие причиной поверхностной ионизации, получили общее название γ -процессов. Они характеризуются коэффициентом γ – числом электронов, освобожденных в результате всех γ -процессов, в расчете на плюс-ион, попавший на катод.

Выведем формулу для стационарного тока, текущего через разрядный промежуток в следующих предположениях:

- а) Действие постороннего ионизатора будем считать локализованным на катоде, причем, за счет действия ионизатора катод даст n_0 электронов с 1 см^2 в 1 секунду. В дальнейшем мы увидим, что для возникновения тлеющего разряда это предположение о характере посторонней ионизации несущественно.
- б) Будем считать электрическое поле однородным.
- в) Будем считать, что $\beta=0$, т.е. что объемная ионизация плюс-ионами отсутствует. В настоящее время твердо установлено, что этот фактор почти всегда играет ничтожную роль.
- г) задача одномерная, т.е. зависимостью всех физических величин от поперечных координат y, z можно пренебречь.

Введем следующие обозначения:

n_e - число электронов в единице объема; v_e - скорость электронов в направлении электрического поля; n_e и v_e являются функциями x .

Из условия стационарности тока $\text{div } j = dj/dx = 0$ следует, что плотность тока $j = \text{const}$ и от x не зависит. Так как, вообще говоря, ток имеет ионную j_i и электронную j_e составляющие, то

$$j = j_e + j_i. \quad (1)$$

где j_e и j_i зависят от x . Составим уравнение баланса электронов в слое dx , относя уравнение к единице поперечного сечения. Оно будет иметь вид:

$$n_e v_e - [n_e v_e + \frac{d(n_e v_e)}{dx} dx] + \alpha(n_e v_e) dx = 0. \quad (2)$$

здесь первый член – число электронов, входящих в слой слева. Второй член – число электронов, выходящих из него справа. Третий член – число электронов, появляющихся вследствие ионизации внутри слоя. Решение уравнения (2) будет:

$$(n_e v_e) = C \cdot e^{\int_0^x \alpha dx}, \quad (3)$$

где C – постоянная интегрирования. Плотность электронного тока, очевидно, будет (e_0 – заряд электрона):

$$j_e = e_0 n_e v_e = e_0 C \cdot \exp \left\{ \int_0^x \alpha dx \right\}. \quad (4)$$

На катоде ($x=0$) имеем:

$$j_e = j_0 + \gamma(j_i)_{x=0}, \quad (5)$$

где j_0 – плотность тока стороннего ионизатора. Из условия (1), справедливого повсюду:

$$(j_i)_{x=0} = j - (j_e)_{x=0};$$

Из последних двух соотношений

$$(j_e)_{x=0} = \frac{j_0 + \gamma \cdot j}{1 + \gamma}. \quad (6)$$

Подставляя (4) в (6) и принимая во внимание, что на катоде $x=0$, получим для

$$C = \frac{1}{e_0} \cdot \frac{j_0 + \gamma \cdot j}{1 + \gamma} \quad (7)$$

На аноде $x=L$ и

$$\int_0^L \alpha dx = \alpha L,$$

т.к. поле однородно. Поскольку полный ток равен электронному току на аноде, то из (4) и (7) получим:

$$(j_e)_{x=L} = j = e_0 C e^{\alpha L} = \frac{j_0 + \gamma \cdot j}{1 + \gamma} \cdot e^{\alpha L}$$

Отсюда

$$j = j_0 \cdot \frac{e^{\alpha L}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha L} - 1)}. \quad (8)$$

Пределы применимости формулы (8), как следует из вывода, довольно ограничены как из-за геометрии электродов, так и из-за влияния пространственного заряда при больших токах. Формула (8) даёт выражение для стационарного тока, который оказывается пропорциональным току постороннего ионизатора.

