

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кравцова Елизавета Валентиновна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Стример электрического пробоя при атмосферном  
давлении**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19303

**Научный руководитель:**

д. ф.-м. н. Тупикин Андрей Викторович  
Оценка научного руководителя

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума:**

к.ф.-м.н. А.А. Симонов  
Оценка преподавателя практикума

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин  
Итоговая оценка

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы являлось изучение стримера электрического пробоя. Были изучены литературные материалы о физике газового разряда и природе стримерного канала. При атмосферном давлении реализован стримерный разряд. Из полученных осциллограмм для напряжения и тока определено сопротивление стримерного канала. С помощью фотоаппарата зарегистрировано изображение области свечения стримера и определены его геометрические размеры (длина и диаметр). По полученным в опытах данным проведена оценка проводимости и концентрации электронов в разрядном промежутке. По порядку величины концентрация электронов совпадает с известными литературными данными.

Ключевые слова: электрическое поле, пробой, стример, ионизация, осциллограмма, область свечения, проводимость, концентрация зарядов.

## Оглавление

1 Введение.....	4
2 Электрический пробой в воздухе.....	5
2.1 Лавинная ионизация.....	6
2.2 Кривая Пашена.....	7
2.3 Подвижность и концентрация электронов.....	8
3 Экспериментальная часть.....	9
3.1 Схема эксперимента.....	9
3.2 Электрические измерения.....	10
3.3 Прямая съёмка.....	13
3.4 Результаты.....	14
5 Заключение.....	14
6 Список литературы.....	15

## 1. Введение

Разряд – это процесс протекания электрического тока через ионизированный газ. Также можно сказать, что разрядом является любой процесс возникновения ионизации под действием приложенного поля.

Разряды в постоянном поле можно разделить на самостоятельные и несамостоятельные. Среди стационарных самостоятельных разрядов выделяют тлеющие, дуговые и коронные. Среди быстротечных разрядов выделяют искровой, который будет фигурировать в данной курсовой работе.

Искровой разряд происходит при давлениях порядка атмосферного и высоких напряжениях. При этом пробой, являющийся процессом быстрого возрастания тока в среде, осуществляется путём быстрого прорастания плазменного канала от одного электрода к другому [1].

Примером искрового разряда является молния, происходящая либо между сильно наэлектризованными грозowymi облаками, заряженными противоположными знаками, либо между грозowym облаком и индуцированной противоположным знаком поверхности Земли. Искровой канал быстро расширяется, в нём скачкообразно повышается давление, в результате чего на его границах возникает ударная волна. Совокупность ударных волн от расширяющихся искровых каналов порождает звук, воспринимаемый как «треск» искры. Совокупность ударных волн для молний, в таком случае, известна как гром.

Область применения искрового разряда в современном мире довольно обширна. Искровая свеча зажигания используется в бензиновых двигателях внутреннего сгорания, где воспламенение топливовоздушной смеси производится электрическим разрядом напряжением в несколько тысяч или десятков тысяч вольт.

Процессу возникновения искрового канала предшествует возникновение стримера электрического пробоя, который используется для производства озона, очистки воздуха и в плазменной медицине.

Целью работы являлось изучение стримера электрического пробоя.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Реализовать стримерный разряд в воздухе при атмосферном давлении и зарегистрировать величину напряжения и силы тока на разрядном промежутке.
2. Снять область пробоя с разрешением, позволяющим определить геометрические размеры (длина, диаметр) светящейся области.
3. Определить сопротивление разрядного промежутка и оценить проводимость и концентрацию электронов в канале стримера.

### **Электрический пробой в воздухе**

В пространстве между электродами всегда существуют свободные электроны (космическое излучение, рекомбинация и прочие механизмы). Электрон разгоняется электрическим полем и, достигая определённой энергии, нужной для ионизации нейтральной частицы, ионизирует её. В результате появляется 2 медленных электрона, которые набирают энергию в поле и снова ионизируют атомы. Начинаясь с одиночных электронов, такие процессы могут развиваться по типу лавин, где число электронов «лавинообразно» возрастает. Причём все электроны дрейфуют под действием поля в направлении анода, а гораздо более тяжелые положительные ионы гораздо медленнее вытягиваются к катоду. Достигая катода, ион с некоторой вероятностью выбивает из катода новый электрон, что называется вторичной ионно-электронной эмиссией.

