

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Движение заряженных частиц в комбинированных статических электрических и магнитных полях

**к.ф.-м.н., профессор
Гамаюнов Ю.Г.**

Саратов, СГУ, кафедра электроники, колебаний и волн

1. Введение

Закономерности движения заряженных частиц под действием электрического и магнитного полей являются основой понимания широкого круга явлений. Потоки заряженных частиц, особенно пучки электронов, являются неотъемлемой частью многих физических приборов и устройств. Так, взаимодействие потока движущихся электронов с электромагнитными полями лежит в основе действия электронных приборов СВЧ, используемых в качестве усилителей и генераторов (ЛБВ, ЛОВ, клистроны, магнетроны и т.д.). Пучки электронов и ионов используются в электронно-лучевых трубках, электронных микроскопах, плазмотронах и т.д. Требуемые параметры этих пучков получают при воздействии на них электрических и магнитных полей определенной величины и конфигурации. Поэтому важно знать закономерности движения заряженных частиц в комбинированных электрических и магнитных полях. Целью данной работы является изучение движения заряженных частиц в комбинированных статических, электрических и магнитных полях на примере цилиндрического диода и электронно-лучевой трубки.

2. Теоретическая часть

2.1. Силы, действующие на заряженную частицу, и уравнение движения

Рассмотрим движение заряженных частиц под действием электрического поля с напряженностью \vec{E} и индукцией магнитного поля \vec{B} . Размеры частицы столь малы, что заряд можно считать точечным. Сила \vec{F} , действующая на частицу, выражается формулой:

$$\vec{F} = e\vec{E} + e[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1)$$

где e – заряд частицы, \vec{v} – её скорость.

Для электрона, движущегося с нерелятивистскими скоростями, уравнение движения (1), учитывая отрицательный заряд электрона, можно переписать в следующем виде:

$$m(d\vec{v} / dt) = -e\vec{E} - e[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2)$$

Выведем закон сохранения энергии для электрона, движущегося под действием комбинированного поля. Предположим, что электрон движется между точками A и B по какой-либо траектории. Проинтегрируем обе части уравнения (2) вдоль траектории движения:

$$\int_A^B m(d\vec{v} / dt) d\vec{r} = -e \int_A^B \vec{E} d\vec{r} - e \int_A^B [\vec{v} \times \vec{B}] d\vec{r} \quad (3)$$

Левую часть уравнения (3) можно переписать в следующем виде:

$$\int_A^B m(d\bar{v}/dt)d\bar{r} = \int_{v_1}^{v_2} m(d\bar{r}/dt)d\bar{v} = \int_{v_1}^{v_2} m\bar{v}d\bar{v} = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2)$$

Первый член правой части уравнения (3) выражается следующим образом:

$$e \int_A^B \bar{E} d\bar{r} = -e \int_A^B \text{grad} V d\bar{r} = -e(V_2 - V_1),$$

где V_2 и V_1 потенциалы в точках B и A .

Второй член правой части уравнения (3) равен нулю, так как векторы \bar{v} и $d\bar{r}$ параллельны, и, следовательно, значение смешанного произведения равно нулю. В результате получим:

$$(mv_2^2 - mv_1^2)/2 = e(V_2 - V_1) \quad (4)$$

Отсюда видно, что приращение кинетической энергии электрона, движущегося в статическом электрическом и магнитном поле, однозначно определяется только пройденной разностью потенциалов $V_2 - V_1$. Магнитное поле не вошло в это энергетическое соотношение. Это связано с тем, что сила Лоренца в любой точке траектории перпендикулярна к скорости электрона и, следовательно, не совершает работы по изменению её величины. Магнитное поле изменяет лишь форму траектории электрона, поскольку оно влияет на направление скорости движения, но не на величину скорости.

2.2. Движение электрона в цилиндрическом диоде во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях

Рассмотрим цилиндрический диод, помещенный в однородное магнитное поле, направленное вдоль оси диода (рис.1). Между анодом и катодом действует электрическое поле. Перпендикулярные электрические и магнитные поля называют скрещенными полями, а диоды со скрещенными полями называются магнетронными диодами.

