укция магнитного поля. Так как магнитная сила перпендикулярна скорости, она не меняет модуля этой скорости, изменяя только направление движения электрона. Для случая магнитного поля, перпендикулярного скорости электрона, формула (1) упрощается

$$F_м = e \cdot v \cdot B. \qquad (2)$$

Если, кроме того, магнитное поле однородно, то магнитная (она же центростремительная) сила остается постоянной по модулю, и электрон движется по окружности. Радиус этой окружности ρ легко найти из равенства [(3), с. 177-178, 381-383; (4), с. 122-124, 208-210]

$$\frac{mv^2}{\rho} = e \cdot v \cdot B, \qquad (3)$$

где m - масса электрона.

Для электрона, ускоренного в электрическом поле разностью потенциалов U, скорость v можно вычислить из баланса кинетической и потенциальной энергий

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

Формула (4) верна, если ускоряющее напряжение U достаточно велико, чтобы можно было пренебречь начальной (до ускорения) кинетической энергией электрона. После исключения из равенств (3) и (4) получается выражение для удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\rho^2 B^2}. \qquad (5)$$

Для вычисления нужно помимо ускоряющего напряжения U и индукции магнитного поля B измерить радиус траектории электронов ρ. Формула (5) справедлива для движения электрона в магнитном и электрическом полях; в этом случае под ρ нужно понимать радиус кривизны траектории электрона в точке, где ускоряющая разность потенциалов равна U.

В этой работе источником электронов служит раскаленный катод К (рис. 1). Потенциал его в дальнейших формулах принимается равным нулю. Электроны движутся в вакууме к цилиндрическому аноду А и ускоряются электрическим полем, соответствующим анодному напряжению U_a. Катод и анод соосны, а радиусы их сильно отличаются друг от друга. Магнитное поле направлено вдоль оси анода и катода. На рис.1 схематически показаны траектории электронов при различных значениях индукции магнитного поля. В отсутствие магнитного поля (рис.1а) электроны движутся по прямой - радиусу. Наложение небольшого однородного магнитного поля, перпендикулярного плоскости рисунка, искривляет траекторию электронов, но они по-прежнему достигают анода (рис.1б). При достаточно большой индукции магнитного поля траектории искривляются столь сильно, что электроны не могут попасть на анод (рис.1в); анодный ток отсутствует [(3), с. 386-389].

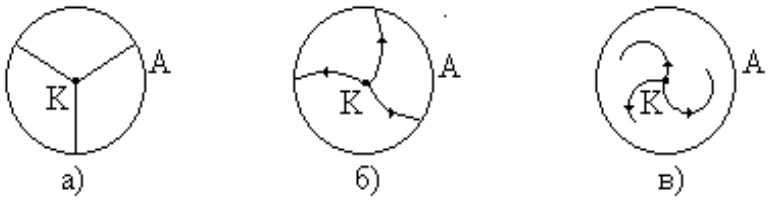

Рис.1

В случае, показанном на рис.2, разграничены режимы, представленные на рис.1б и 1в - траектория электрона касается анода; при соответствующей такому

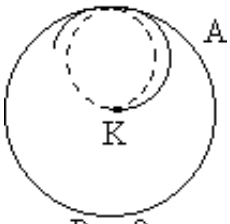

Рис.2

случаю индукции магнитного поля $B_{кр.}$ И заданном анодном напряжении U_a анодный ток обращается в нуль.

Зависимость тока через электронную лампу от индукции магнитного поля называют магнетронным эффектом.

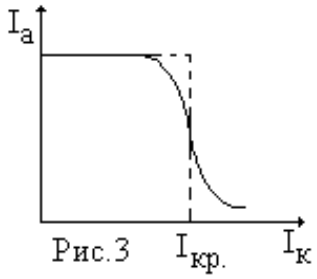

Рис.3

На рис.3 штриховой линией показана такая зависимость для идеального случая «одинаково движущихся всех электронов».

В цилиндрическом конденсаторе напряженность электрического поля обратно пропорциональна расстоянию от оси до исследуемой точки. Можно показать, что при очень большом отношении радиусов анода и катода траектория электрона в точке касания с анодом имеет радиус кривизны, близкий к половине радиуса анода R_a:

$$\rho_{кр.} = \frac{1}{2} R_a . \qquad (6)$$

Задав анодное напряжение U_a, следует увеличить индукцию магнитного поля до значения $B_{кр.}$, при котором прекратится анодный ток I_a, и подставить это значение вместе с критическим радиусом кривизны (6) и условием $U = U_a$ в формулу для расчета удельного заряда (5);

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{R_a^2 B_{кр.}^2} . \qquad (7)$$

Более полный вывод формулы (7) см. в [(5), с. 233-239].