При достаточно большой напряженности электрического поля в воздухе, из-за экспоненциального роста количества электронов, объемный заряд лавины начинает искажать внешнее поле, после чего лавина перерождается в стример. Стримером называют квазинейтральную проводящую разветвленную плазменную структуру, растущую за счет усиления поля на оконечностях канала, который образуются вдоль следа первичной лавины. [2]

## 2.1 Лавинная ионизация

Процесс лавинной ионизации очень сложен, при его рассмотрении необходимо учитывать многие факторы, такие как: влияние энергии частиц на сечение рассеяния, потери энергии на излучение, захват электронов и пр. В работе для оценки напряженности поля, при которой может развиваться лавина, будем использовать простейшую физическую модель. Для этого воспользуемся следующими положениями:

1. Электрон и среда находятся в термическом равновесии в отсутствии поля. Следовательно, средняя тепловая скорость электрона на два порядка выше средней скорости молекул, т.е. по отношению к движению электрона их можно считать покоящимися.

Из распределения Максвелла следует, что средняя тепловая скорость частиц

равна  $v_{th} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M_i}}$  где  $k=1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана ( $v_{th} \approx 450$

м/с – для молекул и  $v_{th} \sim 10^5$  м/с – для электронов). Концентрация молекул в

воздухе  $n = \frac{P}{kT} \approx 2.4 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$  среднее расстояние между молекулами:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{1}{n}} \approx 3 \times 10^{-9} \text{ м}^{-3}.$$

2. Электрон движется по «замороженному» воздуху, упруго сталкиваясь с молекулами. Потеря энергии при упругом столкновении электрона с молекулой из решения о соударении двух тел с массами  $m \ll M$  и  $v_m \gg v_M$ :

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{4m}{M} \varepsilon(t), \quad m, v_m \text{ и } M, v_M \text{ – масса и скорость электрона и молекулы}$$

соответственно.

3. Двигаясь в электрическом поле, электрон между столкновениями набирает энергию равную  $\Delta \varepsilon_e = eE\delta f(\theta)$ , где  $e$  – заряд электрона,  $E$  – напряженность электрического поля,  $\delta$  – среднее расстояние между молекулами воздуха и  $f(\theta)=1/6$  вероятность после столкновения сохранить направление против поля (направление дрейфа).

Таким образом, скорость нарастания энергии электрона будет:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left[ eE\delta f(\theta) - \frac{4m}{M}\varepsilon(t) \right] v_e, \text{ где } v_e - \text{ частота столкновений с молекулами.}$$

Отсюда, для заданной напряженности  $E$ , найдем предельную энергию,

$$\text{набираемую электроном при дрейфе: } \varepsilon_e = \frac{eE\delta f(\theta)M}{4m}.$$

Потенциал ионизации воздуха примерно 14.5 эВ.

4. Будем считать, что как только электрон набрал энергию достаточную для ионизации молекулы, тут же происходит ионизация. Значит, в электрическом поле электрон должен набирать энергию выше потенциала ионизации, т.е. минимальной напряженности поля соответствует условие  $\varepsilon_e = 14.5$  эВ. Найдем

$$\text{напряженность поля соответствующую этому условию: } E = \frac{4m\varepsilon_e}{e\delta f(\theta)M}.$$

Для воздуха при атмосферном давлении:  $M = 29$  а. е. м. =  $29 \times 1.66 \times 10^{-27}$  кг,  $m = 9 \times 10^{-31}$  кг,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл,  $\delta \approx 3 \times 10^{-9}$  м. Отсюда  $E \approx 3$  кВ/см.

## 2.2 Кривая Пашена

Найдем напряженность электрического поля для пробоя воздуха, используя экспериментальные данные, а именно кривую Пашена. В 1889 г. немецкий физик Фридрих Пашен, исследуя разряды между параллельными плоскостями, экспериментальным путем получил зависимость значений разрядных напряжений от длины промежутка и