Пусть электрон стартует с катода с нулевой начальной скоростью. Под действием электрического поля он начнет двигаться к аноду, а так как имеется ещё магнитное поле, то возникающая при этом сила Лоренца будет «заворачивать» электрон. Поэтому по мере движения электрона будет меняться направление его скорости, а также и направление силы Лоренца (они всегда перпендикулярны). Если магнитное поле достаточно велико, то электрон, описав некоторую кривую, вернется на катод (рис.1, траектория 1). Если уменьшать магнитное поле, то сила Лоренца уменьшится, и электрон сможет достигнуть анода (траектории 2,3). Траектории 2 соответствует критическое магнитное поле $B_{кр}$, при котором электроны подходят к аноду по касательной. При $B < B_{кр}$ электрон, достигая

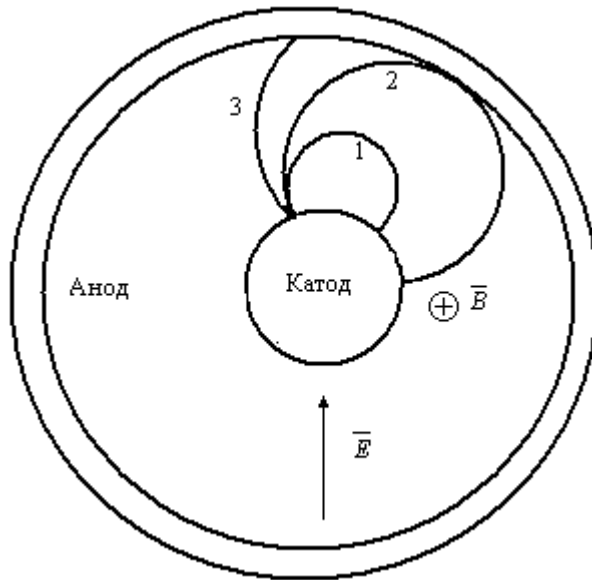


Рис.1. Траектории электронов в магнетронном диоде в зависимости от величины магнитного поля:

$$1-B > B_{кр}; 2-B = B_{кр}; 3-B < B_{кр}$$

анода, создает анодный ток, при $B > B_{кр}$ диод заперт, анодный ток отсутствует.

Схематично это показано на рис.2. Найдем значение критического магнитного поля $B_{кр}$ в зависимости от

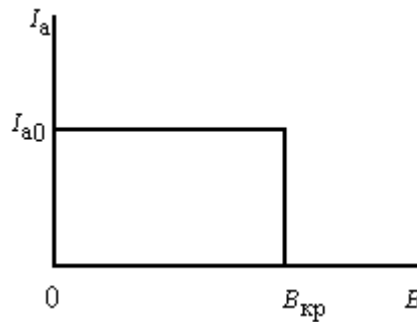


Рис.2. Зависимость анодного тока идеального диода от магнитного поля

геометрии диода и анодного напряжения. Движение электрона в тангенциальном направлении описывается основным уравнением вращательного движения, которое в нашем случае имеет вид:

$$d(mv_{\tau}r)/dt = eBrdr/dt, \quad (5)$$

где $mv_{\tau}r$ - момент импульса электрона, v_{τ} - тангенциальная скорость электрона, $eBrdr/dt$ - момент действующей силы. Интегрируя уравнение (5) при условии нулевой начальной скорости электрона на катоде, т.е. полагая, что при $r = r_k \frac{dr}{dt} = 0$, получим

$v_{\tau} = \frac{r^2 - r_{\kappa}^2}{r} \frac{eB}{2m}$. Тангенциальная скорость электрона при достижении им анода ($r = r_a$)

будет равна:

$$v_{\tau} = \frac{r_a^2 - r_{\kappa}^2}{r} \frac{eB}{2m} \quad (6)$$

Если величина магнитного поля равна критическому значению, то на аноде полная скорость электрона равна тангенциальной скорости $v_{\tau} = v_a$. Из закона сохранения энергии (4) можно найти полную скорость электрона на аноде:

$$v_a^2 = 2 \frac{e}{m} V_a \quad (7)$$

Объединяя формулы (6) и (7), найдем выражение для значения критического магнитного поля:

$$B_{\text{кр}}^2 = \frac{8mV_a}{er_a^2 \left(1 - \frac{r_{\kappa}^2}{r_a^2}\right)^2} \quad (8)$$

Формула (8) может быть использована для определения удельного заряда электрона. Для этого при выбранном анодном напряжении изменяют величину магнитного поля до тех пор, пока не наступит отсечка анодного тока (рис.2). Очевидно, что магнитное поле, соответствующее отсечке, будет являться критическим. Тогда, из формулы (8), получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8V_a}{B_{\text{кр}}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_{\kappa}^2}{r_a^2}\right)^2} \quad (9)$$

