

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы: Экспериментально определить величину удельного заряда электрона.

Обоснование метода измерения

Магнетроном называется **двухэлектродная** лампа, помещенная во внешнее магнитное поле. Электроны за счет термоэлектронной эмиссии вылетают из катода, попадают в электрическое поле, определяемое конфигурацией катода-анода, и летят к аноду. Наряду с электрическим полем электроны подвергаются воздействию внешнего магнитного поля. В простейшем случае катод и анод представляют собой коаксиальные цилиндры ($R_k \ll R_a$), а магнитное поле создается соленоидом, в который помещается лампа. Вектор индукции внутри лампы направлен вдоль катода и анода (рис.1). Движение электронов происходит в кольцевом пространстве, заключенном между анодом и катодом.

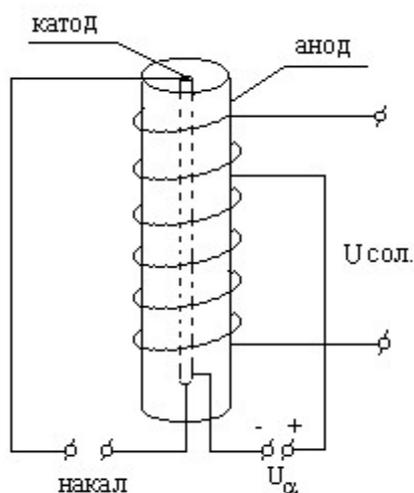


Рис. 1

Отметим основные особенности движения электронов. При этом будем полагать:

- 1) что скорость вылета электронов из катода мала, и ею можно пренебречь, т.е. $V_0 = 0$;
- 2) что радиус катода $R_k = 0$, вследствие того, что радиус анода $R_a \gg R_k$

В отсутствие магнитного поля ($B = 0$) электроны летят к аноду прямолинейно по радиусам под действием силы электрического поля.

$$\vec{F}_r = -e\vec{E}r \quad (1)$$

Вектор \vec{E} направлен вдоль радиуса от анода к катоду.

При включении магнитного поля \vec{B} на движущийся электрон будет действовать сила Лоренца [1].

$$\vec{F}_L = -e[\vec{V}, \vec{B}] \quad (2)$$

где $-e$ - заряд электрона; \vec{V} - скорость движения электрона; \vec{B} - индукция магнитного поля.

Согласно уравнению (2) эта сила направлена перпендикулярно скорости движения электрона и индукции магнитного поля.

На рис. 3 показано направление силы Лоренца в момент вылета электрона из катода. Под действием этой силы траектория движения из прямолинейной превращается в криволинейную (рис.2). Сила Лоренца не

изменяет величины скорости, а только - ее направление [2]. Пока магнитное поле невелико, все электроны попадают на анод (рис.2,б). Чем больше индукция магнитного поля \vec{B} , тем меньше радиус кривизны траектории, и при некотором значении $\vec{B}_{кр}$ (критическое) траектория электрона искривляется так, что почти касается анода (рис.2,в).

При $\vec{B} > \vec{B}_{кр}$ электроны не достигают анода (рис.2,г), и анодный ток падает до нуля. Следует отметить, что траектории движения электронов, строго говоря, не представляют собой окружности, так как скорости электронов изменяются под действием силы электрического поля. Траектория движения в этом случае представляет собой эпициклоиду.

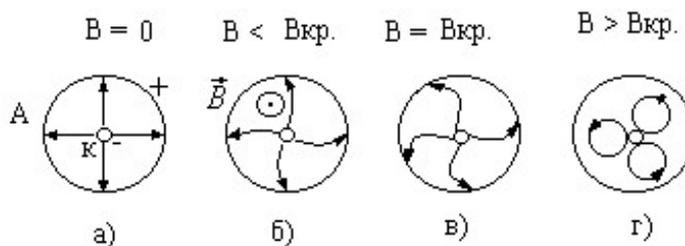


Рис.2

Характеристика магнетрона - зависимость анодного тока I_a от индукции магнитного поля B показана на рис.4. Если исходить из предположения, что для всех электронов $V_0 = 0$, то зависимость $I_a = f(B)$ должна иметь вид кривой 1 (рис.4). Практически же получаемые характеристики имеют вид кривой 2 на рис.4. Это происходит от того, что электроны, движущиеся от катода к аноду, имеют различные скорости ($V_0 \neq 0$), кроме того, всегда существует некоторое отступление от строгой симметрии в размерах цилиндрических электродов.