$$\text{давления газа: } U_{np} = \frac{A(pd)}{\ln(A(pd)) + B},$$

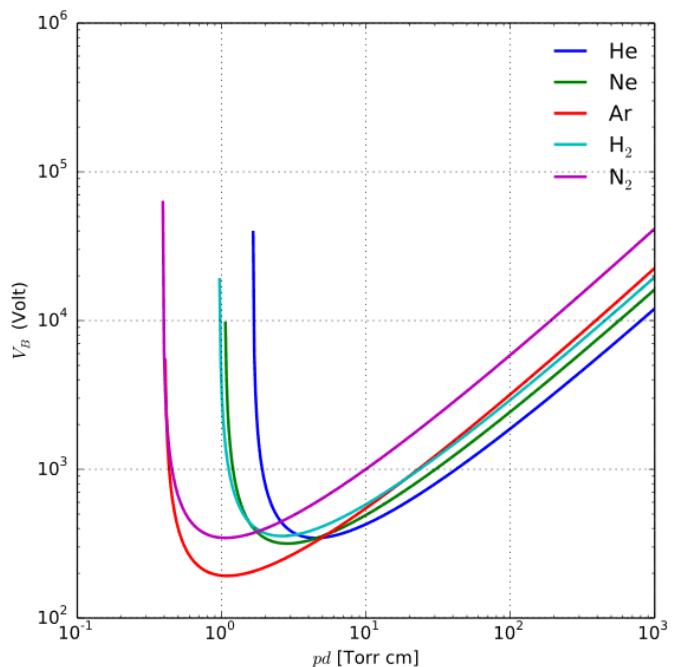


Рис. 1. Кривая Пашена для разных газов

где  $(pd)$  – произведение давления на зазор разрядного промежутка.

Для воздуха  $A = 43.6 \times 10^6$ ,  $B = 12.8$  для давления, измеряемого в атмосферах, и зазора, измеряемого в метрах. Для атмосферного давления подставляем величину зазора в 1 см, и получаем поле  $E = 34$  кВ/см.

При дифференцировании формулы Пашена по  $(pd)$  и приравнении производной к нулю, можно получить минимальное напряжение пробоя  $pd = e^{1-b}$ . При  $pd = 7.5 \times 10^6$  это 327 вольт в воздухе.

В оценке нарастания энергии электрона в лавине не учитывались многие факторы: затраты кинетической энергии при движении против электрических сил, зависимость сечения рассеяния от энергии [3], неупругие потери, образование отрицательных ионов за счет прилипания электрона, а также изменение конфигурации поля при росте концентрации носителей заряда. В следствие этого полученная величина минимальной напряжённости поля, необходимая для пробоя воздуха, оказалась ниже реального значения.

В результате приведённых выше оценок, можно сделать вывод, что для пробоя воздуха нужно создать поле с напряжённостью  $E \approx 34$  кВ/см.

### 2.3 Подвижность и концентрация электронов

Для определения сопротивления разрядного промежутка воспользуемся законом Ома в интегральной форме:  $R=U/I$ . Полагаем, что стример имеет цилиндрическую конфигурацию с диаметром  $d$  и длиной  $l$ . Тогда закон переписываем следующим образом:  $R=1/\sigma \times (4l/\pi d^2)$ , где  $\sigma$  – средняя электрическая проводимость стримера. Получаем, что средняя проводимость стримера:

$$\sigma = \frac{4Il}{\pi d^2 U} \quad (1)$$

Запишем закон Ома в дифференциальной форме:  $j = \sigma E$ . С другой стороны  $j = en_e v_e$ , где  $n_e$  – концентрация зарядов,  $v_e$  – скорость дрейфа электрона. Скорость электрона в  $E$  определяется формулой:  $v_e = \mu E$ , где  $\mu$  – подвижность электрона в воздухе. Тогда  $\sigma = en_e \mu$ .



При оценке подвижности будем считать, что напряженность реального поля близка к напряженности поля при пробое. Тогда средняя энергия электронов будет:  $mv_e^2/2 = m(\mu E_{пр})^2/2 = \varepsilon_i$ , где  $E_{пр}$  – напряженность поля при пробое,  $\varepsilon_i$  – потенциал ионизации воздуха. Таким образом, получаем оценку подвижности:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\varepsilon_i}{mE_{пр}^2}}.$$

А также плотности электронов:

$$n_e = \frac{\sigma}{e} \sqrt{\frac{mE_{пр}^2}{2\varepsilon_i}}. \quad (2)$$

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Схема эксперимента

В эксперименте использовались осциллограф, фотоаппарат и высоковольтный источник. Схема эксперимента изображена на рис. 2.

