

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Романов Вячеслав Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение тока, генерируемого газоразрядной электронной пушкой

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18311

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., Г. А. Поздняков

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

И. И. Морозов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 2019 г.

Измерение тока, генерируемого газоразрядной электронной пушкой

Романов Вячеслав Александрович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. 3 семестр.

Группа №18311, 2019.

Научный руководитель: Поздняков Г. А., д. ф.-м. н.

Преподаватель: Морозов И. И.

Аннотация.

Целью данной работы было ознакомиться с работой и устройством газоразрядной электронной пушки. В ходе работы были измерены зависимости электронного и ионного токов при давлении 5 Па и при разных потенциалах на коллекторе. Данные зависимости были проанализированы, и сделаны оценки энергии ионов и плотности ионов в пучке. Полученные результаты будут использованы для возможного дальнейшего усовершенствования данной установки и ее применения в физических и физико-химических исследованиях.

Ключевые слова: газоразрядная электронная пушка, ионный ток, электронный ток.

Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	4
3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	5
4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	16
5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ	18
6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	18

1. Введение

Потоки заряженных частиц — электронов и ионов используются в физических экспериментах для ионизации газов. Образующаяся при этом плазма может быть как самостоятельным объектом исследований, так и использоваться для инициирования химических процессов, в частности, горения. Известно, что сечение ионизации электронами максимально при энергии электронов порядка 2-3 потенциалов ионизации. Инициирование химических процессов происходит при еще меньших энергиях. Инжекция электронов и ионов в исследуемый газ при такой низкой энергии должна производиться без использования закрытых фольгой выпускных окон. Предложенная в [1] схема источника заряженных частиц позволяет инжектировать их поток непосредственно в исследуемую газовую среду при давлении газа до нескольких тысяч Па.

2. Описание экспериментальной установки

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, газоразрядной ионной пушки. Установка состоит из конденсатора C , подключённого через разрядник G и индуктивность L к газоразрядному промежутку между электродами 1 и 2. На рисунке показаны диэлектрические пластины 3 с отверстиями (разрядным каналом 4) через которые проходит электронные и ионные пучки, величина индуктивности выбрана из соображений достаточной длительности полупериода разряда, во время которого достигается требуемое разрежение в следствии растекания газа, вызванного началом разряда. Поток ускоренных заряженных частиц улавливается коллектором 6. Также между коллектором и ускорителем установлена заземляющая сетка 7, для отсечения возможных разрядов между электродом и коллектором [1]. Ток коллектора измерялся с помощью трансформатора тока схема и принцип работы которого приведены ниже в описании эксперимента. На коллектор мог подаваться сторонний потенциал согласно схеме, приведенной на рис. 2. Она состоит из

источника постоянного напряжения, конденсатора ёмкостью 400 мкФ и диода, для защиты источника напряжения.

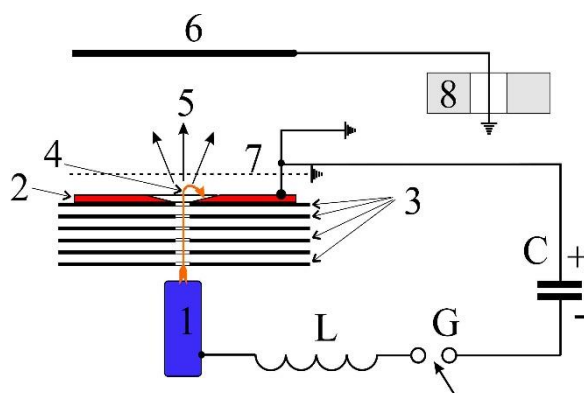


Рис. 1 Схема газоразрядной электронной пушки: 1, 2 - электроды; 3 - диэлектрические пластины; 4 - разрядный канал; 5 - заряженные частицы; 6 - коллектор; 7 - заземляющая сетка; 8 - трансформатор тока

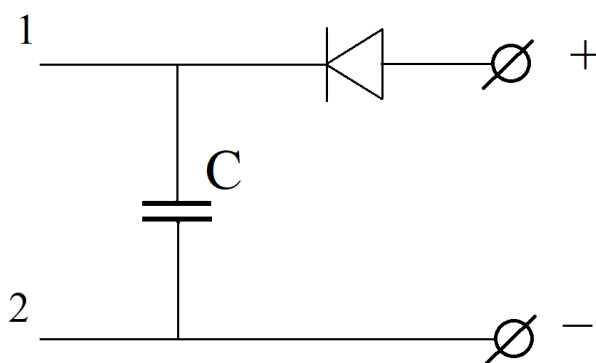


Рис. 2 Дополнение к измерительной установке: C – конденсатор ёмкостью 400 мкФ; 1,2 – контакты подсоединяемые к электронной пушке

3. Описание эксперимента

3.1 Теория пояса Роговского и трансформатора тока

Для измерения быстроизменяющихся токов большой величины в условиях больших электромагнитных помех используют пояса Роговского или

трансформаторы тока. На рис. 3 представлен пояс Роговского с пассивной интегрирующей цепочкой.