Видно, что по известной геометрии диода, известном V_a и найденном $B_{\text{кр}}$ несложно

определить удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$. В реальном диоде зависимость анодного тока

от магнитного поля имеет вид, схематично представленный на рис.3. Отличие от зависимости на рис.2 связано со многими причинами, одной из которых является пространственный заряд электронов в промежутке анод-катод, который не учтен в расчетах. Расчеты на ЭВМ показывают, что движение электронов в закритическом режиме ($B > B_{\text{кр}}$) происходит по сложным, неповторяющимся траекториям. Электронное облако непрерывно «кипит», выбрасывая электроны на анод, и является стационарным лишь в среднем. Заметим, что

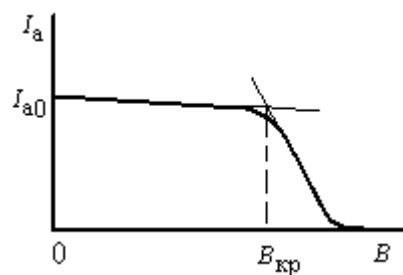


Рис.3. Зависимость анодного тока реального диода от магнитного поля

хорошей даже качественной картины такого нестационарного процесса до сих пор не существует. К числу причин, приводящих к отличию характеристики реального диода от идеальной, следует отнести также присутствие в диоде газов, выбивание с катода быстрых вторичных электронов, некоаксиальность катода и анода и т.д.

2.3. Движение электрона в продольном магнитном поле

Выясним особенности движения электрона в продольном магнитном поле. Пусть электрон, ускоренный напряжением V_a , влетает в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} параллельно силовым линиям. В этом случае сила Лоренца будет равна нулю, и электрон продолжит равномерное прямолинейное движение вдоль поля. Если на пути движения электрона до влета в однородное магнитное поле поместить плоский конденсатор, между обкладками которого приложено отклоняющее напряжение, то это приведет к появлению у электрона компоненты скорости, перпендикулярной к вектору индукции, и, следовательно, в области однородного магнитного поля на электрон начнет действовать сила Лоренца, что приведет к движению электрона по окружности с циклотронной частотой $\omega_c = eB/m$ в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.

Радиус окружности R определится из равенства центростремительной силы mv_{\perp}^2/R (v_{\perp} - компонента скорости, перпендикулярная магнитному полю), и силы Лоренца $ev_{\perp}B$. Наличие же ещё продольной скорости v_{\parallel} у электрона приведет к тому, что результирующее движение будет происходить по спирали (рис. 4). Если за отклоняющими пластинами конденсатора поместить экран, покрытый люминофором, то в месте попадания луча на экран будет светящееся пятнышко. Выясним, как будет изменяться положение пятна на экране при изменении магнитного поля. Очевидно, при отсутствии отклоняющего напряжения и магнитного поля пятно будет в центре экрана. При наличии между пластинами отклоняющего электрического поля \vec{E} , создаваемого отклоняющим напряжением, и магнитного поля за пластинами электрон будет попадать в точку на экране, положение которой будет определяться пересечением спирали и экрана.

Положение этой точки зависит от произведения циклотронной частоты ω_c и времени t пролета электрона от пластин до экрана. Величина $\theta = \omega_c t$ называется углом пролета. При увеличении t (например, если не фиксировать расстояние от пластин до экрана, а мысленно сдвигать экран) угол пролета θ будет линейно нарастать, а на экране электроны будут попадать последовательно в точки, лежащие на окружности с радиусом, равным радиусу спирали. В случае, если положение экрана фиксировано и изменяется магнитное поле, то движение светящегося пятна по экрану будет более сложным, так как от магнитного поля зависит не только угол пролета $\theta = \omega_c t$, но и радиус спирали, по которой движется

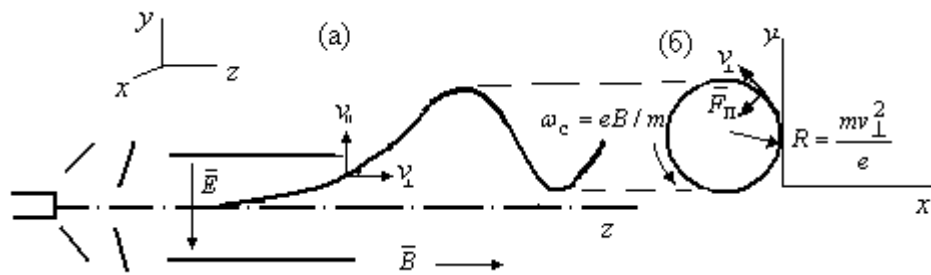


Рис.4. Проекция траектории электрона на плоскость yz (а) и плоскость xy (б) при движении в продольное магнитное поле