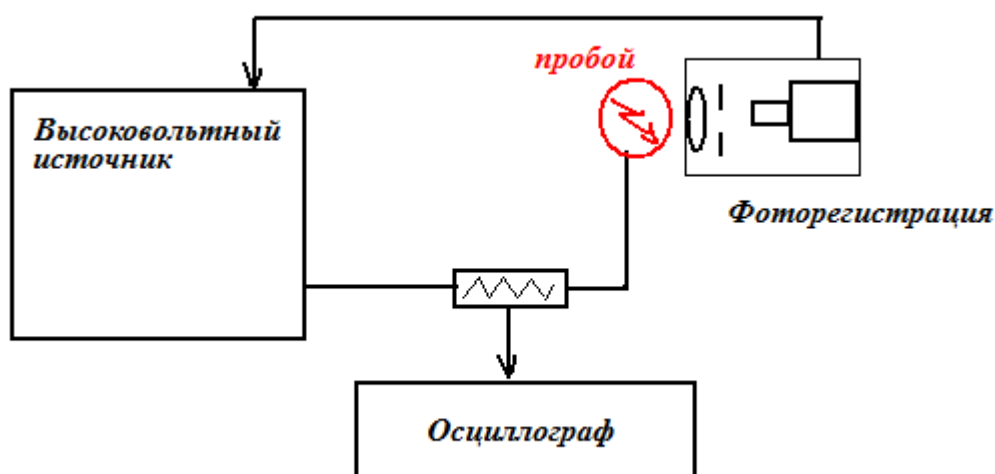


Рис. 2. Схема эксперимента

Осциллограф Tektronix TDS 2024, имеющий 4 канала. Максимальное измеряемое напряжение  $U_{\max} = 250$  В, полоса пропускания  $\nu_{\max} = 200$  МГц.

Фотоаппарат марки Nikon D5100. Устанавливалось фокусное расстояние 200 мм, диафрагма 22 мм и выдержка 1/250 с.

Для измерения напряжения на разрядном промежутке использовалась схема с делителем напряжения:  $U = U_u \frac{R + R_u}{R_u}$ . Сила тока  $I = \frac{U_i}{r_i}$ . В эксперименте сопротивления подбирались таким образом, чтобы амплитуда сигналов на осциллографе не превышала рабочий предел прибора:  $R = 14.9$  МОм,  $R_u = 810$  Ом и  $r_i = 1$  мОм. Схема источника представлена на рис. 3. Шунты изображены на рис. 4.

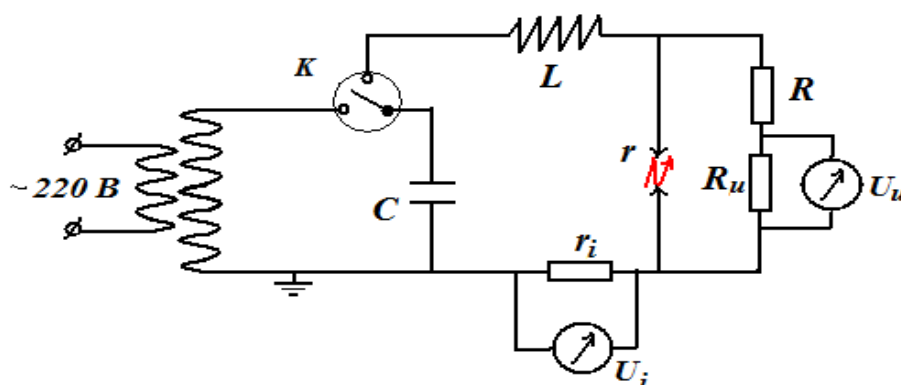


Рис. 3. Эквивалентная схема источника напряжения



Рис. 4. Шунты, подключённые к источнику

Осциллограф работал в ждущем режиме и запускался по переднему фронту сигнала.

### 3.2 Электрические измерения

В экспериментах был реализован стримерный разряд при различных зазорах между электродами:  $x_1 = 10.9$  мм и  $x_2 = 8.7$  мм.

Были получены осциллограммы для напряжения и тока, пример осциллограмм приведен на рис. 5 и 6.

По амплитудам тока и напряжения было высчитано среднее сопротивление разрядного промежутка  $r_1 = 107.8 \pm 9.8$  Ом и  $r_2 = 153.0 \pm 19.17$  Ом. Положения максимумов для напряжения и тока занесены в таблицу 1.