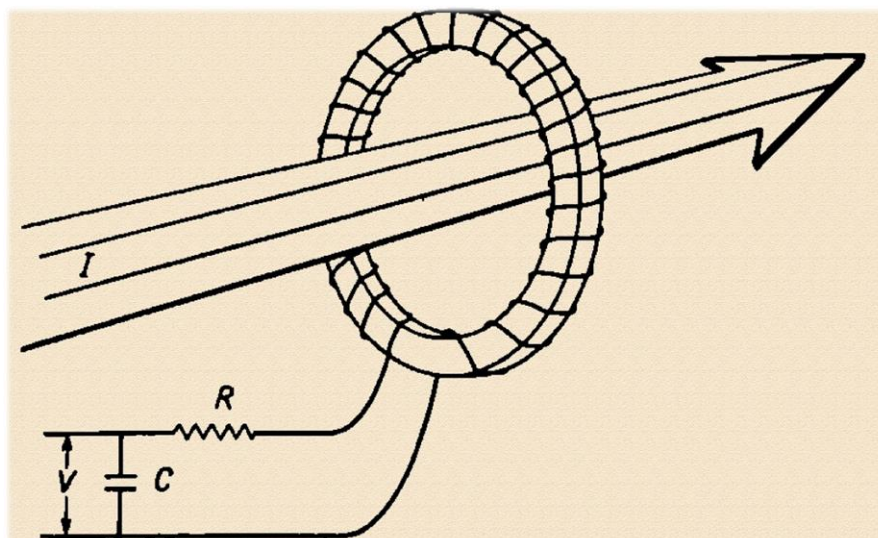


Рис. 3 пояс Роговского с пассивной интегрирующей цепочкой

Принцип работы пояса состоит в том, что меняющееся магнитное поле создаёт электродвижущую силу, которая будет равна изменению магнитного потока через катушку во времени, а поток в свою очередь зависит от изменяющегося тока, следовательно, знание потока позволяет определить ток. Проинтегрировать поток можно используя интегрирующую цепочку, например, RC-цепочку, схема которой представлена ниже на рис. 4.

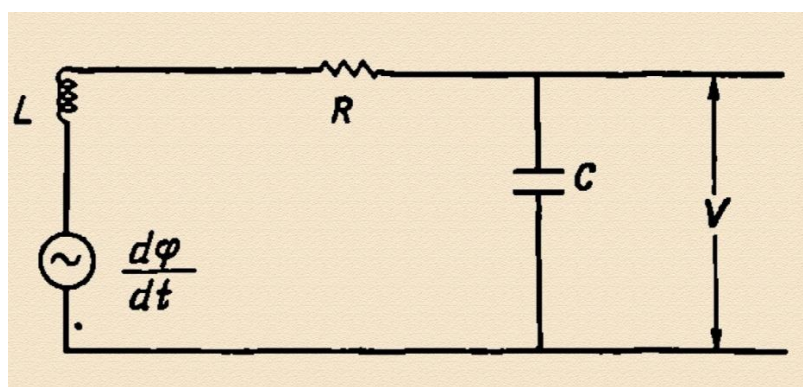


Рис. 4 трансформатор тока с интегрирующей RC-цепочкой: L - катушка индуктивности; R - сопротивление; C - конденсатор

Уравнение такой цепи имеет вид

$$\frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt} + iR + \frac{1}{C} \int_0^t i dt. \quad (1)$$

Параметры данной цепочки подбираются таким образом, что $R \gg \omega L$, поэтому падением напряжения на индуктивности можно пренебречь, а при $t \ll RC$

$$i \approx \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

и в итоге выходное напряжение определяется как

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{RC} \int_0^t \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{\Phi(t)}{RC}, \quad (3)$$

в свою очередь поток связан с создающим его током I соотношением вида

$$\Phi(t) = knI(t), \quad (4)$$

где n – полное число витков, k – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии катушки и распределения тока, тогда выходное напряжение равно:

$$U(t) = \frac{kn}{RC} I(t). \quad (5)$$

Из чего мы можем сделать вывод о том, что выходное напряжение линейно связано с измеряемым током, а множитель перед силой тока представляет собой коэффициент трансформации [2].