Экспериментальное определение критического магнитного поля $B_{кр}$ позволяет рассчитать удельный заряд электрона $\left(\frac{e}{m}\right)$. Рассмотрим эту возможность.

В условиях критического магнитного поля $B_{кр}$ для электронов, попадающих на анод (определяющих величину анодного тока), справедливо следующее: на пути от катода к аноду ускоряющее электрическое поле совершит работу по перемещению электрона, равную $A = eU_a$. Согласно закону сохранения энергии

$$eU_a = \frac{mV_{кр}^2}{2}, \quad (3)$$

где U_a - анодное напряжение; e - заряд электрона; m - масса электрона; $V_{кр}$ - критическая скорость электрона.

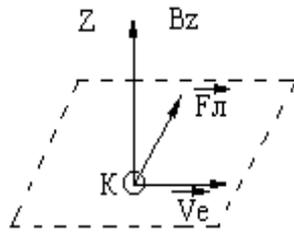


Рис. 3

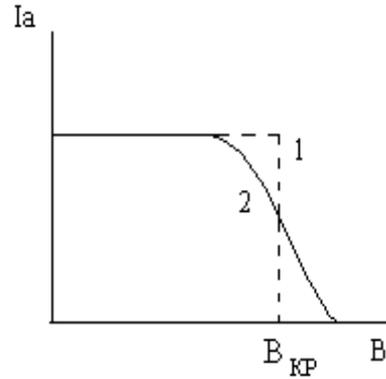


Рис. 4

При коаксиальной конструкции катода и анода ускорение электрона электрическим полем осуществляется в основном в небольшой области вблизи катода. Следовательно, в остальной области ускорение электрона связано только с силой Лоренца.

Тогда, согласно второму закону Ньютона, можно записать

$$m\vec{a} = \vec{F}_L \quad (4)$$

Так как сила Лоренца \vec{F}_L перпендикулярна скорости движения электрона \vec{V} , то \vec{a} в уравнении (4) является нормальным ускорением и, следовательно, $a = \frac{V_{KP}^2}{r_{KP}}$, где r_{KP} - радиус кривизны траектории электрона при критическом магнитном поле.

Уравнение (4) может быть записано

$$\frac{mV_{KP}^2}{r_{KP}} = eV_{KP}B_{KP} \quad (4^x)$$

В условиях B_{KP} , $r_{KP} = \frac{R_\alpha}{2}$ (рис.2,в). Из соотношений (3) и (4^x) следует

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_\alpha}{B_{KP}^2 R_\alpha^2} \quad (5)$$

Так как магнитное поле создается соленоидом, длина которого намного больше его диаметра, то

$$B_{KP} = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I_{KP}, \quad (6)$$

где μ_0 - магнитная постоянная; μ - относительная магнитная проницаемость среды ($\mu = 1$); I_{KP} - критический ток через соленоид; N - число витков соленоида; l - длина соленоида.

Согласно (5) с учетом (6), находим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_\alpha}{\left(\mu\mu_0 \frac{N}{e} \cdot I_{KP}\right)^2 \cdot R_\alpha^2} = \frac{8}{\left(\mu\mu_0 \frac{N}{e}\right)^2 \cdot R_\alpha^2} \cdot \frac{U_\alpha}{I_{KP}^2}. \quad (7)$$

Теперь можно, определив магнитное поле $B_{\text{кр}}$ или соответствующий ток соленоида $I_{\text{кр}}$, при котором электроны перестают попадать на анод, пользуясь уравнением (7), рассчитать удельный заряд электрона $\left(\frac{e}{m}\right)$.

Описание установки и порядок выполнения работы

1. Соберите схему измерений, показанную на рис.5.
2. Снимите зависимость анодного тока магнетрона I_{α} от тока соленоида I_c при различных напряжениях на аноде U_{α} . Результаты занесите в таблицу измерений.
3. Постройте график зависимости $I_{\alpha} = f(I_c)$. По точке перегиба полученной кривой определите $I_{\text{кр}}$.
4. По формуле (5) с учетом (6) или по (7) рассчитайте удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$.
5. Найти среднее значение $\left(\frac{e}{m}\right)$ из 5 опытов.

