

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

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Кальнеус Екатерина Евгеньевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение удельного заряда электрона магнетронным методом**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19305

**Научный руководитель:**

ассистент, С. Е. Краснопевцев  
Оценка научного руководителя

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Преподаватель практикума**

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Куратор практикума:**

к. ф.-м. н., В. Т. Астрелин  
Итоговая оценка

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2020 г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы являлось определение удельного заряда электрона магнетронным методом. Исследования проводились на лабораторной установке электромагнитного практикума, которая была доработана. Для этой цели была разработана схема управления током соленоида, надеваемого поверх колбы вакуумного диода. Эта схема позволяет формировать импульсное магнитное поле, что позволяет практически исключить нагрев соленоида и одновременно обеспечить формирование стабильной осциллограммы с возможностью плавного изменения параметров эксперимента. Проведены эксперименты по определению оптимальных параметров и режимов работы оборудования. Сняты сбросовые характеристики вакуумного диода в продольном магнитном поле, получены данные, по которым вычислен удельный заряд электрона. Полученный результат хорошо согласуется с известными значениями. Результаты работы позволят расширить круг проводимых исследований на практикуме по электричеству и магнетизму НГУ.

Работа выполнена в межфакультетской лаборатории электричества и магнетизма кафедры общей физики физического факультета НГУ.

Ключевые слова: вакуумный диод, траектория электрона, анодный ток, соленоид, сила Лоренца, сбросовая характеристика, скрещенные магнитное и электрическое поля, магнетрон.

## **Оглавление**

1. Введение .....	4
2. Теоретическая база и экспериментальная установка .....	5
3. Разработка схемы и проведение исследований .....	8
4. Обработка полученных данных .....	9
5. Результаты и выводы .....	11
6. Список литературы .....	11

## 1. Введение

Удельный заряд электрона – отношение величины заряда электрона к его массе покоя, можно отнести к основным физическим постоянным. Существует множество способов определения удельного заряда. В данной работе рассматривается способ, который можно реализовать относительно просто. Для этого необходимо обеспечить движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях. Если мы возьмем вакуумный диод с коаксиальным расположением электродов и поместим его в соленоид с током, то мы получаем именно такие условия. Указанный метод получил свое название благодаря магнетрону – двух-электродному вакуумному прибору, помещенному в магнитное поле.

Целью работы являлась доработка имеющейся на электромагнитном практикуме НГУ лабораторной установки "Законы термоэмиссии" с целью добавления возможности определения удельного заряда электрона магнетронным методом. Изначально предполагалось добавление в установку соленоида, подключенного к внешнему источнику постоянного тока. Однако ряд проведенных экспериментов показал, что при протекании необходимого тока через соленоид, происходит быстрый и значительный его нагрев. Это не позволит проводить исследования сколько-нибудь длительное время. Возникла идея решить проблему пропусканьем через соленоид тока в виде коротких периодических импульсов, а необходимые электрические величины выводить для исследований на осциллограф. В этом случае средний ток мог бы составлять совсем небольшую величину, а амплитуда импульсов тока могла быть достаточной. Для этого можно было периодически разряжать на соленоид конденсатор.

Для реализации и проверки этой идеи необходимо разработать специальную схему, которая могла бы обеспечить формирование импульсных токов, величиной вплоть до 5,0 ампер. В силу ограниченного времени, было принято решение использовать в качестве опорного источника импульсов цифровой генератор

сигналов. В дальнейшем, полученные результаты позволят провести окончательную доработку схемы таким образом, что опорные импульсы будут вырабатываться внутри схемы. Тогда внешний генератор сигналов не понадобится.

## 2. Теоретическая база и экспериментальная установка

Суть магнетронного метода состоит в следующем. Траектории радиального движения электронов, под действием продольного магнитного поля, искривляются настолько, что они перестают касаться анода и возвращаются на катод. Это в свою очередь означает, что потребуется создать магнитное поле достаточной для этого величины.