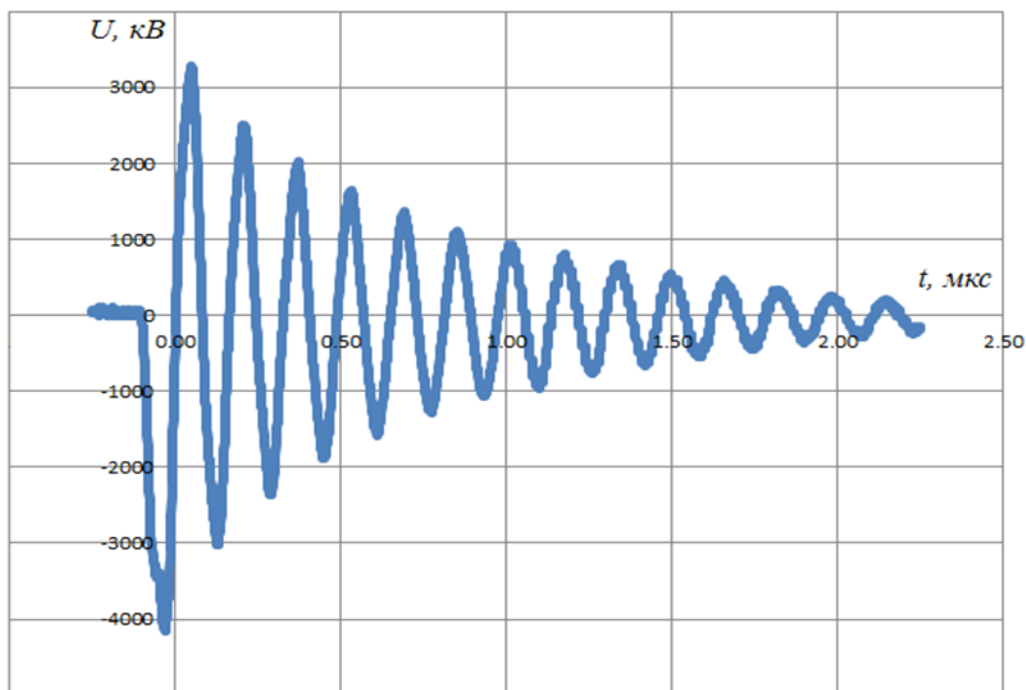


Рис. 5. Осциллограмма напряжения.

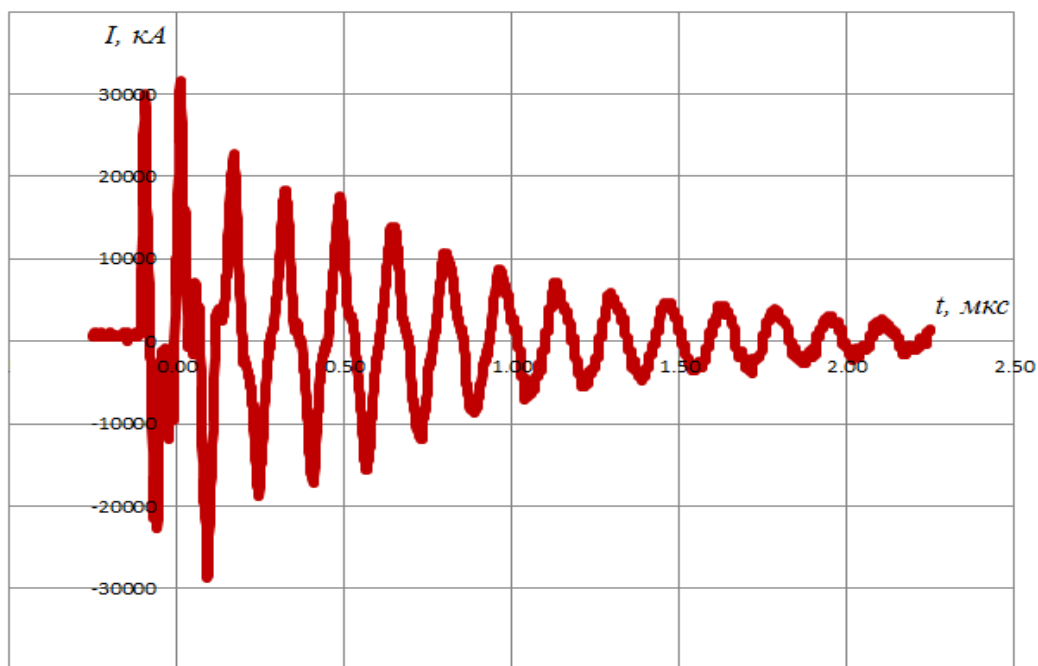


Рис. 6. Осциллограмма тока.