Режим, к которому относится формула (8), представляет собой несамостоятельный разряд. Такой режим имеет место в фотоэлементах с газовым усилением. Формула для силы тока в зависимости от j_0 хорошо подтверждается на опыте. Коэффициенты α , γ являются функциями градиента потенциала, причем, очевидно, характер этой зависимости таков, что при увеличении напряженности знаменатель в формуле (8) уменьшается в полном соответствии с тем экспериментальным фактом, что при

увеличении разности потенциалов между электродами сила тока несамостоятельного разряда увеличивается. При условии

$$1 - \gamma(e^{\alpha L} - 1) = 0 \quad (9)$$

формула (8) дает $j = \infty$, т.е. условие (9) является условием неограниченного роста тока, каким бы не был внешний ионизатор. Сила тока перестает быть зависимой от силы ионизатора и возрастает настолько, насколько позволяют условия внешней цепи, т.е. внешнее сопротивление и мощность источника питания. Это обстоятельство приводит к заключению, что условие перехода от несамостоятельного разряда к самостоятельному, можно отметить по резкому возрастанию тока и по появлению, или лучше сказать, по резкому усилению свечения. Опыт показывает, что условие (9) правильно предсказывает зажигание самостоятельного разряда. Следует отметить, что в условие (9) не входит j_0 - величина, характеризующая действие постороннего ионизатора. Это значит, что при условии выполнения равенства (9) даже одна единственная ионизация, производимая извне, разовьется, как обычно говорят, в лавину ионов и электронов, и, в конце концов, наступит пробой газов. Однако утверждение того, что напряжение зажигания разряда (напряжение пробоя) совершенно не зависит от действия ионизатора, было бы ошибочным. Под действием сильного ионизатора в отдельных местах разрядного промежутка происходит накопление пространственных зарядов – напряженность поля здесь увеличивается, и условия для пробоя наступают при меньшем напряжении на электродах. Пробой нарушает стационарность. Возникает вопрос: какой вид будет иметь разряд, когда он вновь стабилизируется? Это зависит от ряда обстоятельств, в частности и от условий во внешней цепи. Так, например, если во внешнюю цепь включено большое сопротивление, ограничивающее рост тока, то большого искажения однородности поля пространственными зарядами не произойдет. Разряд будет самостоятельным при слабом токе и поле близком к однородному. Но если внешняя цепь не вносит ограничений в процесс развития разряда, то очень быстро появляются пространственные заряды ионов и, в итоге, разряд стабилизируется в виде тлеющего разряда. Для обоих этих видов разряда характерно сложное распределение потенциала и зарядов обоих знаков в разрядном промежутке. Каждый электрон, вышедший из катода, на своем пути до анода создает $(e^{\alpha L} - 1)$ электронов и такое же число ионов, попадающих, в конечном счете, на катод. Значит, если выделить группу из n_1 электронов, вышедших из катода, то следствием прохождения их через разряд будет попадание на катод $n_1(e^{\alpha L} - 1)$ ионов, которые в свою очередь извлекут из катода $n_2 = \gamma n_1(e^{\alpha L} - 1)$ электронов. Ясно,

что если $n_2 < n_1$, то разряд затухнет, а если $n_2 > n_1$, то ток растет, и разряд продолжает развиваться. Таким образом, условие $n_2 = n_1$, то есть $\gamma(e^{\alpha L} - 1) = 1$, есть условие стационарности разряда.

2. Краткое описание основных частей тлеющего разряда

Остановимся только на некоторых основных частях тлеющего разряда. Через разрядный промежуток электроны проходят значительно быстрее ионов: их время пробега при напряжении в сотни вольт составляет 10^{-8} - 10^{-9} сек. Значит, в разрядном промежутке, как только создается условие для ионизации газа электронами, начнет накапливаться положительный пространственный заряд ионов.

Рассмотрим, как будет меняться распределение потенциала между электродами (рис.1). Прямая 1 – распределение потенциала в начале разряда. Выделим группу электронов, начинающих двигаться от катода и набирающих скорость, достаточную для ионизации вблизи анода. После их прохождения вблизи анода останутся малоподвижные плюс-ионы и кривая распределения потенциала примет вид 2. Поле вблизи катода станет больше: анод как бы переместится в положение A_2 . Вторая партия, состоящая из электронов, образованных на пути следования первой партии, и фотоэлектронов из катода, создает пространственный заряд вблизи A_2 и кривая потенциала примет вид 3. Расчет показывает, что после прохождения 3-4 электронных лавин, кривая распределения потенциала 4 стабилизируется и будет показывать резкое падение потенциала вблизи катода (**катодное падение**) вследствие образования *положительного пространственного заряда*, что произойдет очень быстро, так как время пробега электронов порядка 10^{-8} сек.