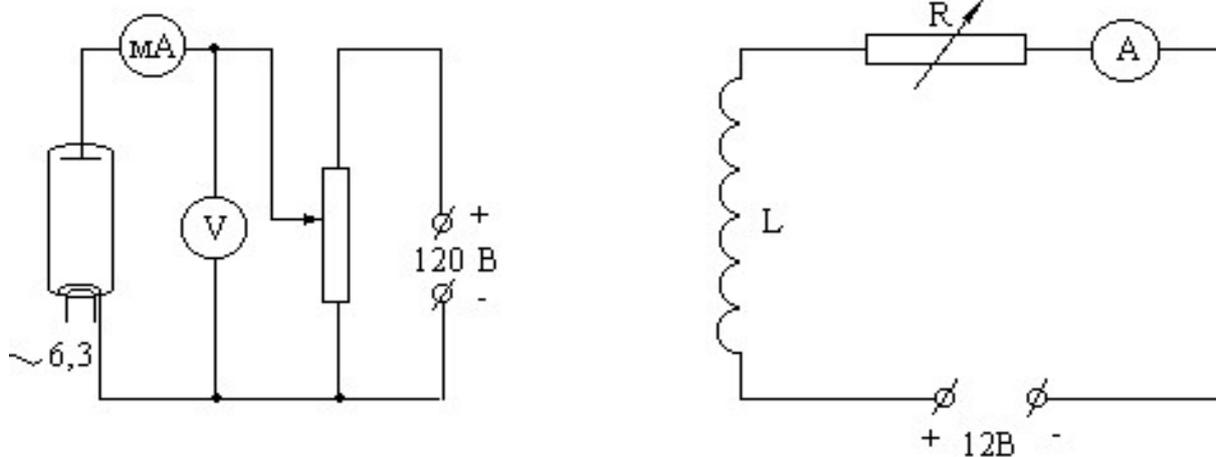


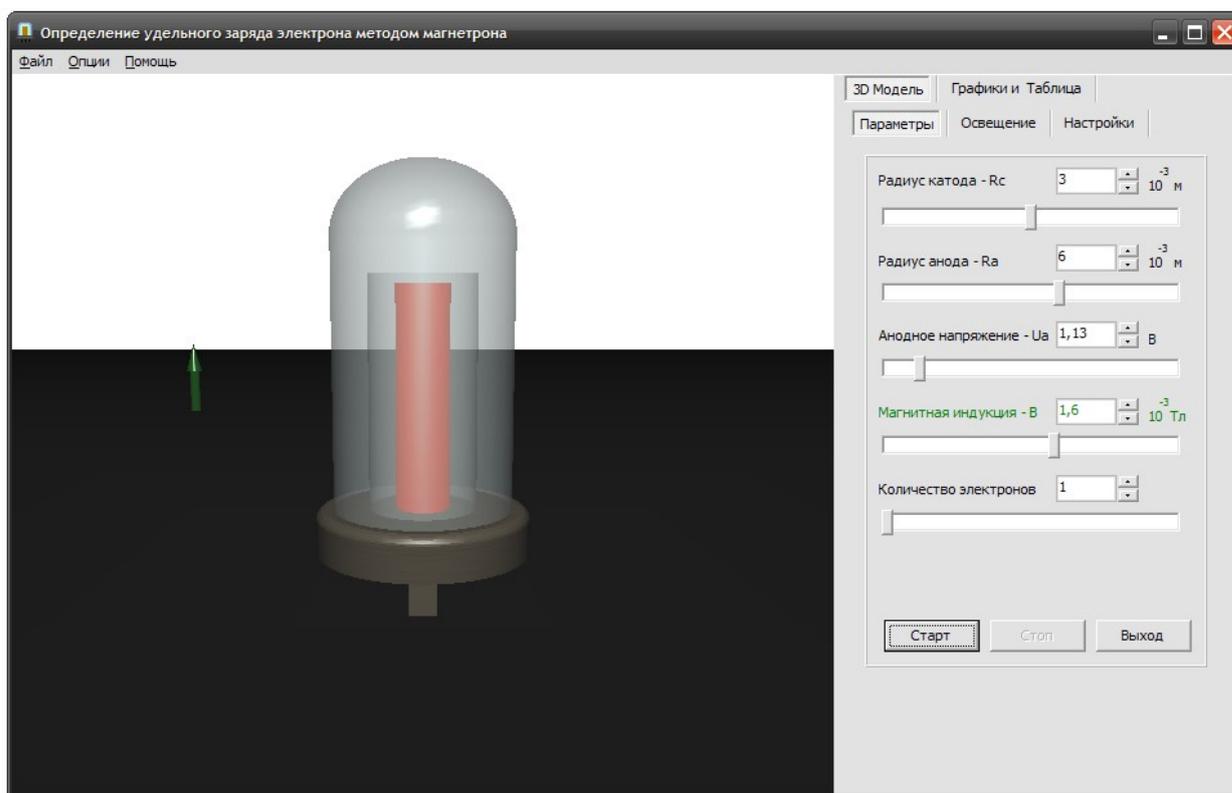
Рис. 5

Компьютерная модель

Программа имеет два режима работы:

- Режим 3D модели
- Режим графиков и таблицы

Режим 3D модели



Выбирается при запуске программы, либо выбрать его можно щелкнув на вкладке **3D модель**. В этом режиме возможно проведение эксперимента с использованием 3D модели диода. Область показа 3D модели