Конструкция и схема трансформатора тока представлена на рис. 5. Трансформаторы тока применяются для понижения уровня тока. В данной конструкции первичный ток идёт по главному первичному проводнику и порождает магнитное поле, поток которого пронизывает полый сердечник. В следствии чего, во вторичной обмотке образуются токи, которые связаны с величиной первичного тока через отношение числа витков обмотки. Вторичного обмотка может подключаться сразу к амперметру, так и к следующему каскаду

цепи, где входная величина тока, благодаря трансформатору тока, будет понижена или повышена.

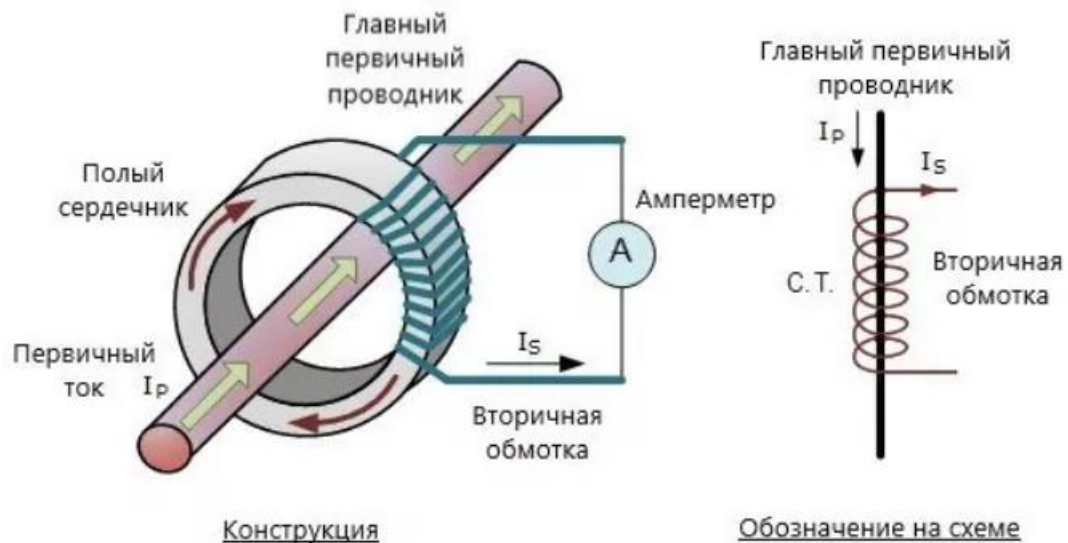


Рис. 5 схема и конструкция трансформатора тока. I_p – ток первичный; I_s – ток вторичный

В отличие от трансформатора тока, пояс Роговского принципиально представляет собой катушку без сердечника, является датчиком переменной составляющей тока, обладает малой инерционностью и высокой линейностью, что позволяет ему регистрировать с хорошей точностью переменные и импульсные токи.

3.2 Методика измерений

В начале эксперимента требовалось улучшить измерительную установку, для чего к общей схеме был присоединён источник чтобы иметь возможность задавать потенциал на коллекторе установки. Далее эксперимент проводился при разряженном и заряженном до различных значений конденсатором при низком вакууме порядка $5 \cdot 10^{-2}$ torr и при разной полярности. Все измерения проводились при начальном зарядке ёмкости C (рис.1) 25 кВ.

При помощи цифрового осциллографа мы получили зависимость напряжения от времени. По полученным зависимостям напряжения при разном потенциале на коллекторе и параметрам установки восстановили зависимость силы тока от

времени, а по пороговому значению прекращения полуволны сделали оценки энергии заряженных частиц. По величине тока без приложения потенциала на коллектор оценили плотность заряженных частиц в пучке.

3.3 Результаты измерений

Измеренные зависимости силы тока приведены ниже на рисунках 6-10 при прямой полярности, на рисунках 12-15 при обратной, а также для наглядности на рисунках 11, 16 приведены сравнения зависимостей силы тока при различном потенциале на коллекторе.