Разделение электронов на партии – искусственный прием. В действительности, конечно, изменение формы кривой потенциала происходит непрерывно. Разряд, характерной особенностью которого является большое катодное падение потенциала – **тлеющий разряд**, обычно устанавливается при небольших давлениях. Катодные части разряда занимают всего несколько миллиметров вблизи катода. Например, в неоне при давлении 1 мм Hg область катодного падения потенциала занимает 6-6,5 мм, в то время как общая длина разряда может составлять десятки сантиметров. Так как свободный пробег электрона в неоне при давлении 1 мм Hg примерно 0,6 мм, то можно считать, что *размер области катодного падения равен 10-12 свободным пробегам электрона*, на таком пути практически все электроны испытывают хотя бы одно соударение. Чем меньше давление, тем длиннее область катодного падения.

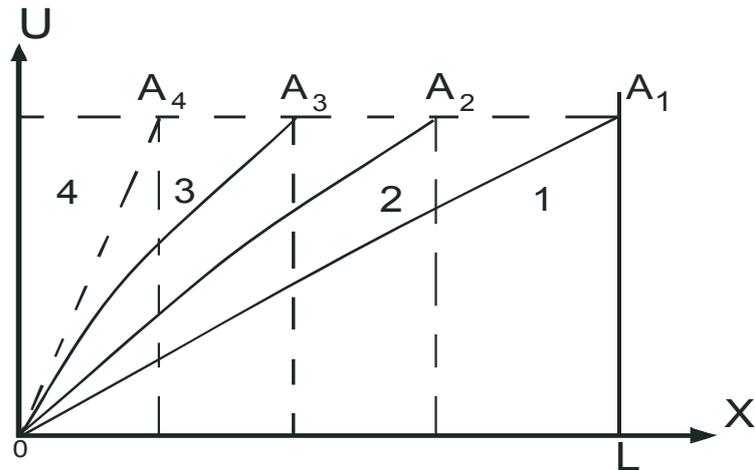


Рис.1. Установление распределения потенциала в тлеющем разряде.

Механизм поддержания разряда можно представить себе в таком виде: электроны, освобожденные из катода в результате γ – процессов, набирают сначала скорость и, пройдя некоторый путь, приобретают энергию, достаточную для ионизации и при том такую, при которой вероятность ионизации близка к максимуму (при соударении быстрыми электронами мала, а медленные электроны, энергия которых меньше энергии ионизации, совсем не могут ионизировать газ). В результате появляется область, где происходит много ионизаций, т.е. накапливается большой положительный пространственный заряд – это и есть **область катодного падения**.

Следующая область тлеющего разряда - **положительный столб** который представляет собой высокоионизированный и электрически квазинейтральный газ, называемый по предложению Ленгмюра плазмой. Большая концентрация заряженных частиц, доходящая в некоторых случаях до 10^{17} в 1см^3 , обуславливает высокую проводимость плазмы. Свечение плазмы – это свечение атомов, переходящих из возбужденного состояния в нейтральное. Большая часть заряженных частиц производится в ней самой при ионизирующих столкновениях. Только небольшая часть электронов входит в плазму из других частей разряда. Чтобы плазма могла существовать и чтобы число вновь созданных ионов равнялось числу исчезнувших (рекомбинация ионов и электронов происходит на стенках трубки, куда они уходят под действием радиального электрического поля и теплового движения), в газоразрядной плазме должен существовать продольный градиент потенциала. В стационарном состоянии оба эти процесса генерации и рекомбинации ионов вполне скомпенсированы. *В тлеющем разряде положительный столб играет роль проводника, соединяющего прикатодные части разряда с анодом, ничего не прибавляя к катодной части разряда и ничего не отнимая от нее.*

3. Снятие кривой распределения потенциала вдоль трубки с тлеющим разрядом

Наиболее важной, жизненно необходимой для существования тлеющего разряда является его ***катодная часть***. Это доказывается известным опытом с разрядной трубкой, один из электродов которой можно перемещать, меняя тем самым длину разряда. При сближении электродов, катодные части остаются без изменения, но положительный столб укорачивается и (при неизменной силе тока) уменьшается напряжение между электродами на величину, равную падению напряжения в "исчезнувшей" части столба. Разряд не нарушается при укорочении и даже полном исчезновении положительного столба, и только при аноде, введённом в область катодного падения для сохранения прежней силы тока, приходится повышать напряжение в трубке, что указывает на нарушение процессов, поддерживающих разряд.