электрон. В этом случае след на экране, оставляемый светящимися пятном, будет иметь вид, схематично представленный на рис.5. Попадание электронов в точку вблизи центра экрана соответствует условию $\theta = 2\pi n$. Учитывая, что $\theta = \omega_c t$, $\omega_c = eB/m$, $t = D/v_{||}$, – где D – расстояние от отклоняющих пластин до экрана, $v_{||} = \sqrt{2eV_a/m}$ – продольная скорость, можно найти удельный заряд электрона: Таким образом, зная величину магнитного поля при n -ом прохождении электронного луча через центр экрана и величину ускоряющего потенциала, можно определить удельный заряд электрона. Формула (10) получена в предположении, что в области конденсатора магнитного поля нет. На практике, например, в электронно-лучевой трубке, помещенной в магнитное поле, магнитное поле есть и в области отклоняющих пластин. Поэтому формула (10) не совсем точна, так как при её выводе не учтен этап

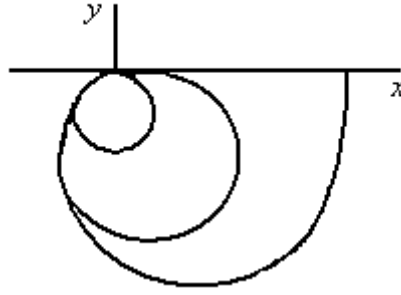


Рис.5. След на экране от электронного луча при изменении магнитного поля

$$\frac{e}{m} = 8(\pi n)^2 \cdot \frac{V_a}{B^2 D^2} \quad (10)$$

движения электрона в конденсаторе. Поэтому рассмотрим более строго движение электрона в электронно-лучевой трубке, помещенной в однородное магнитное поле. Задача нахождения траектории электрона в электронно-лучевой трубке, помещенной в магнитное поле, разбивается на две. Первая – движение электрона между отклоняющими пластинами, т.е. в поперечном электрическом поле и в продольном магнитном с начальными условиями $r = \dot{r} = 0$ (электрон влетает вдоль оси системы). Вторая – движение электрона в продольном магнитном поле, где начальными условиями являются координаты и скорость электрона на выходе из отклоняющих пластин. Уравнение движения электрона в общем случае имеет вид:

$$\frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = -\frac{e}{m} \cdot \bar{E} - e[\bar{v} \bar{B}] \quad (11)$$

Пусть оси координат имеют направление, как на рис.4. Тогда в первой задаче имеем компоненты магнитного поля $\bar{B}(0,0,B)$ и компоненты напряженности отклоняющего электрического поля $\bar{E}(E,0,0)$. Записывая уравнение (11) в координатах x, y и вводя замену $\xi = x + jy$ после интегрирования уравнения (11) получим:

$$\dot{\xi}_d = j \cdot \frac{E}{B} (e^{-j\varphi} - 1) \quad (12a)$$

$$\xi_d = \frac{E}{\omega_c B} (e^{-j\varphi} + j\varphi - 1), \quad (12б)$$

где $\dot{\xi}_d$ - комплексная поперечная скорость вылета электрона из отклоняющихся пластин,

ξ_d - комплексная поперечная координата вылета электрона из отклоняющихся пластин,

$\varphi = \omega_c \tau$ - угол пролета электрона в отклоняющихся пластинах,

$\tau = d \sqrt{2eV_a / m}$ - время пролета электрона в отклоняющих пластинах, имеющих длину d .

Используя (12а, 12б) в качестве начальных условий для второй задачи, аналогично получим:

$$\xi_D = \frac{E}{\omega_c B} [e^{-j\theta} (e^{-j\varphi} - 1) + j\varphi], \quad (13)$$

где ξ_D – комплексная поперечная координата электрона на экране,

$\theta = \omega_c t$ – угол пролета электрона от отклоняющих пластин до экрана;

t – время пролета электрона от отклоняющих пластин до экрана.