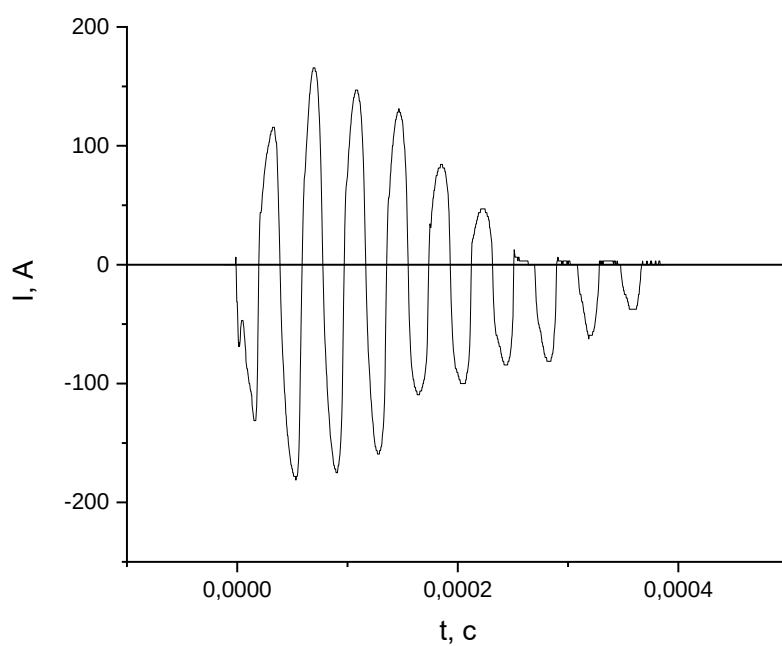


Рис. 6 Зависимость силы тока от времени при нулевом потенциале на коллекторе

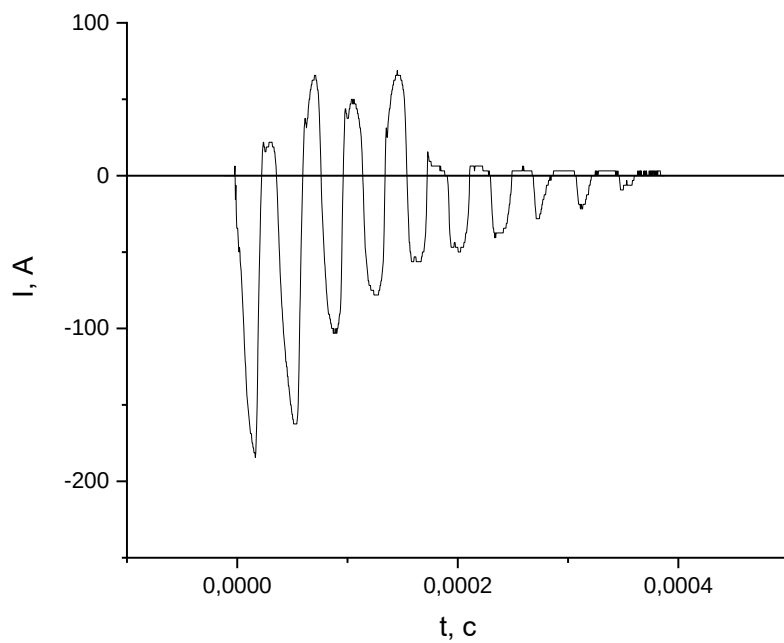


Рис. 7 зависимость силы тока от времени при потенциале 25 вольт на коллекторе

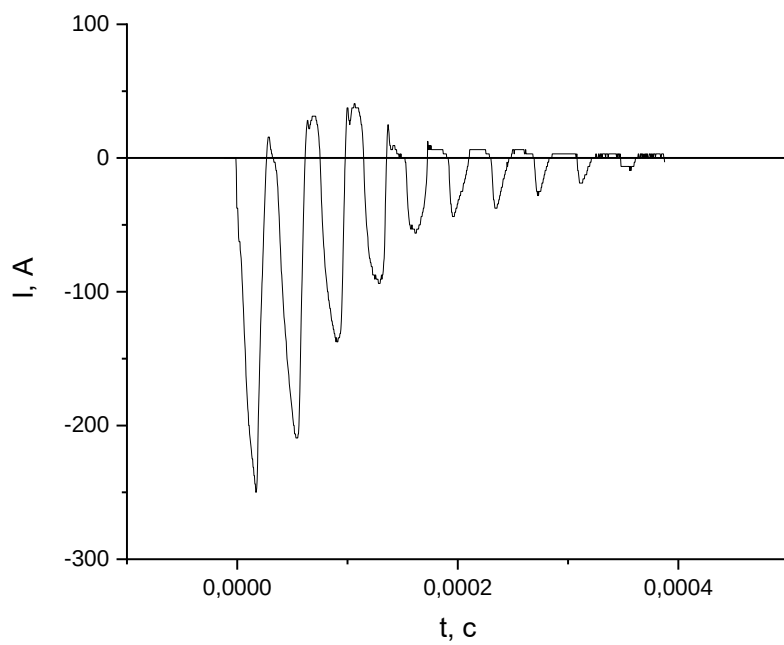


Рис. 8 Зависимость силы тока от времени при потенциале 35 вольт на коллекторе

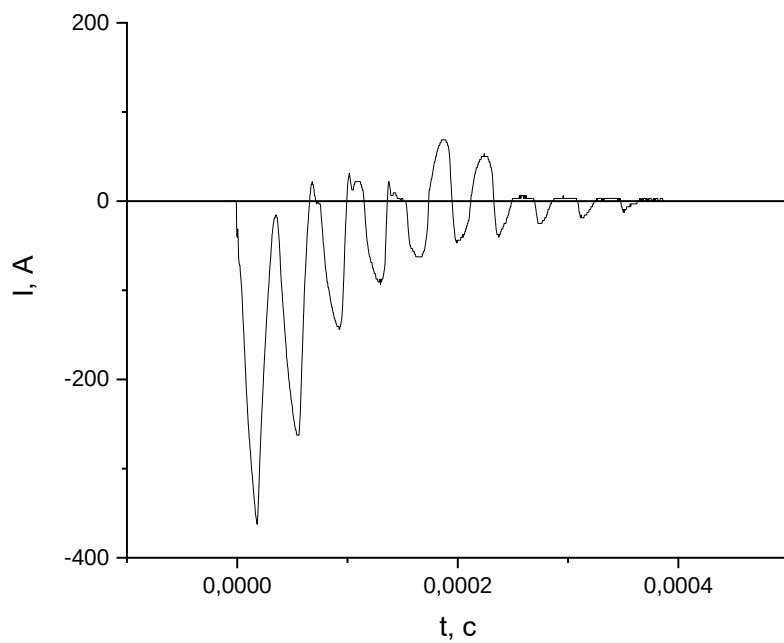


Рис. 9 Зависимость силы тока от времени при потенциале 45 вольт на коллекторе

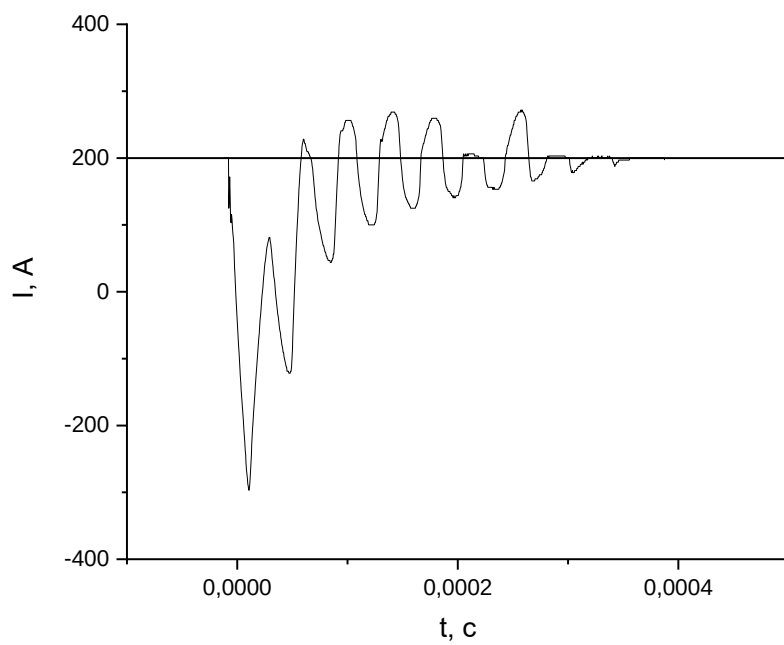


Рис. 10 Зависимость силы тока от времени при потенциале 55 вольт на коллекторе

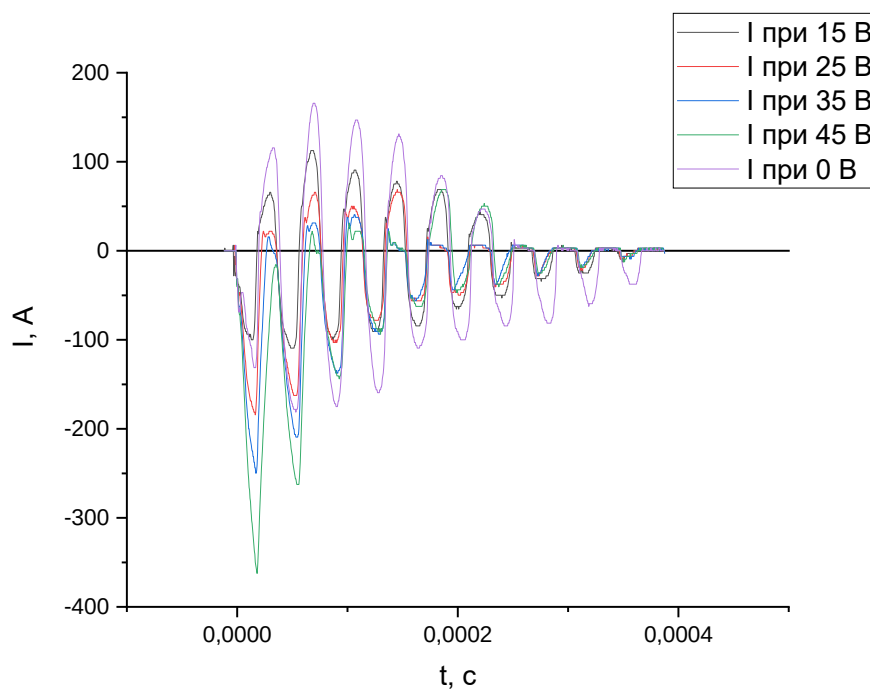


Рис. 11 сравнение зависимостей тока при разном потенциале на коллекторе

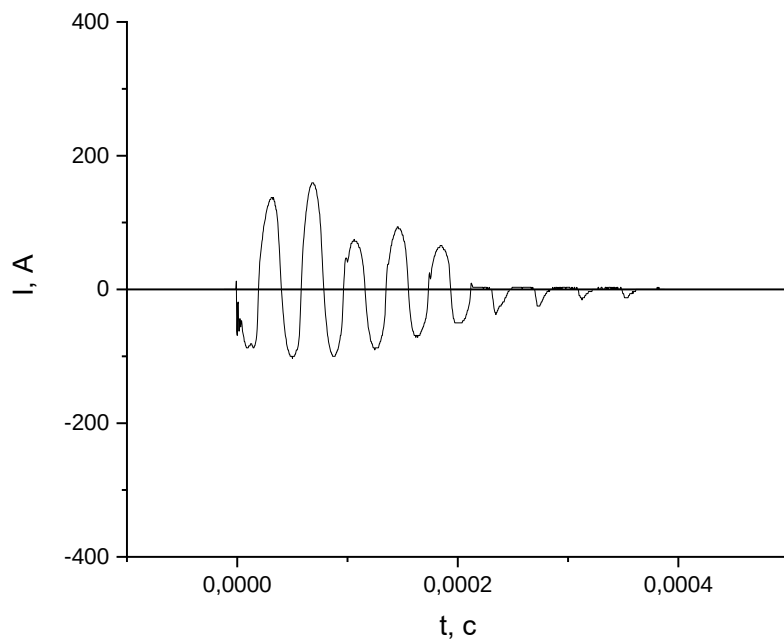


Рис. 12 Зависимость силы тока от времени при потенциале -15 вольт на коллекторе

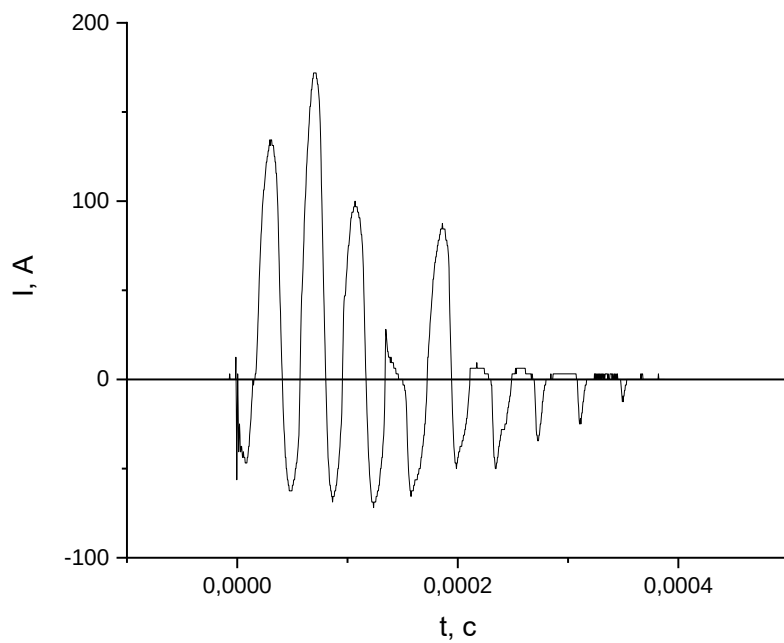


Рис. 13 Зависимость силы тока от времени при потенциале -25 вольт на коллекторе