Ионизацию производят не только первичные электроны, но и вторичные и третичные, т.е. электроны, образованные в результате последующих ионизаций. Опыт показывает, что разряд в катодной части не нуждается в существовании положительного столба, но ***без катодной части тлеющий разряд не может существовать***.

Описанным методом можно грубо воспроизвести распределение потенциала в трубке тлеющего разряда. Однако, здесь не всегда удаётся уловить все детали распределения потенциала, и совершенно невозможно воспроизвести ход падения потенциала в катодной области, хотя катодное падение потенциала и градиент потенциала в положительном столбе определяется довольно точно.

Если сила тока в тлеющем разряде невелика, то имеет место ***закон Геля***: поверхность катода, покрытая свечением и принимающая участие в разряде, пропорциональна силе разрядного тока в трубке, т.е. ***плотность тока остаётся величиной постоянной***. Вместе с этим остаётся постоянным и катодное падение потенциала, которое называется нормальным катодным падением. Сам разряд тоже называется ***нормальным***. Опыт установлено, что величина нормального катодного падения зависит от материала катода и рода газа, наполняющего разрядную трубку, но не зависит от давления газа. Катодное падение сильно меняется от состояния поверхности катода, присутствия на ней абсорбированных плёнок газа и от примесей газа в металле катода.

1. Опыт показывает, что чем меньше работа выхода катода, тем катодное падение U_k меньше.

2. Инертные газы, ионы которых имеют большую потенциальную энергию и, кроме того, метастабильные атомы с большой потенциальной энергией, дают меньшее U_k .

Опытно установлена справедливость соотношения $pd_k = \text{const}$, где p – давление газа и d_k – толщина катодной области. При этом толщина области устанавливается такой, что катодное падение довольно точно равняется нормальному напряжению зажигания разряда для данного газа и металла катода. Следовательно, d_k устанавливается так, чтобы в области катодного падения имели место оптимальные условия для ионизации. Пока плотность тока постоянна, то $d_k = \text{const}$. При полном покрытии катода свечением, т.е. с переходом в область *аномального тлеющего разряда* d_k уменьшается с увеличением плотности тока, и катодное падение растёт. Как в случае нормального, так и в случае аномального тлеющего разряда с ростом силы тока падение потенциала в положительном столбе уменьшается. Укажем одну из причин уменьшения падения потенциала в положительном столбе. Это происходит потому, что чем больше плотность тока, тем больше число соударений электронов с молекулами газа и тем большую роль имеет ступенчатая ионизация, т.е. ионизация в "два приёма" (когда первое соударение приводит атом в возбуждённое состояние, а второе – ионизирует возбуждённый атом). Ступенчатая ионизация требует меньших скоростей, чем прямая, поэтому продольный градиент потенциала в столбе с увеличением тока уменьшается. Вторая причина уменьшения градиента потенциала в столбе связана с нагреванием током газа.

4. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда

Если к электродам разрядной трубки приложено напряжение, достаточное для зажигания разряда, то в зависимости от давления газа, мощности источника напряжения и внешнего сопротивления, включенного в цепь трубки, установится тихий, тлеющий или дуговой разряд. При этом конечная форма будет развиваться из так называемого "тихого разряда", который характеризуется малой плотностью тока и незначительным пространственным зарядом. Переходные формы разряда можно стабилизировать путём введения последовательно с трубкой большого омического сопротивления.

При постепенном уменьшении этого сопротивления сила тока через трубку будет возрастать при одновременном изменении напряжения на клеммах трубки. Зависимость напряжения от силы тока в этом случае изображается кривой ABCDE (рис.2). Для удобства на оси абсцисс откладывается $\ln I$. Отрезок АВ соответствует несамостоятельному разряду, ВС – переходной стадии разряда и CDE – тлеющему разряду. Таким образом,

вольт-амперная характеристика тлеющего разряда состоит из двух ветвей, из которых одна – *падающая* – разряд с *нормальным катодным падением*, другая – *возрастающая* – разряд с *аномальным катодным падением*.