В действительности же анодный ток плавно убывает с увеличением индукции (сплошная кривая на рис. 3), и не так-то легко выделить на этой зависимости нужную индукцию $B_{кр.}$. Конечно, к этому ведет несовершенство прибора: отнюдь не нулевой радиус катода, неточное совпадение его оси с осью анода и направлением магнитного поля, неполная однородность последнего. Но если говорить только о физических процессах в лампе, основных причин плавного спада тока две.

Начальные кинетические энергии электронов могут оказаться сравнимыми с приобретенными в электрическом поле (4), и делается заметным распределение электронов по скоростям. При значениях индукции, близких к $B_{кр.}$, все больше электронов не достигает анода, возрастает объемный заряд между катодом и анодом и оказывается неточной формула (6).

Ясно, как учесть первое из названных искажений. Выше расчет велся для нулевой начальной энергии электрона, то есть для наименьшей его скорости вблизи анода. Поэтому под $B_{кр.}$ следует понимать наименьшее значение индукции, при котором обнаруживается заметное уменьшение анодного тока. В настоящей работе значение критического тока соленоида - $I_{кр.}$ и соответствующее ему критическое значение магнитной индукции - $B_{кр.}$ рекомендуется определять по максимуму производной анодного тока диода от тока соленоида.

Установка

Схема установки приведена на рис.4.

Двухэлектродная лампа (вакуумный диод) конструктивно размещена внутри катушки (соленоиде), создающей магнитное поле. Ток соленоида устанавливается с помощью источника питания соленоида и измеряется миллиамперметром. Пропорциональную этому току индукцию B магнитного поля соленоида вычисляют по формуле

$$B = \mu_o \frac{N}{\ell} K I_\ell ,$$

где μ_o - магнитная постоянная, N - число витков соленоида, ℓ - длина соленоида, K - коэффициент, учитывающий потоки рассеяния, I_ℓ - ток соленоида.

Для подогрева катода служит регулятор «Температура катода T,K». Анодное напряжение устанавливается источником «Анодное напряжение, B». Падение напряжения на анодном сопротивлении R_a выводится в относительных координатах в виде графика $U/U_{max}=U(I_c)$. Критический ток соленоида определяется по максимуму производной по графику (производная тока диода от тока соленоида).