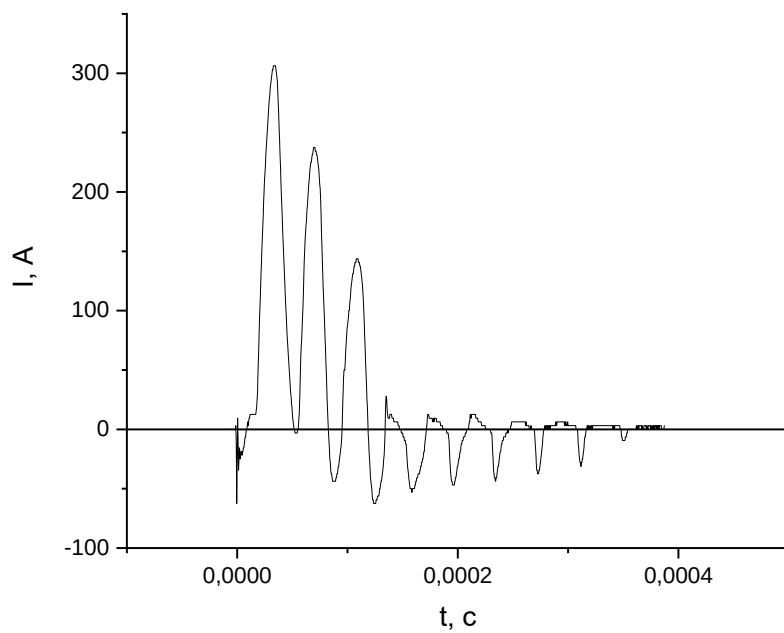


Рис. 14 Зависимость силы тока от времени при потенциале -45 вольт на коллекторе

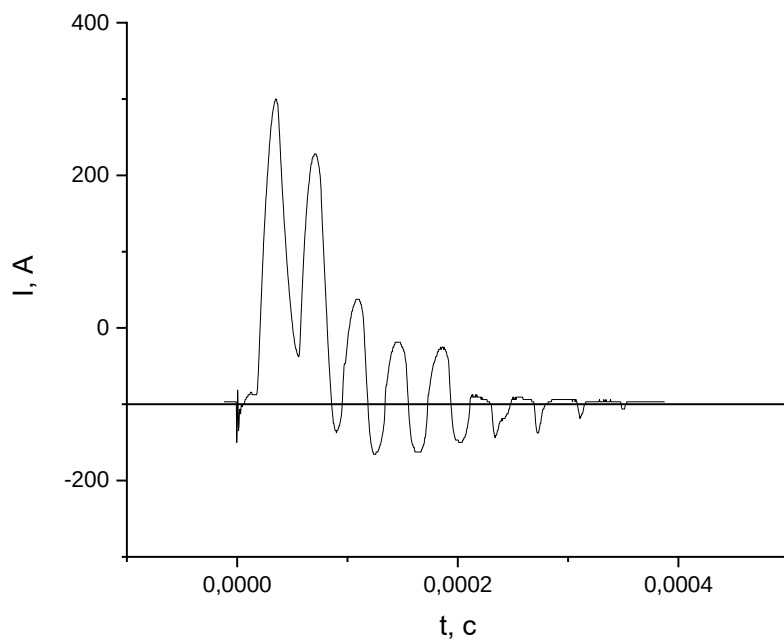


Рис. 15 Зависимость силы тока от времени при потенциале -55 вольт на коллекторе

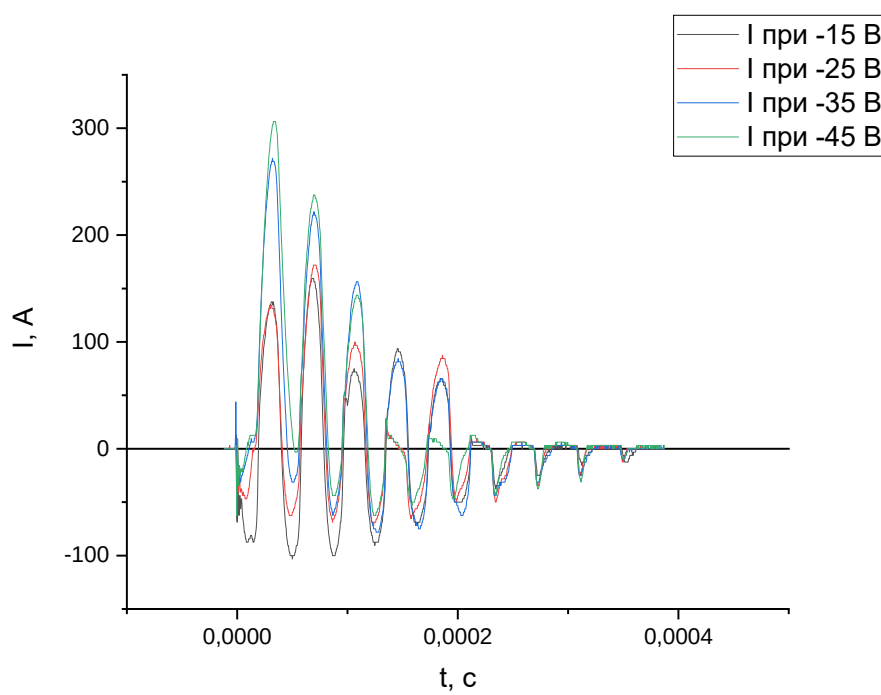


Рис. 16 сравнение зависимостей силы тока при разном потенциале

4. Анализ результатов измерений

Как видно из полученных зависимостей тока, рис. 11, существует некоторое пороговое значение, при котором исчезают положительные полуволны, что нельзя сказать об отрицательных полуволнах, рис. 16, т.к. увеличение отрицательного потенциала не прекращало отрицательного тока, но вызывало разряд конденсаторов через плазму, образовавшуюся при облучении остаточного газа электронами. Из выше написанного следует, что оценить плотность электронов в пучке предложенным в данной работе способом нельзя, в отличие от ионов. При определённом (пороговом) значении положительная волна исчезает, что соответствует тому, что потенциальный барьер стал сопоставим с энергией ионов и поэтому ионы не могут его преодолеть.