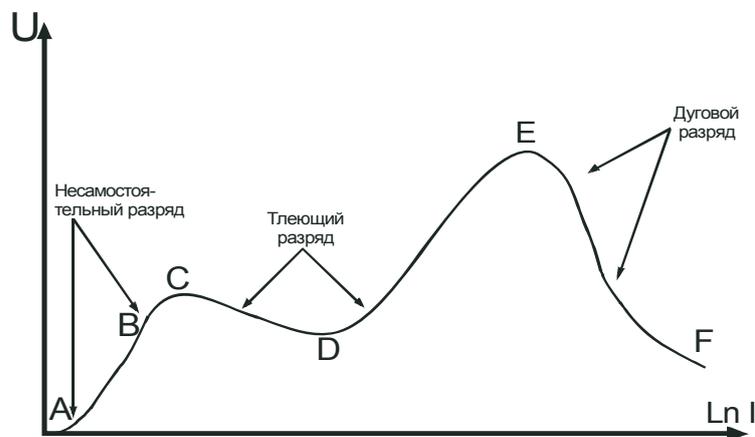


Рис.2. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда.

На участке CD разряд находится в стадии нормального тлеющего разряда. Это значит, что катодное падение должно оставаться величиной постоянной (здесь справедлив закон Геля). Но падение потенциала складывается из катодного падения и падения потенциала в положительном столбе, которое уменьшается с возрастанием тока. Следовательно, и вся разность потенциалов между электродами будет уменьшаться с увеличением силы тока. На участке DE разряд уже будет аномальным и, следовательно, катодное падение в этом случае увеличивается с увеличением силы тока и при том в большей степени, чем уменьшается градиент в положительном столбе.

Характеристика разряда, таким образом, состоит из падающего участка и возрастающего участка. При измерении на падающем участке, как мы сейчас покажем, к внешней цепи приходится предъявлять особые требования. Характеристика измеряется с помощью цепи, куда кроме разрядной трубки и измерительных приборов включены ЭДС и внешнее омическое сопротивление (рис. 3). По закону Ома

$$U = E - IR. \quad (10)$$

где U – напряжение на трубке. Уравнение (10) на плоскости координат ($U; I$) изображается прямой линией. Это так называемая линия нагрузки. Положение её изменяется только параметрами внешней цепи E , R и не зависит от характеристики разряда. Изобразим на одной плоскости координат линию нагрузки и характеристику разряда (рис.4). Пусть они

пересекаются в точках А и В. В точках пересечения выполняется условие (10).

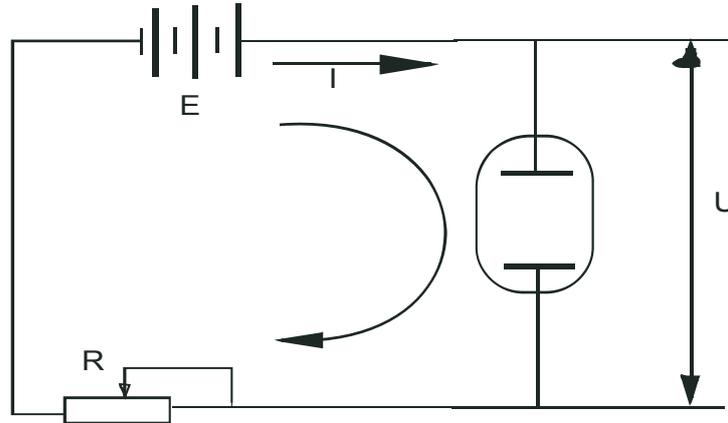


Рис.3.