Выведем формулу для заряда частицы к ее массе  $e/m$ :

Уравнение движения заряженной частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях имеет вид:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} + e\mu_0[\vec{v} \times \vec{H}] \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы;  $e$  – величина заряда частицы;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Движение электронов происходит в цилиндрическом пространстве между катодом и анодом двухэлектродной электронной лампы. Нить накала лампы (катод) располагается вдоль оси цилиндрического анода, так что электрическое поле между катодом и анодом имеет радиальное направление. Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле, параллельное оси лампы и перпендикулярное линиям электрического поля.

В электрическом поле напряженностью  $\vec{E}$  на электрон действует сила

$$\vec{F} = e\vec{E}, \quad (2)$$

направленная против поля и сообщающая электрону ускорение.

Напряженность электрического поля в лампе цилиндрической формы имеет только радиальную компоненту  $E_r$ . Следовательно, сила, действующая на электрон в таком поле, направлена по радиусу, поэтому

$$F_r = eE, \quad F_z = F_\phi = 0 \quad (3)$$

Под действием этой силы электрон проходит расстояние между точками с разностью потенциалов  $U$ . Конечная скорость электрона  $\vec{v}$  будет определена из закона сохранения энергии [6, стр. 414]:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (4)$$

Движение электрона в однородном магнитном поле происходит под действием силы Лоренца, которая в нашем эксперименте перпендикулярна скорости электрона и направлению магнитного поля. Модуль силы Лоренца

$$F = e \vec{v} B \sin \alpha \quad (5)$$

Под действием силы Лоренца электрон приобретает центростремительное ускорение и начинает двигаться по окружности радиуса  $R$  (рис. 1). И, следовательно, если вектор скорости электрона перпендикулярен направлению магнитного поля, можно выразить радиус окружности, по которой движется электрон:

$$evB = \frac{mv^2}{R} \quad (6)$$

отсюда:

$$R = \frac{v}{\left(\frac{e}{m}\right)B} \quad (7)$$

Видно, что радиус окружности зависит от отношения  $e/m$ . При высоких скоростях электрона, радиус траектории больше, чем при малых.

Строгий вывод выражения для получения удельного заряда электрона приводит к выражению [3, стр.101]:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{R_a^2 B_{кр}^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{R_k^2}{R_a^2}\right)^2} \quad (8)$$

где  $U$  – анодное напряжение,  $R_a$  – радиус анода,  $R_k$  – радиус катода,  $B_{кр}$  – критическая индукция магнитного поля.

Критическая индукция магнитного поля (рис. 2) определяется критическим током соленоида [9, стр.139]:

$$B_{кр} = \mu_0 \frac{n}{l} I_{кр} \quad (9)$$

где  $I_{кр}$  – критический ток в соленоиде,  $n$  – число витков соленоида,  $l$  – длина соленоида,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Для удобства вычислений можно подставить формулу (9) в формулу (8):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{\left(R_a \mu_0 \frac{n}{l} I_{кр}\right)^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{R_k^2}{R_a^2}\right)^2} \quad (10)$$

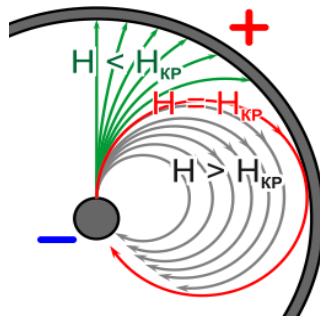


Рис.1. Движение электрона, в зависимости от времени в цилиндрическом пространстве между катодом и анодом двухэлектродной электронной лампы.