расположена в левой части окна программы. С помощью мыши и клавиатуры возможно изменение ракурса просмотра 3D модели.

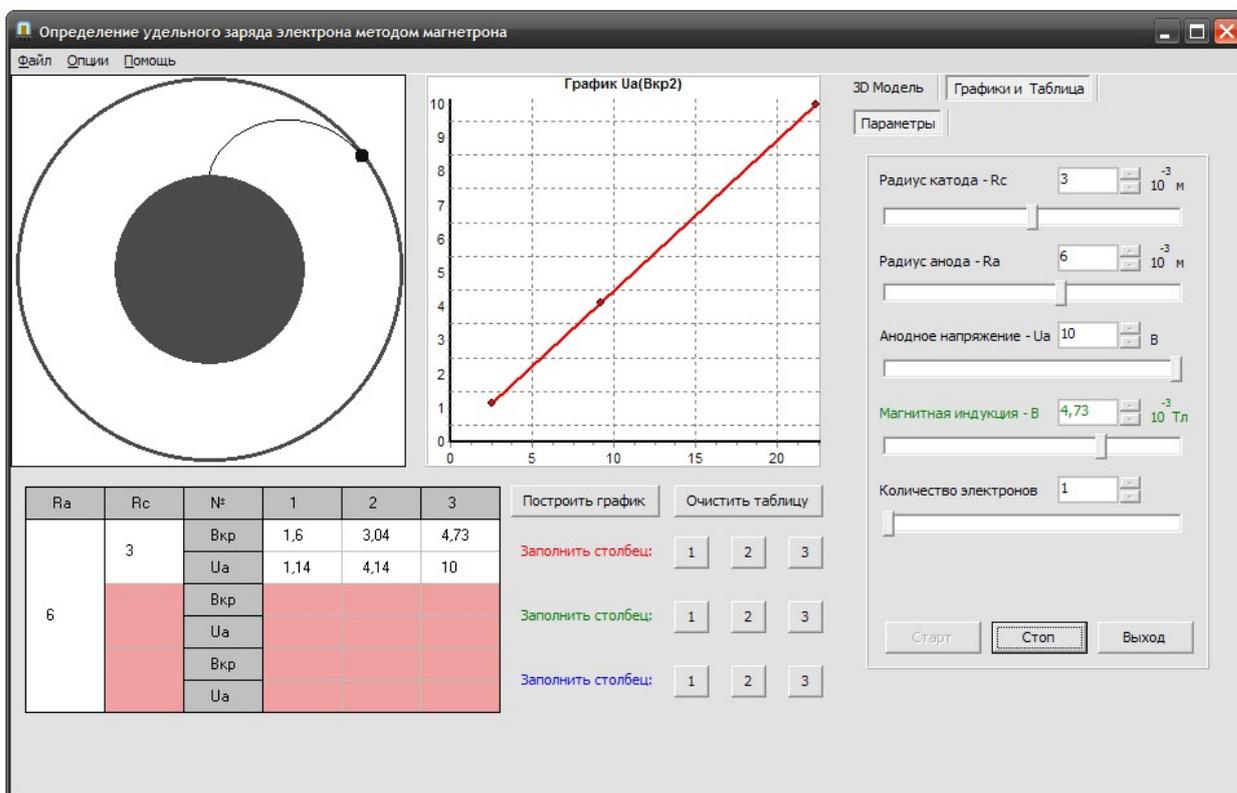
- **Левая кнопка мыши** - поворот модели
- **Средняя кнопка мыши** - перемещение модели
- **Правая кнопка мыши** - масштабирование модели
- **Alt+^, Alt+v, Alt+<, Alt+>** - поворот модели
- **Alt+PageUp, Alt+PageDown** - масштабирование модели