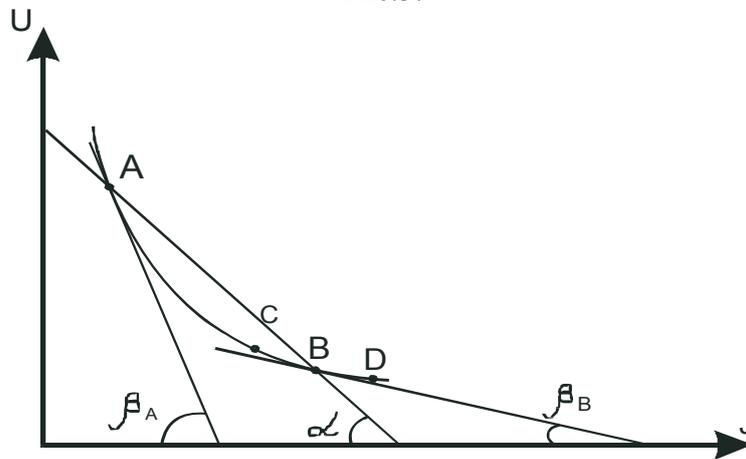


Рис.4.

Какие же значения I и U мы фактически измерим? Нетрудно видеть, что в точке В разряд *устойчив*, а в точке А – *неустойчив*. В самом деле, предположим, что ток I случайно (вследствие флуктуации) уменьшается и состояние разряда стало изображаться точкой С. Будем иметь:

$$E - (IR)_c - U_c = (\Delta U)_c > 0$$

В цепи будет действовать положительное напряжение $(\Delta U)_c$ и сила тока может возрасть, стремясь к прежнему значению. Подобным образом, при случайном увеличении тока и перехода изображающей точки в D появится напряжение $(\Delta U)_c < 0$, уменьшающее ток. Это и значит, что точка В соответствует *устойчивому* режиму разряда. Сделав аналогичное построение для точки А, легко увидеть, что отклонения в точке А не уменьшаются, а возрастают, так что случайное уменьшение тока приводит к

погашению разряда, а случайное увеличение – к переходу в точку В. Поэтому при измерении характеристики на падающем участке будет получаться только нижняя из двух точек пересечения. Условие устойчивости разряда, при наличии во внешней цепи ЭДС и сопротивления R , можно придать удобную и наглядную форму. Проведём касательную к характеристикам в точках А и В (рис.4). Наклон касательных определяется из соотношений:

$$(R_i)_A = -tg\beta_A = \left(\frac{dU}{dI} \right)_A;$$

$$(R_i)_B = -tg\beta_B = \left(\frac{dU}{dI} \right)_B$$

$R_i = \frac{dU}{dI}$ называется дифференциальным внутренним сопротивлением разряда. Оно отрицательно на падающем участке и положительно на возрастающем. Наклон нагрузочной прямой, как видно из рис.4, определяется из равенства:

$$tg\alpha = R$$

Таким образом, в точке устойчивого равновесия В соблюдается условие:

$$R_i + R = \left(\frac{dU}{dI} + R \right) > 0, \quad \text{т.к. } \alpha > \beta_B.$$

Легко видеть, что это же условие соблюдается в любой точке С восходящего участка характеристики (рис.5), на которых разряд всегда устойчив и

$$\frac{dU}{dI} = R_i > 0$$

В неустойчивой точке А имеем:

$$R_i + R = \left(\frac{dU}{dI} + R \right) < 0, \quad \text{т.к. } \alpha < \beta_A.$$

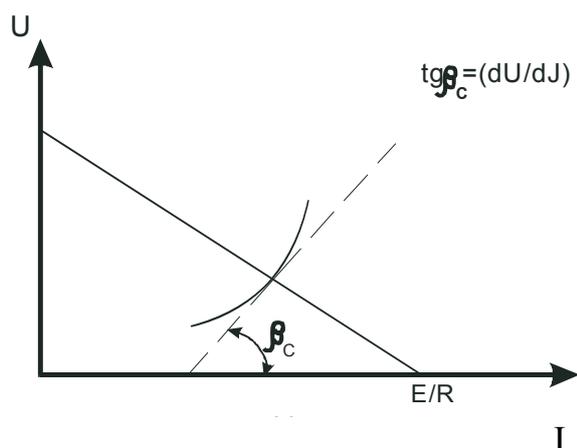


Рис.5.