4.1 Обработка результатов

По полученным с осциллографа зависимостям напряжения от времени можно установить зависимость тока от времени, как это указывалось выше в теории пояса Роговского и трансформатора тока (коэффициент трансформации пояса 10 A/B).

По данным потенциала на коллекторе, при котором прекращается положительная полуволна, можно оценить энергию ионов по формуле:

$$W = e\varphi \quad (6)$$

где W – энергия ионов, φ – потенциал на коллекторе, e – заряд иона, m – масса иона воздуха, v – скорость ионов в пучке.

С другой стороны, энергию можно вычислить по формуле:

$$W = \frac{mv^2}{2}, \quad (7)$$

где m – масса иона воздуха, v – скорость ионов в пучке.

Из формул 6 и 7 скорость ионов в пучке имеет вид:

$$v = \sqrt{\frac{2e\varphi}{m}} \quad (8)$$

Проинтегрировав силу тока по времени на промежутке положительной полувольты при нулевом потенциале на коллекторе, получим заряд пучка ионов.

По этому заряду, площади измерительного зонда и скорости ионов в пучке можно оценить плотность ионов в пучке по формуле:

$$n = \frac{q}{vSet}, \quad (8)$$

где v – скорость ионов в пучке, q – полный заряд пучка ионов пришедший на коллектор, t – время положительной полувольты, e – заряд иона, S – площадь зонда (150x150мм).

Как видно из зависимостей пороговое значение равно 45 В, следовательно энергия ионов составляет 45 эВ. Средняя скорость ионов равна 2,5 км/с.

Полный ионный ток, проинтегрированный на положительных участках зависимости силы тока при нулевом потенциале, приведён в таблице ниже:

1-ая полувольтна	2-ая полувольтна	3-я полувольтна	4-ая полувольтна	5-ая полувольтна
0,00156 Кл	0,00219 Кл	0,00207 Кл	0,00182 Кл	0,00123 Кл

Средняя плотность ионов в пучке составляет $2,14 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

4.2 Оценка погрешностей

В данной работе основным источником погрешности является цифровой осциллограф (8 разрядов), который имеет неустранимую погрешность в половину младшего разряда (0,2%), а также имеет неточности, которые связаны со встроенными эталонами напряжения.

5. Обсуждение полученных результатов и выводы

По результатам наших экспериментов мы ознакомились с принципом работы и устройством газоразрядной пушки, смогли установить энергию ионов, скорость ионов в пучке, которая на несколько десятков превышает среднюю скорость молекул воздуха при нормальных условиях, и произвели оценку плотности ионов в пучке. Оценить энергию и плотность электронов в пучке данным методом не представляется возможным. Для установки, назначение которой создание ионного пучка с заданной энергией и конфигурацией измеренные параметры являются определяющими для будущих исследований.

6. Список литературы

1. Pozdnyakov G.A. Effect of charged particles fluxes by pulsed gas discharge//arXiv:1409.3303,(2014)
2. Хаддлстоун Р., Леонард С. «Диагностика плазмы», Издательство «МИР».