

Московский физико-технический университет  
Факультет радиотехники и кибернетики

Лабораторная работа № 3.3.1

(Общая физика: электричество и магнетизм)

# **Измерение удельного заряда электрона методом магнетрона**

Работу выполнил:

**Милославов Глеб, группа Б01-103**

г. Долгопрудный  
2022 год

# 1 Введение

## 1.1 Цель работы

Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона.

## 1.2 Оборудование

Электронная лампа с цилиндрическим анодом; универсальный стабилизированный источник постоянного и переменного напряжений; соленоид; миллиамперметр; амперметр и вольтметр постоянного тока.

## 1.3 Экспериментальная установка

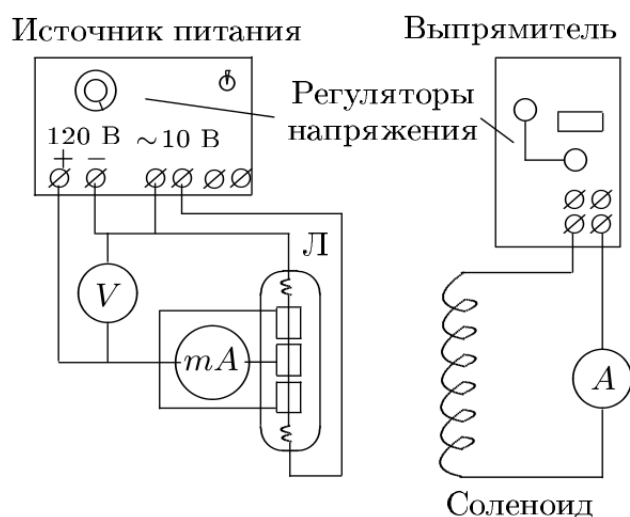


Рис. 1: Схема установки

## 1.4 Теоретическая часть:

В так называемом методе магнетрона отношение  $e/m$  измеряется на основе исследования движения электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях, перпендикулярных друг другу. Название метода связано с тем, что такая конфигурация электрического и магнитного полей реализуется в магнетронах — генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот.

Для уяснения идеи метода магнетрона, рассмотрим вначале движение заряда в «плоском магнетроне» который можно представить себе в виде плоского конденсатора, помещённого в магнитное поле так, что  $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ . При этом отрицательная пластина конденсатора играет роль катода, положительная соответственно анода. Если бы магнитного поля не было, то все электроны, вылетевшие без начальной

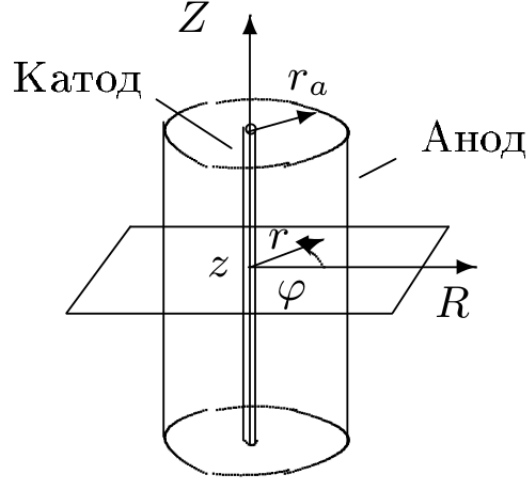


Рис. 2: Схема устройства двухэлектродной лампы

из катода такого плоского диода, попадали бы на анод. При наличии магнитного поля траектории электронов искривляются, вследствие чего при достаточно большом магнитном поле ни один электрон не достигнет анода. Для заданного напряжения между катодом и анодом существует некоторое критическое значение магнитной индукции  $B_{кр}$ , при котором траектории касаются поверхности анода. Если  $B < B_{кр}$ , то все электроны достигают анода и ток через магнетрон имеет то же значение, что и без магнитного поля. Если же  $B > B_{кр}$ , то электроны не достигают анода и ток через лампу равен нулю.

Рассчитаем это критическое значение индукции магнитного поля. Уравнения движения электрона в нашем случае имеет вид

$$m \frac{dv_x}{dt} = ev_y B,$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = eE - ev_x B$$

при начальных условиях  $x(0) = y(0) = 0, v_x(0) = v_y(0) = 0$ .

Непосредственной подстановкой несложно убедиться в том, что решением системы дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями является уравнение циклоиды (в параметрической форме):

$$x = vt - R \sin \omega t, \quad y = R(1 - \cos \omega t),$$

где  $v = \frac{E}{B}, R = \frac{v}{\omega} = \frac{Em}{eB^2}$ .