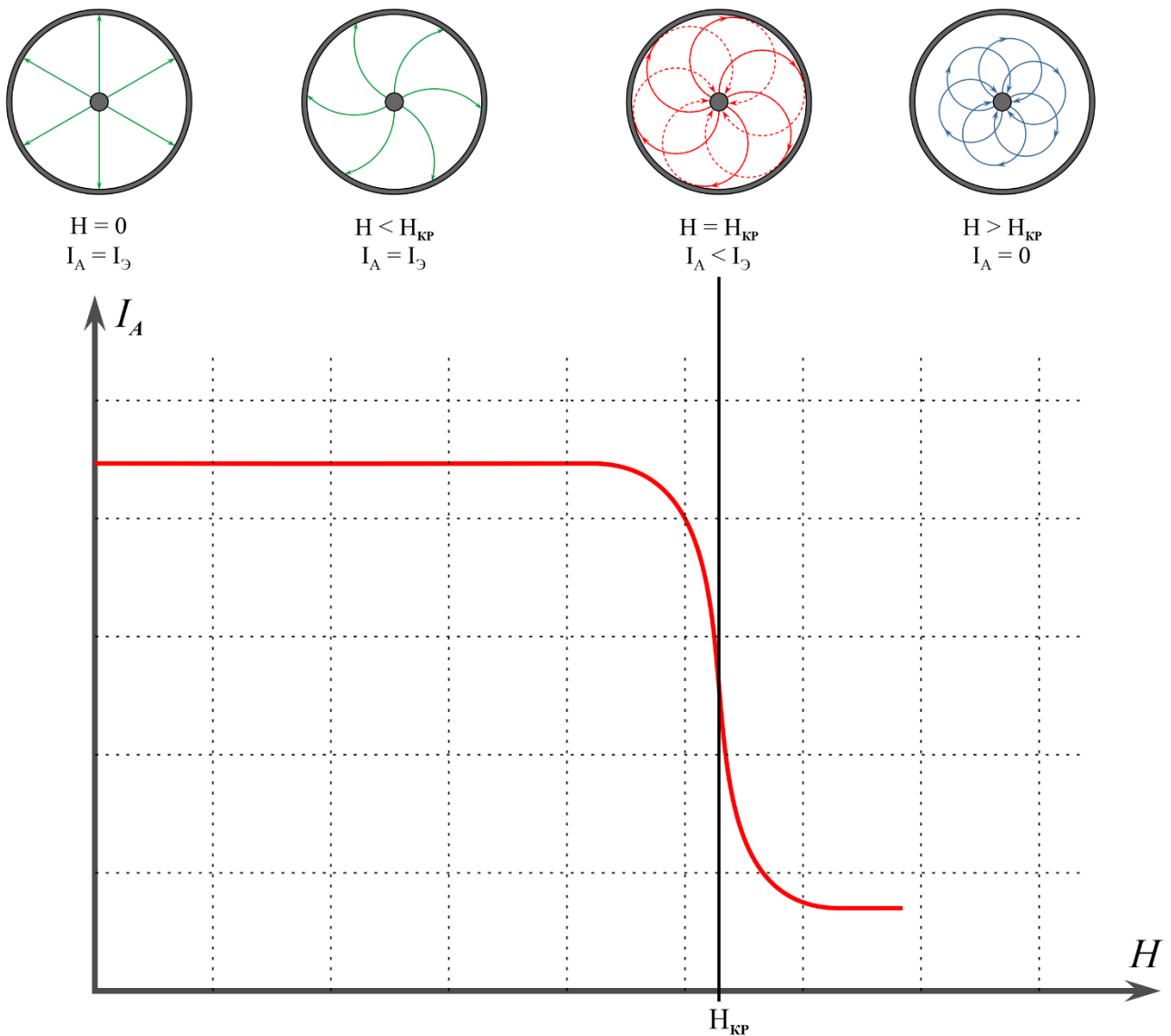


Рис.2. Теоретическая зависимость тока соленоида от магнитного поля в вакууме, критическая индукция магнитного поля.

### 3. Разработка схемы и проведение исследований

Ключевым элементом экспериментальной установки (Рис.3, Рис.4) является вакуумный диод, помещенный внутрь соленоида. Обмотка соленоида выполнена из изолированного провода, намотанного в четыре слоя по всей длине каркаса.