Таблица 1. Положения максимумов для тока и напряжения

Зазор $x_1 = 10.9$ мм				Зазор $x_2 = 8.7$ мм			
$t$ , мкс	$U$ , кВ	$I$ , кА	$r$ , Ом	$t$ , мкс	$U$ , кВ	$I$ , кА	$r$ , Ом
0.05	3274	31.6	103.6	0.05	3054	36.4	83.9
0.13	-3017	-28.0	107.8	0.12	-2723	-23.2	117.4
0.21	2502	22.8	109.7	0.2	2318	16.8	138.0
0.29	-2355	-18.5	127.3	0.28	-2281	-13.2	172.8
0.38	2024	18.4	110.0	0.37	1987	12	165.6
0.45	-1876	-17.2	109.1	0.44	-1766	-9.2	192.0
0.53	1656	17.6	94.1	0.52	1545	11.2	137.9
0.61	-1582	-15.6	101.4	0.6	-1398	-8.8	158.9
0.7	1362	14.0	97.2	0.68	1288	7.6	169.5
0.77	-1251	-12.0	104.3	0.76	-1214	-6.8	178.5
0.85	1104	10.8	102.2	0.84	993	7.2	137.9
0.93	-1067	-8.4	127.0	0.92	-957	-5.2	184.0

Из решения задачи о колебательном контуре с затуханием найдем значения несущей и декремента затухания.

По экспериментальным данным получаем, что несущая частота для обоих случаев оказалась одинаковой  $\omega = 6.25 \pm 0.2$  МГц. Декремент затухания в случае зазора  $x=10.9$  мм:  $\gamma = 1.3 \times 10^6$  1/с (определён по напряжению) и  $\gamma = 1.4 \times 10^6$  1/с (определён по току); для зазора  $x = 8.7$  мм:  $\gamma = 1.4 \times 10^6$  1/с (определён по напряжению) и  $\gamma = 1.6 \times 10^6$  1/с (определён по току). Найдём общие (согласно эквивалентной схеме) индуктивность и ёмкость контура:  $\omega_0 = 6.38$  и  $6.4$  МГц,  $L \approx 41.5$  и  $37.5$  мкГн,  $C \approx 590$  и  $650$  пФа для первого случая;  $\omega_0 = 6.4$  и  $6.45$  МГц,  $L \approx 54.6$  и  $47.8$  мкГн,  $C \approx 450$  и  $500$  пФа для второго случая.

### 3.3 Прямая съёмка

На рис. 7 приведено изображение электродов на фоне линейки для масштабирования фотоснимков. Обработка осуществлялась с помощью программы AutoCAD 2016. Оба рисунка были приведены в масштаб программы, который составил 103.0987 мм. Изображения стримерного канала для зазоров  $x_1 = 10.8$  мм и  $x_2 = 8.7$  мм приведены на рис. 8 а и б соответственно.