Касание анода происходит при  $2R = d$  ( $d$  — расстояние между анодом и катодом). Этому значению соответствует критическое поле

$$B_{кр} = \frac{\sqrt{2V}}{d\sqrt{e/m}}.$$

Из последней формулы находим удельный заряд:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{d^2 B_{\text{кр}}^2}.$$

Эта формула позволяет вычислить  $e/m$ , если при заданном значении напряжения на аноде  $V$  найти такое значение магнитного поля, при превышении которого ток в магнитроне отсутствует.

В настоящей работе отношение  $e/m$  для электрона определяется с помощью метода, получившего название «метод магнетрона». Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей напоминает конфигурацию полей в магнетронах — генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Движение электронов в этом случае происходит в

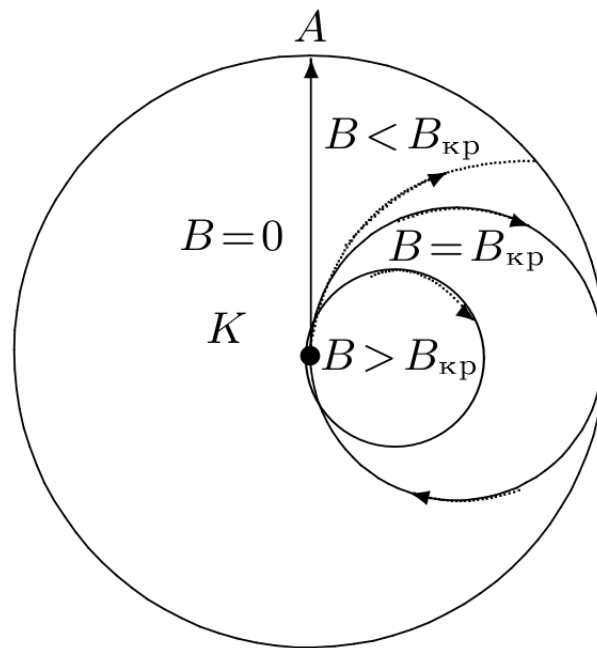


Рис. 3: Траектории электронов, вылетающих из катода, при разных значениях индукции магнитного поля

кольцевом пространстве, заключённом 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.

Рассмотрим траектории электронов, вылетевших из катода, более подробно. Пусть потенциал анода равен  $V_a$ . В отсутствие магнитного поля электрон движется прямолинейно по радиусу. При слабом поле траектории несколько искривляются, но электроны всё же попадают на анод. При некотором критическом значении индукции магнитного поля  $B_{\text{кр}}$  траектории искривляются настолько, что касаются анода. Наконец, при  $B > B_{\text{кр}}$  электроны вовсе не попадают на анод и возвращаются к катоду. Величину  $B_{\text{кр}}$  нетрудно найти по формуле, приведённой выше,

заметив, что в этом случае радиальная скорость электрона  $\dot{r}$  при  $r = r_a$  (при радиусе анода) обращается в нуль:

$$V_a = \frac{eB_{\text{кр}}^2 r_a^2}{8m}.$$

Преобразуя это выражение, найдём

$$\frac{e}{m} = \frac{8V_a}{B_{\text{кр}}^2 r_a^2}.$$

Эта формула позволяет вычислять  $e/m$ , если при заданном  $V_a$  найдено значение магнитного поля (или, наоборот, при заданном  $B$  такое значение  $V_a$ ), при котором электроны перестают попадать на анод. До сих пор мы рассматривали идеальный

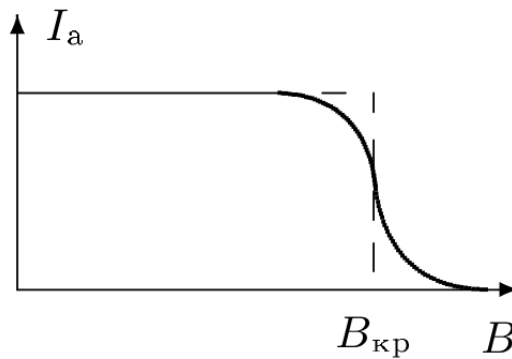


Рис. 4: Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля в соленоиде

случай, когда при  $B < B_{\text{кр}}$  все электроны без исключения попадают на анод, а при  $B > B_{\text{кр}}$  все они возвращаются на катод, не достигнув анода. Анодный ток  $I_a$  с увеличением магнитного поля изменялся бы при этом так, как это изображено на рисунке выше пунктирной линией. В реальных условиях невозможно обеспечить полную коаксиальность анода и катода, вектор индукции магнитного поля всегда несколько наклонён по отношению к катоду, магнитное поле не вполне однородно и так далее. Все эти причины приводят к сглаживанию кривой на рисунке выше и она приобретает вид сплошной линии. В хорошо собранной установке перелом функции  $I_a = f(B)$  остаётся, однако, достаточно резким и с успехом может быть использован для измерения  $e/m$ .