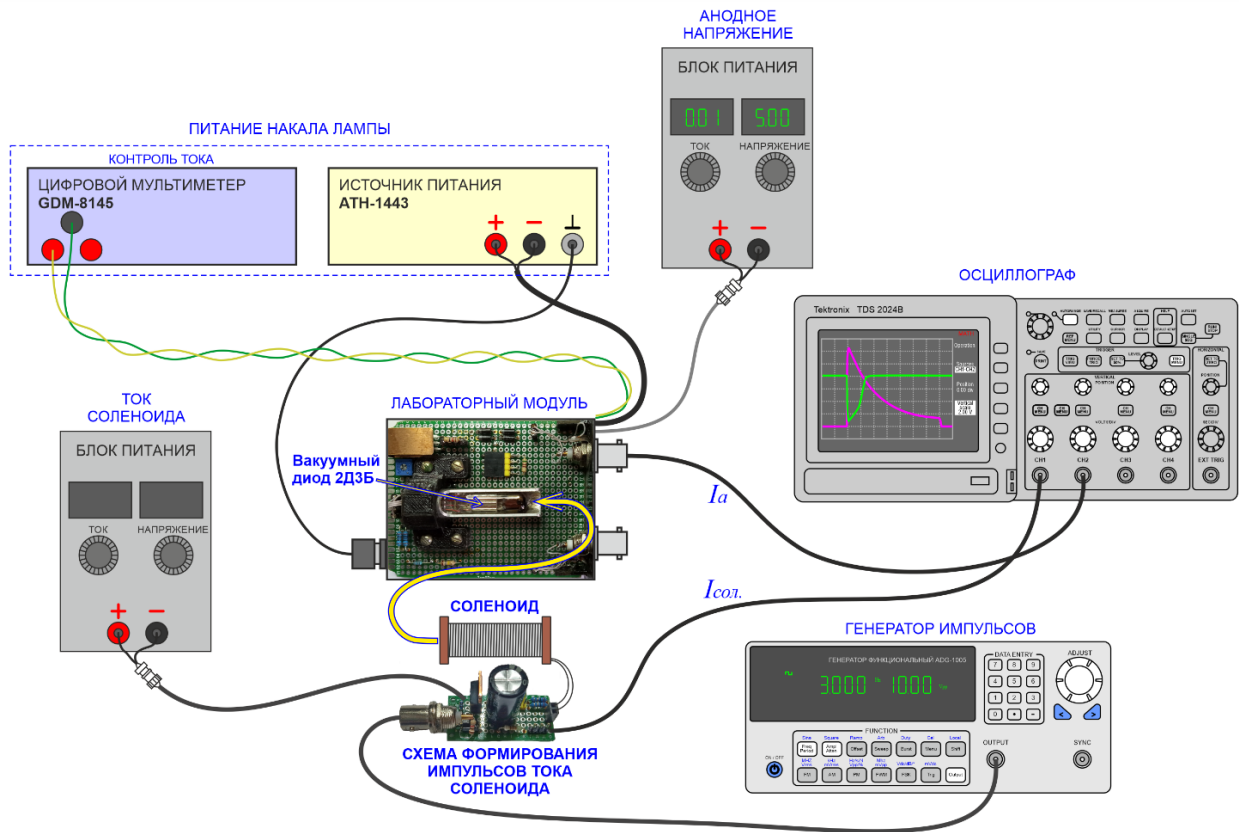


Рис.3. Схема формирования импульсов тока соленоида.