Учитывая в (13), что $(e^{-j\varphi} - 1) = -2j \sin(\varphi/2) \cdot e^{-j\varphi/2}$ и полагая φ малым, так что $\sin \varphi/2 \cong \varphi/2$, получим:

$$\xi_D = j \frac{E\varphi}{\omega_c B} [1 - e^{-j(\theta + \varphi/2)}] \quad (14)$$

или в координатах $x = -R \cdot \sin(\theta + \frac{\varphi}{2})$, $y = R \cdot [1 - \cos(\theta + \frac{\varphi}{2})]$ где $R_c = \frac{E}{B} \tau$.

Условием попадания луча в центр экрана является равенство нулю координат x и y , что выполняется, если

$$(\theta + \frac{\varphi}{2}) = 2\pi n \quad (15)$$

Так как $\theta = \omega_c D / \sqrt{2eV_a / m}$, $\varphi = \omega_c d / \sqrt{2eV_a / m}$, то, подставляя их значения в формулу (15) и выражая из неё удельный заряд электрона, получим:

$$\frac{e}{m} = 32(\pi n)^2 \cdot \frac{V_a}{B^2 (2D + d)^2} \quad (16)$$

Формула (16) при $d \rightarrow 0$ переходит в формулу (10). При выводе формулы (16) было использовано условие малости угла пролета φ .

Оценим правомерность этого допущения. Выразим θ через φ :

$$\theta = \omega_c t = \omega_c \tau \frac{t}{\tau} = \varphi \frac{t}{\tau} = \varphi \frac{D}{d}$$

Так как $(\theta + \frac{\varphi}{2}) = 2\pi n$, то $(\varphi \frac{D}{d} + \frac{\varphi}{2}) = 2\pi n$. В работе используется трубка, у которой

$D = 10$ см, $d = 1$ см, следовательно, $\frac{\varphi}{2} = \frac{\pi n}{10.5}$. Таким образом, при $n = 1 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\varphi}{2}$

с точностью до 1,5%, при $n=2$ – с точностью 6,2%, при $n=3$ с точностью 14,8%, что вполне приемлемо для практики. Заметим, что строгое условие попадания луча в центр экрана – равенство нулю выражения в квадратных скобках уравнения (13) – не выполняется при ненулевых электрических полях. Поэтому луч никогда не попадёт в центр экрана. Это объясняется тем, что электрон покидает отклоняющие пластины в точке с поперечными

координатами, определяемыми формулой (12б), которые равны нулю только при $E = 0$, и далее электрон летит по спирали, касающейся прямой, параллельной оси системы, но отстоящей от оси на расстояние ξ_d . Поэтому на экране луч при $\theta = 2\pi n$ тоже будет проходить через точку, отстоящую от начала координат на величину ξ_d . Тем не менее, для простоты при определении удельного заряда электрона мы будем использовать формулу (16), подставляя в неё значения B и V_a , при которых электроны попадают на экран в точку на наименьшем расстоянии от центра экрана.

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание экспериментальной установки. Обработка результатов

В экспериментальной установке определение удельного заряда электрона $\frac{e}{m}$ проводится с использованием магнетронного диода или электронно-лучевой трубки, которые помещены в магнитное поле. На рис.6 представлена принципиальная электрическая схема установки для измерения удельного заряда электрона при помощи магнетронного диода. Цилиндрический диод помещен между полюсными наконечниками электромагнита таким образом, что ось диода параллельна магнитному полю. Анодное напряжение V_a диода можно изменять в пределах от 150 до 400В потенциометром «Анод» источника G1. Контролируется анодное напряжение встроенным в источник вольтметром. Величина анодного тока диода измеряется миллиамперметром PA1. В установке предусмотрена регулировка тока электромагнита, питаемого от источника G2. Величина тока измеряется амперметром PA2. В установке