## 1.5 Погрешности

Примим за абсолютные погрешности прямых измерений:

$$\sigma_{I_m} = 0,5 \text{ дел} = 5 \text{ мкА} \quad ; \quad \sigma_{I_a} = 0,5 \text{ дел} = 2 \text{ мА} \quad ; \quad \sigma_B = 0,028 \cdot \sigma_{I_m} = 0,14 \text{ мкТл}$$

## 2 Выплонение

### 2.1 Зависимость анодного тока от магнитного поля

Внесём данные прямых измерений для  $U_A = 70, 80, 90$  В:

70					80					90				
$I_m$ , дел	$I_m$ , мкА	$I_a$ , дел	$I_a$ , мА	$B$ , мкТл	$I_m$ , дел	$I_m$ , мкА	$I_a$ , дел	$I_a$ , мА	$B$ , мкТл	$I_m$ , дел	$I_m$ , мкА	$I_a$ , дел	$I_a$ , мА	$B$ , мкТл
9,5	95	54,5	218	2,7	10	100	55	220	2,8	10	100	57	228	2,8
17,0	170	54,5	218	4,8	15	150	55	220	4,2	15	150	57	228	4,2
20,0	200	54,5	218	5,6	20	200	55	220	5,6	20	200	57	228	5,6
23,0	230	54,0	216	6,4	25	250	55	220	7,0	25	250	56	224	7,0
25,0	250	52,0	208	7,0	29	290	50	200	8,1	30	300	54	216	8,4
26,0	260	49,0	196	7,3	35	350	46	184	9,8	35	350	52	208	9,8
28,0	280	46,0	184	7,8	40	400	39	156	11,2	40	400	45	180	11,2
30,0	300	45,0	180	8,4	44	440	32	128	12,3	45	450	38	152	12,6
34,0	340	42,0	168	9,5	50	500	15	60	14,0	50	500	28	112	14,0
40,0	400	32,0	128	11,2	54	540	4	16	15,1	55	550	10	40	15,4
44,0	440	22,0	88	12,3	60	600	1,5	6	16,8	60	600	3	12	16,8
46,5	465	12,5	50	13,0	66	660	1	4	18,5	65	650	1,1	4	18,2
48,0	480	7,5	30	13,4	70	700	0	0	19,6	70	700	0,9	4	19,6
52,0	520	2,5	10	14,6	-	-	-	-	-	75	750	0	0	21,0
55,0	550	1,5	6	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60,0	600	1,0	4	16,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66,0	660	0,0	0	18,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70,0	700	0,0	0	19,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. 5: Первая серия данных для  $U_A = 70, 80, 90$  В

Построим на основе этих данных семейство зависимостей  $I_A(B)$ :