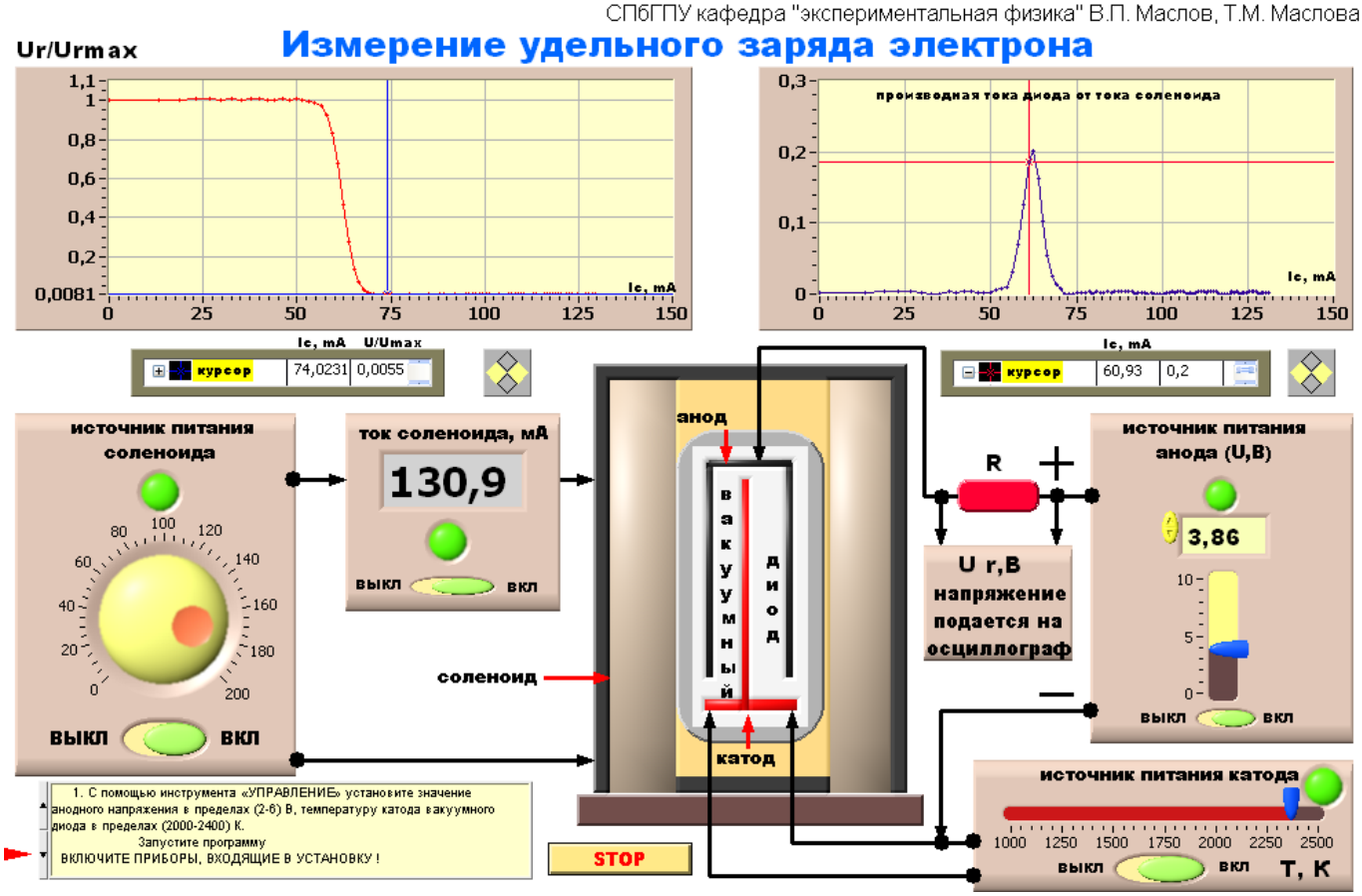

Рис.4

Измерения и обработка результатов

1. Перед запуском программы с помощью инструмента «УПРАВЛЕНИЕ» установите значение анодного напряжения в пределах (2-6) В, температуру катода вакуумного диода в пределах (2000-2400) К. Запустите программу и, изменяя ток соленоида с помощью источника питания соленоида, наблюдайте снимаемые зависимости.
2. При рекомендованных анодных напряжениях снимите значения U/U_{max} и I_ℓ. По графику «производная тока диода от тока соленоида» определите критическое значение тока соленоида (по максимуму производной). Результаты измерений занесите в таблицу 1. Результаты снимайте с помощью курсора.

Таблица 1

U_a =2 В		U_a =4 В		U_a =6 В		U_a =8 В		U_a =10В	
I_ℓ, мА	U/U_{max}	I_ℓ, мА	U/U_{max}	I_ℓ, мА	U/U_{max}	I_ℓ, мА	U/U_{max}	I_ℓ, мА	U/U_{max}
$I_{кр.}$= ..... мА $B_{кр.}$= ..... мТл e/m = ... Кл/кг		$I_{кр.}$= ..... мА $B_{кр.}$= ..... мТл e/m = ... Кл/кг		$I_{кр.}$= ..... мА $B_{кр.}$= ..... мТл e/m = ... Кл/кг		$I_{кр.}$= ..... мА $B_{кр.}$= ..... мТл e/m = ... Кл/кг		$I_{кр.}$= ..... мА $B_{кр.}$= ..... мТл e/m = ... Кл/кг	
<$I_{кр.}$> = ... мА;		<$B_{кр.}$> = ... мТл;		<e/m> = ... Кл/кг					

3. При необходимости постройте семейство зависимостей $U/U_{max}=f(I_c)$.
4. Вычислите критическую индукцию $B_{кр.}$ и удельный заряд электрона e/m по формулам

$$B = \mu_o \frac{N}{\ell} K I_\ell, \quad \frac{e}{m} = \frac{8U_a}{R_a^2 B_{кр.}^2}$$

Занесите значения в таблицу 1.

5. Аналогичные операции проведите для других значений анодного напряжения.

6. Усредните полученные частные значения удельного заряда электрона e/m и оцените погрешность его измерения. Рекомендуется оценивать погрешность по отклонениям от среднего (см. [2, с.27-28]).

Литература

1. Электричество и магнетизм (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1997
2. Обработка экспериментальных результатов (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1998.
3. Калашников С.Г. Электричество. М., Наука, 1985, с.576
4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М., Высшая школа, 1983
5. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3, М., Наука, 1987, с.317