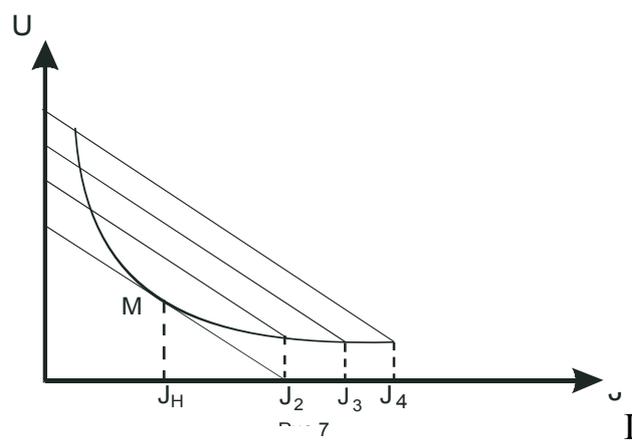


Рис.6.

В процессе измерения характеристики мы можем менять как E , так и R . В первом случае линия нагрузки смещается параллельно самой себе (рис.6) и измерению доступен участок характеристики вплоть до точки M_1 , где линия делается к ней касательной. Во втором случае (рис.7) меняется угол наклона нагрузочной прямой, и может быть измерен участок до точки M_2 , где нагрузочная прямая касается вольт-амперной характеристики. Легко понять, что взяв достаточно большое E (много больше напряжения горения разряда) и меняя в широких пределах R можно измерить всю характеристику, включая и её падающий участок. Это осуществляется в схеме опыта.

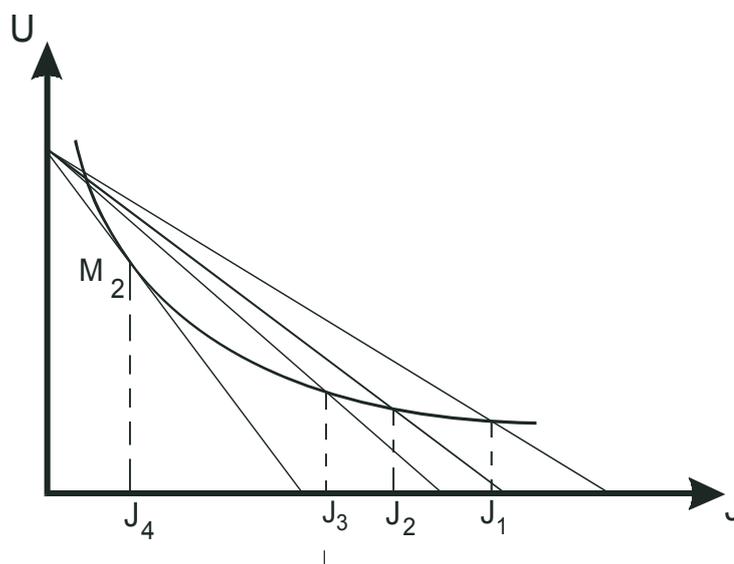


Рис.7

Литература:

1. Гапонов В. И. Электроника, Т.1, §24 (1,2,3,4,5), §28 (1,2).

Контрольные вопросы

1. Как зажигается тлеющий разряд.
2. Дать определения самостоятельного и несамостоятельного, нормального и аномального тлеющего разряда.
3. Какие заряды являются переносчиками тока в тлеющем разряде. Как и где они образуются.
4. Нарисовать зависимость потенциала зажигания тлеющего разряда от давления.
5. Как образуется область катодного падения.
6. Какие области тлеющего разряда необходимы для его поддержания.
7. Нарисовать зависимость потенциала от продольной координаты.
8. Нарисовать зависимость плотности объемного заряда от продольной координаты.
9. Нарисовать зависимость потенциала горения от длины разряда.
10. Назвать несколько способов различения нормального и аномального тлеющего разряда.
11. Объяснить вольт-амперную характеристику тлеющего разряда.
12. Как экспериментально измерять вольт-амперную характеристику тлеющего разряда.

Владимир Николаевич Мануилов
Владимир Геннадьевич Павельев

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТОКА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

Учебно-методическое пособие

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать _____, Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ.л. _____. Уч.-изд.л. _____
Заказ № _____. Тираж 200 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского государственного университета им.
Н.И.Лобачевского
603600, г.Н.Новгород, ул. Б.Покровская, 37
Лицензия ПД №18-099 от 14.05.01