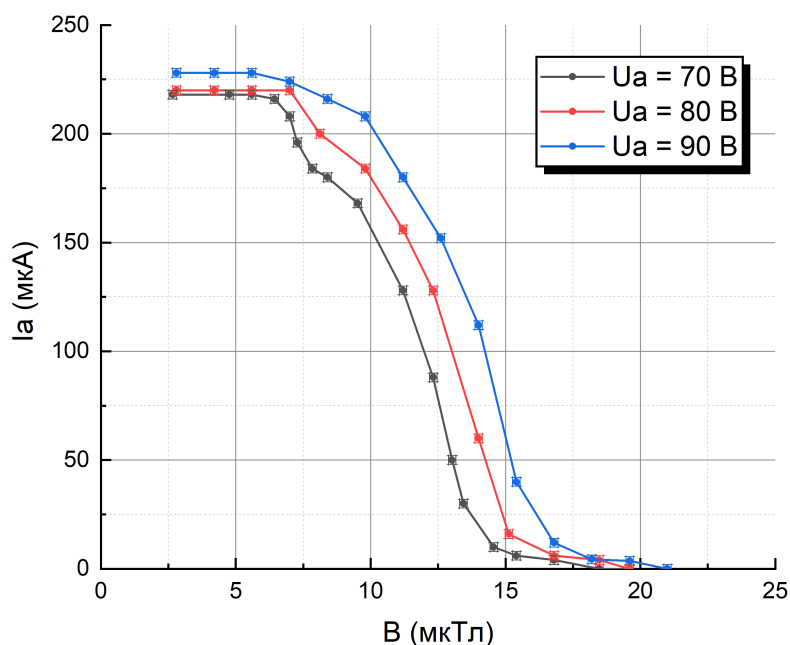


Рис. 6:  $I_A(B)$  для  $U_A = 70, 80, 90$  В

$$B_{кр}(70В) = 11,25 \text{ мкТл} \quad ; \quad B_{кр}(80В) = 12,50 \text{ мкТл} \quad ; \quad B_{кр}(90В) = 13,75 \text{ мкТл}$$

Аналогично внесём данные прямых измерений для  $U_A = 100, 110, 120$  В:

100					110					120				
$I_m$ , дел	$I_m$ , мкА	$I_a$ , дел	$I_a$ , мА	$B$ , мкТл	$I_m$ , дел	$I_m$ , мкА	$I_a$ , дел	$I_a$ , мА	$B$ , мкТл	$I_m$ , дел	$I_m$ , мкА	$I_a$ , дел	$I_a$ , мА	$B$ , мкТл
5	50	54	216	1,4	5	50	54	216	1,4	5	50	55	220	1,4
10	100	54	216	2,8	10	100	54	216	2,8	10	100	55	220	2,8
15	150	54	216	4,2	15	150	54	216	4,2	15	150	55	220	4,2
20	200	54	216	5,6	20	200	54	216	5,6	20	200	55	220	5,6
25	250	54	216	7,0	25	250	54	216	7,0	25	250	55	220	7,0
30	300	51	204	8,4	30	300	54	216	8,4	30	300	55	220	8,4
35	350	48	192	9,8	35	350	52	208	9,8	35	350	54	216	9,8
40	400	47	188	11,2	40	400	51	204	11,2	40	400	52	208	11,2
45	450	42	168	12,6	45	450	46	184	12,6	45	450	51	204	12,6
50	500	34	136	14,0	50	500	40	160	14,0	50	500	44	176	14,0
55	550	21	84	15,4	55	550	32	128	15,4	55	550	39	156	15,4
60	600	5	20	16,8	60	600	16	64	16,8	60	600	28	112	16,8
65	650	2	8	18,2	65	650	3	12	18,2	65	650	9	36	18,2
70	700	1	4	19,6	70	700	2	8	19,6	70	700	2,5	10	19,6
75	750	0,8	3	21,0	75	750	1	4	21,0	75	750	2	8	21,0

Рис. 7: Первая серия данных для  $U_A = 100, 110, 120$  В

Построим на основе этих данных семейство зависимостей  $I_A(B)$ :