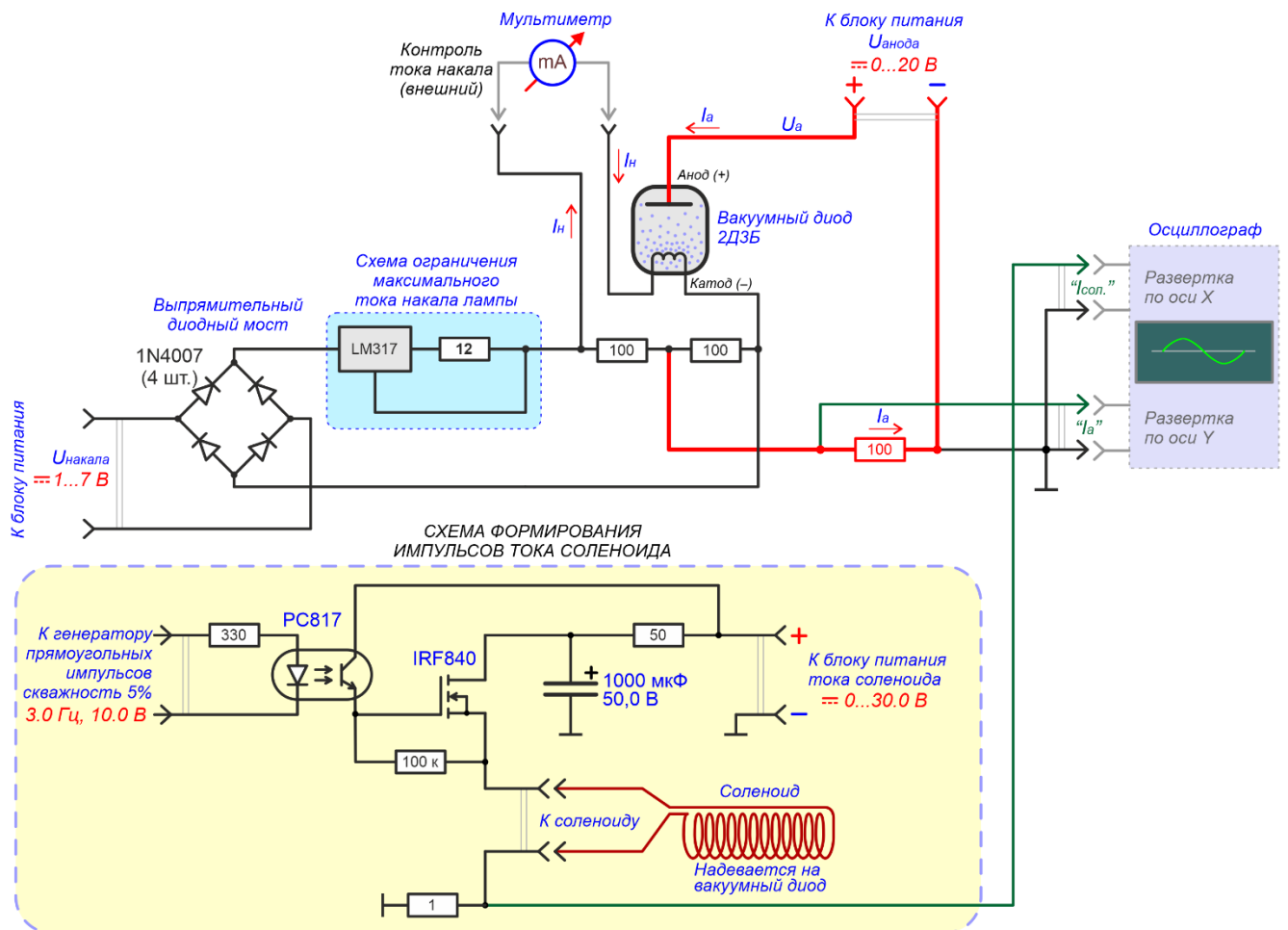


Рис.4. Схема формирования импульсов тока соленоида.

#### 4. Обработка полученных данных

Измерения проводились при постоянных: радиусе анода  $R_a = 7 \cdot 10^{-4}$ , радиусе катода  $R_k = 1 \cdot 10^{-5}$ , количестве витков  $N = 300$ , длины соленоида (м)  $L = 0,046$ ,  $\mu_0 = 1,25664E-06$ .

Удельное число витков составило:

$$n = \frac{N}{L} = 6521,7$$

Проведенные эксперименты при различных анодных напряжениях вакуумного диода показали, что для достижения таких траекторий необходимо весьма высокая напряженность создаваемого магнитного поля.