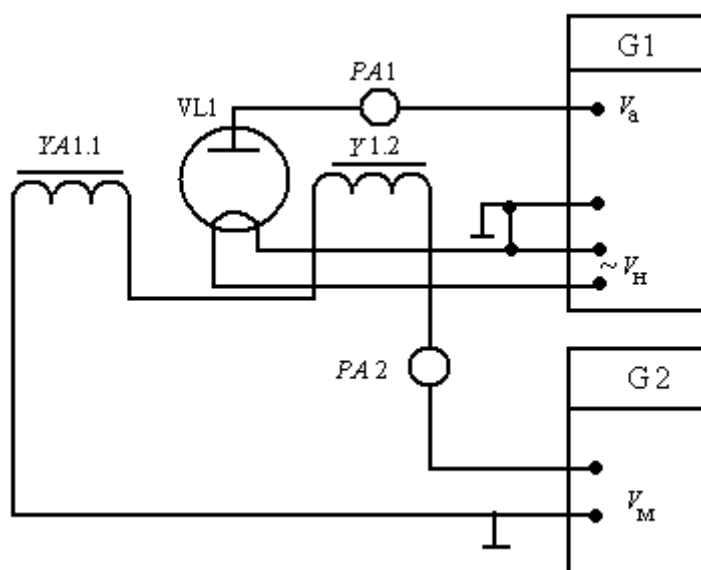


Рис.6. Схема электрическая принципиальная для определения удельного заряда электрона с помощью магнетронного диода

предусмотрена регулировка тока электромагнита, питаемого от источника G2. По величине тока определяется индукция магнитного поля по формуле $B = 0,092I_m$, где B – индукция магнитного поля, Тл, I_m – ток магнита, А. В эксперименте снимается зависимость анодного тока I_a от величины магнитного поля B при нескольких значениях анодного напряжения V . Для определения величины $\frac{e}{m}$ необходимо построить

зависимости $\frac{I_a}{I_{a0}} = f\left(\frac{B}{\sqrt{V_a}}\right)$ для каждого V , где I_{a0} – ток в отсутствии магнитного поля

при выбранной величине V , и по ним определить значения $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$ соответствующие резкому

спаду тока, т.е. при критическом режиме работы диода. Усреднив значения $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$, по

формуле (9) вычисляют удельный заряд электрона, используя найденное усредненное

значение $\frac{B}{\sqrt{V_a}} = \frac{B_{кр}}{\sqrt{V_a}}$ и известные геометрические размеры диода. На рис.7 представлена

принципиальная электрическая схема установки для определения удельного заряда электрона при помощи электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Источник G3 обеспечивает питание ЭЛТ и позволяет регулировать ускоряющее, фокусирующее и отклоняющее напряжения. Величины отклоняющего $V_{откл}$ и ускоряющего V_0 напряжений измеряются вольтметрами, встроенными в источник. ЭЛТ помещена в длинный соленоид, создающий однородное магнитное поле, параллельное оси трубки. Источник G4 позволяет изменять величину тока, протекающего через соленоид, и тем самым величину магнитного поля. Ток соленоида I_c измеряется амперметром РА3. Индукция (в теслах) магнитного поля длинного соленоида вычисляется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 N}{L} I_c \quad (12)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, $\frac{В \cdot с}{А \cdot м}$, N – число витков соленоида, L – длина

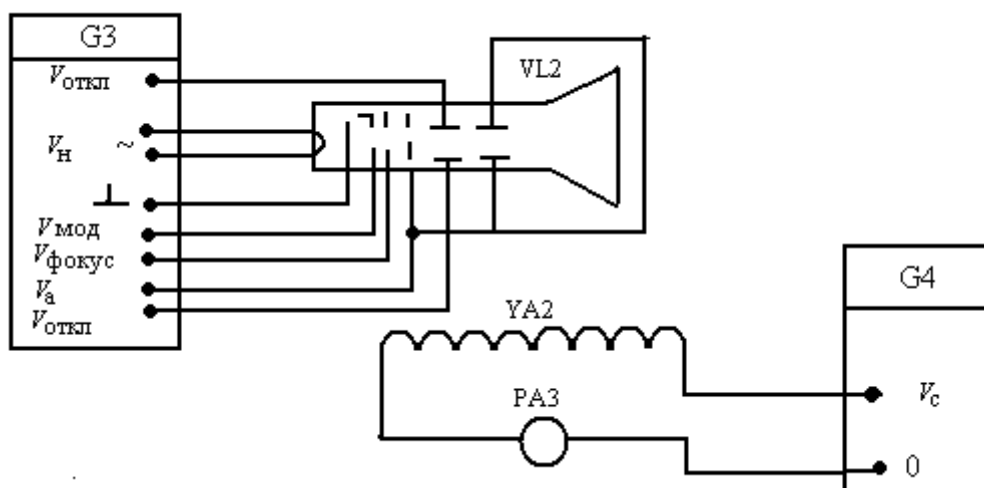


Рис. 7. Схематическое изображение экспериментальной установки с ЭЛТ

соленоида, м. В процессе эксперимента вначале следует сфокусировать луч в центре экрана ЭЛТ при нулевом магнитном поле и отклоняющем напряжении. Затем, выставив отклоняющее напряжение и увеличивая магнитное поле, получают кривую, изображенную на рис.5, определяя всякий раз величину магнитного поля, при которой луч проходит вблизи центра трубки. Прделав аналогичные измерения для других значений отклоняющего и ускоряющего напряжений, необходимо построить зависимости