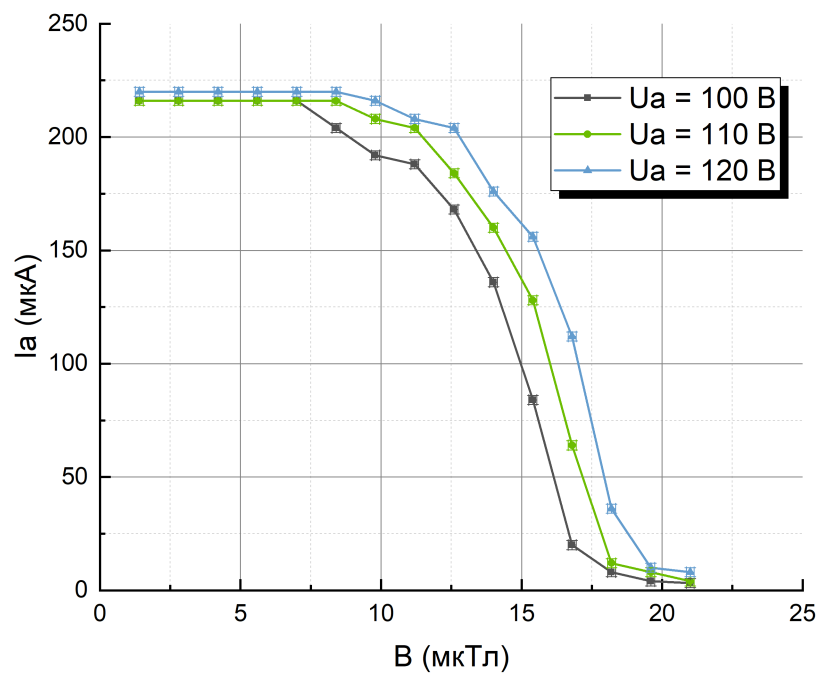


Рис. 8:  $I_A(B)$  для  $U_A = 100, 110, 120$  В

$$B_{кр}(70В) = 14,2 \text{ мкТл} \quad ; \quad B_{кр}(80В) = 15,5 \text{ мкТл} \quad ; \quad B_{кр}(90В) = 16,2 \text{ мкТл}$$

Так как возможно лишь оценить  $B_{кр}$ , то будем считать, что  $\sigma_{B_{кр}} = 0,3 \text{ мкТл}$

## 2.2 Зависимость $B_{кр}^2(U_A)$

Построим график зависимости  $B_{кр}^2(U_A)$  и его линейную аппроксимацию:

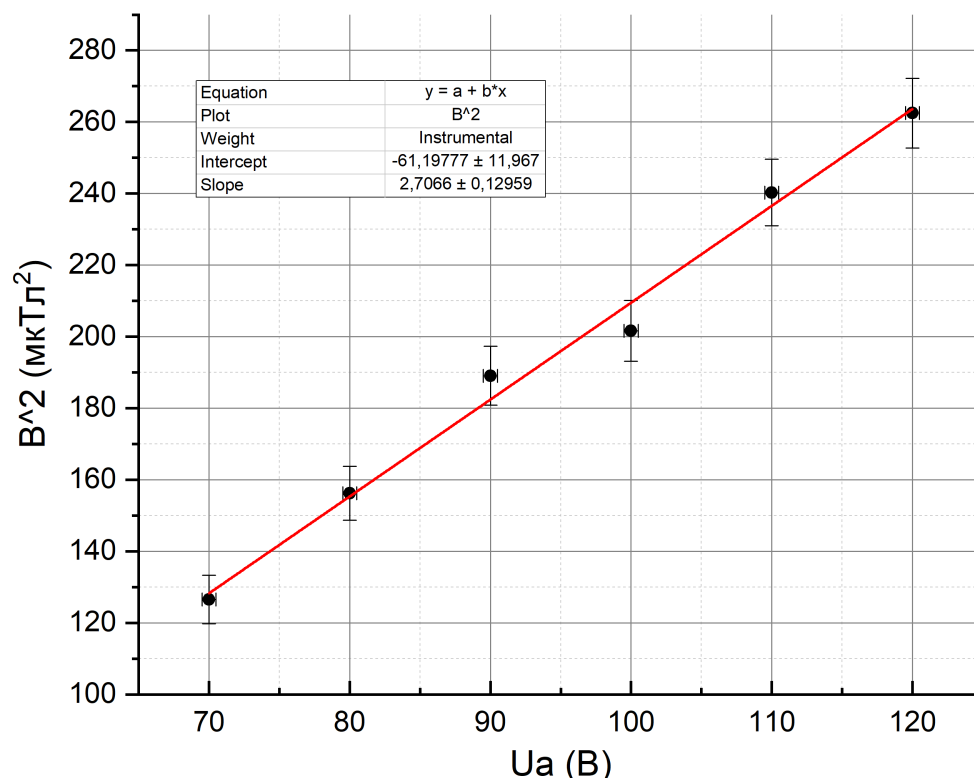


Рис. 9: График  $B_{кр}^2(U_A)$

Как и ожидалось, точки с достаточно высокой точностью легли на прямую

$$\text{Наклон прямой } k = 2,7 \pm 0,1 \frac{(\text{мкТл})^2}{\text{В}} ; \quad \frac{e}{m} = \frac{8}{kr_A^2} = 1,75 \pm 0,08 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

## 3 Вывод

В работе с помощью магнетрона были получены зависимости тока анода от магнитного поля, пронизывающего соленоид, на основе чего была получена зависимость значения критического поля от напряжения между анодом и катодом. После, был посчитан удельный заряд электрона  $\frac{e}{m} = 1,75 \pm 0,08 \text{ Кл/кг}$ , что с высокой точностью совпадает с табличным значением  $\frac{e}{m} = 1,76 \text{ Кл/кг}$ .