В результате экспериментальных исследований мы получили данные в виде графиков:

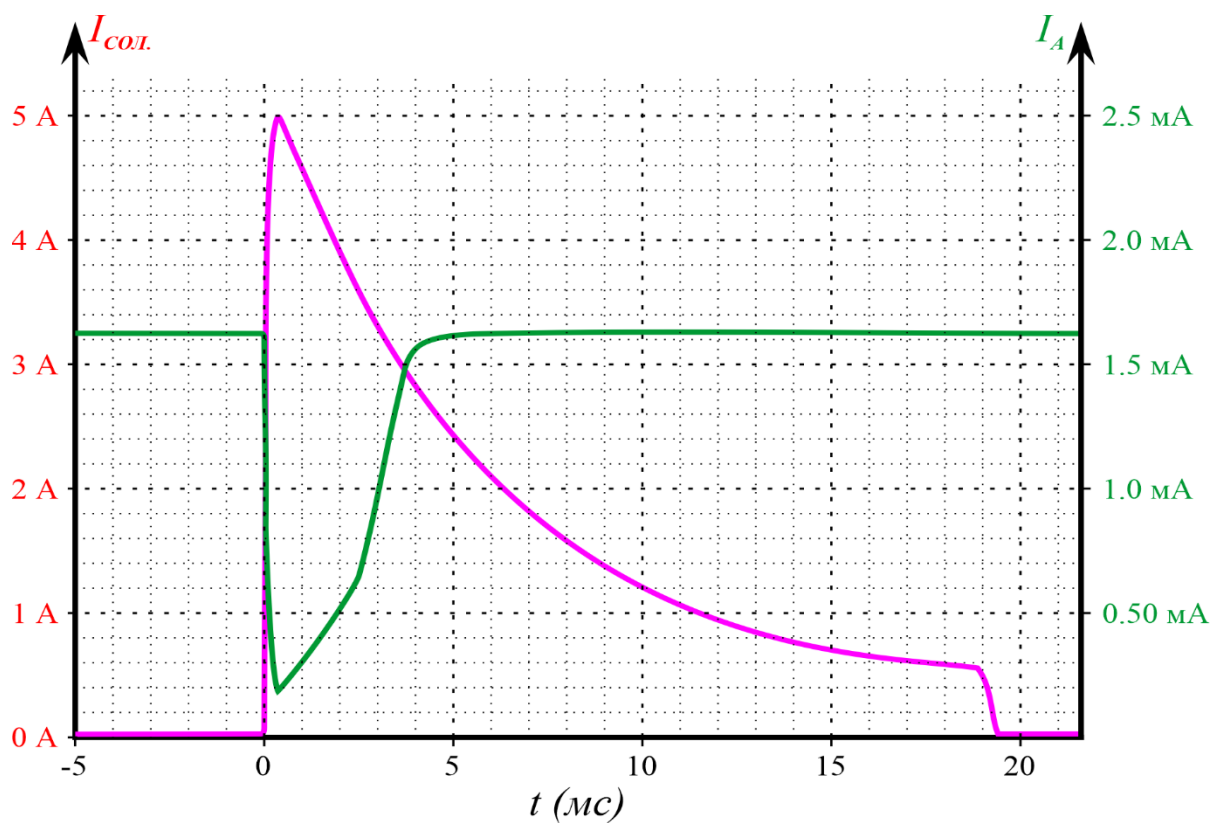


График зависимости анодного тока (зеленый луч) от тока соленоида (фиолетовый луч),  
временная разверстка.