$\frac{B}{\sqrt{V_a}} = f\left(\frac{V_{откл}}{V_a}\right)$. В координатах, $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$, $\frac{V_{откл}}{V_a}$ экспериментальные точки должны лечь на

прямые линии, соответствующие $\theta = 2\pi n$. Значение n означает сколько раз пятно

проходит вблизи центра трубки. Графически усредненные для каждого n значения $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$

подставляются в формулу (16) для расчета удельного заряда электрона.

Задание

1. Снять семейство зависимостей анодного тока I_a в магнетронном диоде от величины магнитного поля B при значениях анодного напряжения в интервале 150-600 В.

2. Построить полученное семейство зависимостей в координатах $\frac{I_a}{I_{a0}}$, $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$, где I_{a0} - величина анодного тока в отсутствии магнитного поля.

3. Определить из построенного графика среднюю величину $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$, соответствующую критическому режиму, и по формуле (9) вычислить удельный заряд электрона.

4. Сфокусировать луч в центре ЭЛТ при отсутствии отклоняющего напряжения и магнитного поля.

5. Выставить отклоняющее напряжение $V_{\text{откл}}$ так, чтобы пятно сместилось к краю экрана, и, увеличивая магнитное поле, получить кривую, подобную изображенной на рис.5. При этом ускоряющее напряжение V_a выбрать в интервале 200-600В. При прохождении луча вблизи центра экрана соответственно при $n = 1, 2, 3, \dots$ измерить ток соленоида и по формуле (12) вычислить величину магнитного поля. Измерения провести при 3-4 значениях ускоряющего напряжения.

6. Построить график в координатах $\frac{B}{\sqrt{V_a}}, \frac{V_{\text{откл}}}{V_a}$. Графически усредняя полученные значения $\frac{B}{\sqrt{V_a}}$ для каждого n , определить по формуле (16) удельный заряд электрона.

В экспериментальной установке использованы диод и ЭЛТ со следующими параметрами:

радиус катода диода $r_k = 8 \cdot 10^{-4}$ м,

радиус анода диода $r_a = 4 \cdot 10^{-3}$ м,

длина отклоняющих пластин $d = 10^{-2}$ м,

расстояние от края отклоняющих пластин до края экрана $D = 0,1$ м,

длина соленоида $L = 0,36$ м,

число витков соленоида $N = 3\ 480$.

Литература

1. Арцимович, С.Ю Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электронных и магнитных полях./ Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов. М.: Физ.мат.лит. 1978. С.103-126.

2. Гапонов В.И. Электроника. Ч.1 / В.И. Гапонов.М.: Физ.мат.лит, 1960. С.21-31.

3. Гамаюнов Ю.Г. Пособие к лабораторным работам по физической электронике. / Гамаюнов Ю.Г., Радин Ю.П., Кипчатов А.А. Саратов:Изд-во СГУ, 1987. С.58-72.

Контрольные вопросы

1. Объясните зависимость анодного тока магнетронного диода от величины магнитного поля при фиксированном анодном напряжении.

2. Получите выражение для критического магнитного поля в плоском магнетронном диоде.

3. Нарисуйте зависимость анодного тока магнетронного диода от величины магнитного поля при $V_a = V_1$ и $V_a = 2V_1$ на одном графике. При каком магнитном поле произойдет отсечка анодного тока для $V_a = 2V_1$, если для $V_a = V_1$ критическое магнитное поле составляет $5 \cdot 10^{-2}$ Т.

4. Объясните поведение светящегося пятна на экране электронно-лучевой трубки при изменении величины магнитного поля. Нарисуйте траекторию пучка в трубке.

5. Оцените частоту вращения электронов в ЭЛТ, если ток в соленоиде 1 А.

6. Светящееся пятно прошло через центр экрана в первый раз при токе соленоида 1 А. При каком токе пятно пройдет через центр во второй раз?