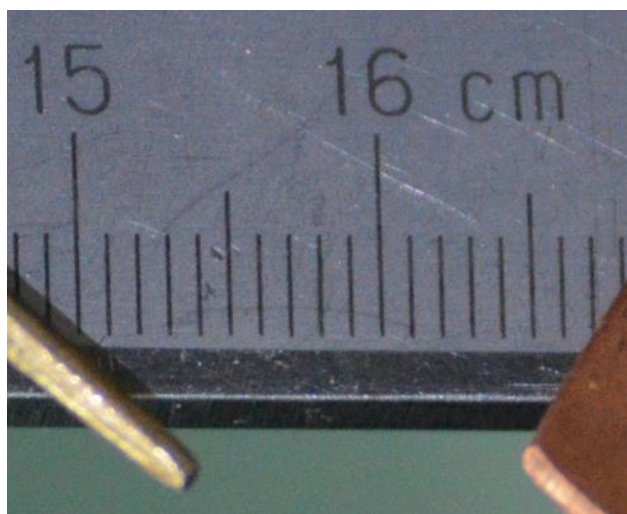


Рис. 7. Изображение электродов

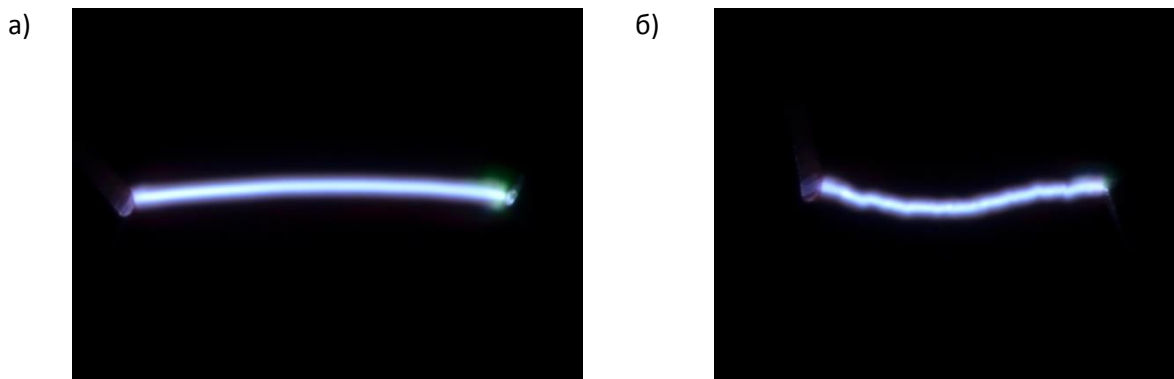


Рис. 8. Фотографии стримерных разрядов при различных зазорах:

а) При зазоре  $x_1 = 10.8$  мм

б) При зазоре  $x_2 = 8.7$  мм

### 3.4 Результаты

Таким образом, длина стримерного канала для зазоров  $x_1 = 10.8$  мм и  $x_2 = 8.7$  мм составила  $l_1 = 10.9$  мм и  $l_2 = 9.8$  мм соответственно. Диаметры разных областей свечения стримерного канала представлены в таблице 2.

Табл. 2. Характеристики областей свечения стримерных каналов при различных зазорах

Стримерные каналы	Диаметр общего поля засветки, мм	Диаметр по синему цвету, мм	Диаметр по белому цвету, мм
1 стример ( $x_1 = 10.8$ мм)	0.79	0.41	0.17
2 стример ( $x_2 = 8.7$ мм)	0.74	0.38	0.14

Если считать диаметром стримера по полю синего цвета, то согласно формулам (1) и (2), проводимости канала составит  $\sigma \approx 500 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , при средней концентрации  $n_e \sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$  (степень ионизации  $10^{-3}$ ). Оценка по размерам диаметра стримера по белому цвету дает  $\sigma \approx 4500 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , при средней концентрации  $n_e \sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$  (степень ионизации  $10^{-2}$ ). Согласно [1] при атмосферном давлении в дуговом разряде (аналог стримера) степень ионизации составляет  $10^{-3} \div 10^{-1}$ . Проводимость металлов очень высокая  $10^6 \text{--} 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , у графита  $1.25 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , у растворов солей и электролитов  $1 \text{--} 10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , т.е. проводимость плазмы стримера находится между проводимостью солевых растворов и графита.

### 5 Заключение.

По литературным данным изучена теория электрического пробоя. Из простейших физических рассуждений проведена оценка напряжённости электрического поля, необходимая для развития электронных лавин и образования пробоя. Согласно кривой Пашена определено пробойное напряжение на заданном разрядном промежутке.

При атмосферном давлении реализован стримерный разряд. Освоена методика электрических измерений при высоких значениях напряжения и силы

тока. Из полученных осциллограмм для напряжения и тока определено сопротивление разрядного промежутка. Сделан выбор режима съемки на фотоаппарате Nikon D5100 (подобраны диафрагма, фокус и экспозиция). Зарегистрировано изображение области свечения стримера и определены ее длина и диаметр областей свечения. По полученным в опытах данным проведена оценка проводимости и концентрации электронов в разрядном промежутке. Порядок величины концентрации электронов совпадает с известными литературными данными. Плазма стримера имеет проводимость, которая лежит в диапазоне между проводимостью солевых растворов и графита.

## **6 Список литературы.**

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: учеб. руководство: для ВУЗов. – 2-ое изд., переработанное и дополненное. –М.: Наука, 1992. –536 с.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997.
3. Ванюков М.П., Мак А.А. Импульсные источники света высокой яркости // Успехи физических наук. – 1958. –т. LXVI, вып.2. с.301-329.