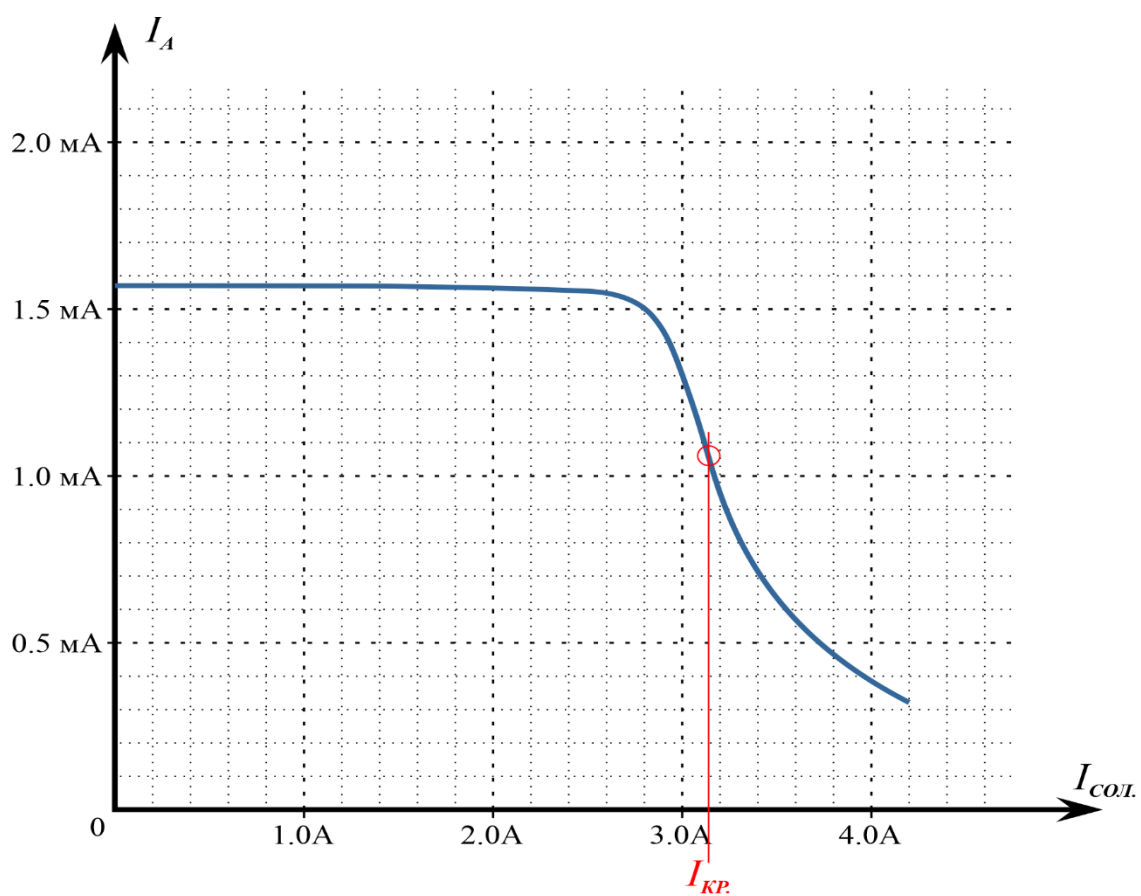


График зависимости анодного тока от тока соленоида, при разных напряжениях.

Из последнего графика видно, что  $I_{кр}$  примерно равен 3,1 А. Тогда  $B_{кр} = 0,0254059(\text{Тл})$ ;  $e/m = 1,51797 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

Табличное значение:  $e/m = 1,75882 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

## 5. Результаты и выводы

Из примера выше видна небольшая погрешность. Это объясняется тем, что информации о радиусе анода официально нигде нет, поэтому он был вычислен при помощи микроскопа, методом отношений, путем сравнения с толщиной медной нити известного диаметра.

В итоге, мы убедились, что определение удельного заряда электрона магнетронным методом дает близкое значение к табличному.

## 6. Список литературы

1. Солоухин Р. И. Методы физических измерений. Лабораторный практикум по физике. Издательство "Наука" Сибирское отделение, Новосибирск, 1975 г.
2. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. Издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1971.
3. Богуславский С. А. Избранные труды по физике. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1961 г.
4. Гольдин Л. Л. Лабораторные занятия по физике. Москва "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1983 г.
5. Иверонова В. И. Физический практикум. Электричество и оптика. 2-е изд. Издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1968 г.
6. Калашников С. Г. Электричество. Москва, Физматлит, 2003.
8. Сивухин Д. В. Общий курс физики. т.3, Электричество. Москва, Физматлит МФТИ, 2004.