Справа от области показа 3D модели находится панель управления. С ее помощью можно задавать параметры эксперимента, настраивать освещение и изменять настройки показа 3D модели.

- **Вкладка Параметры** - задание параметров эксперимента
 - *Радиус катода* - установка радиуса катода (мм). Он не может быть больше радиуса анода
 - *Радиус анода* - установка радиуса анода (мм)
 - *Анодное напряжение* - установка анодного напряжения (В)
 - *Магнитная индукция* - установка магнитной индукции (мТл)
 - *Количество электронов* - установка количества электронов, участвующих в эксперименте
- **Вкладка Освещение** - задание параметров освещения в составляющих красного, зеленого и синего цветов
 - *Общее освещение* - установка общего освещения
 - *Рассеянное освещение* - установка рассеянного освещения

- *Отраженное освещение* - установка отраженного освещения
- *Положение источника освещения* - установка положения источника освещения
- *Цвет фона* - установка цвета фона
- **Вкладка Настройки** - задание настроек показа 3D модели
 - *Туман* - показ / скрытие тумана
 - *Оси координат* - показ / скрытие осей координат
 - *Индикатор магнитной индукции* - показ / скрытие индикатора магнитной индукции
 - *Траектория* - показ / скрытие траектории движения электрона
 - *Плоскость* - показ / скрытие плоскости, на которой находится диод
- **Кнопки панели управления** - управление экспериментом
 - *Старт* - запуск эксперимента
 - *Стоп* - остановка эксперимента
 - *Выход* - выход из программы

Режим графиков и таблицы



Режим графиков и таблицы можно выбрать, щелкнув на вкладке **Графики и Таблица**. В этом режиме возможно проведение эксперимента с использованием проекции поперечного сечения диода. Область изображения проекции поперечного сечения диода расположена в левой верхней части окна. С помощью мыши возможно изменение ракурса просмотра проекции поперечного сечения диода.

- **Левая кнопка мыши** - перемещение сечения
- **Правая кнопка мыши** - масштабирование сечения

Справа от графиков и таблицы находится панель управления. С ее помощью можно задавать параметры эксперимента.

- **Вкладка Параметры** - задание параметров эксперимента
 - *Радиус катода* - установка радиуса катода (мм). Он не может быть больше радиуса анода
 - *Радиус анода* - установка радиуса анода (мм)
 - *Анодное напряжение* - установка анодного напряжения (В)
 - *Магнитная индукция* - установка магнитной индукции (мТл)
 - *Количество электронов* - установка количества электронов, участвующих в эксперименте
- **Кнопки панели управления** - управление экспериментом
 - *Старт* - запуск эксперимента
 - *Стоп* - остановка эксперимента
 - *Выход* - выход из программы

Снизу от изображения проекции поперечного сечения диода расположена таблица $U_a(V_{кр}^2)$ при фиксированном R_a для 3 различных значений R_c . С помощью кнопок **1, 2, 3** возможно заполнение ячеек таблицы определенными в результате эксперимента значениями $V_{кр}$ и U_a . С помощью кнопки **Построить график** строятся графики зависимостей $U_a(V_{кр}^2)$ для полностью заполненных строк таблицы. Кнопка **Очистить таблицу** полностью очищает таблицу.

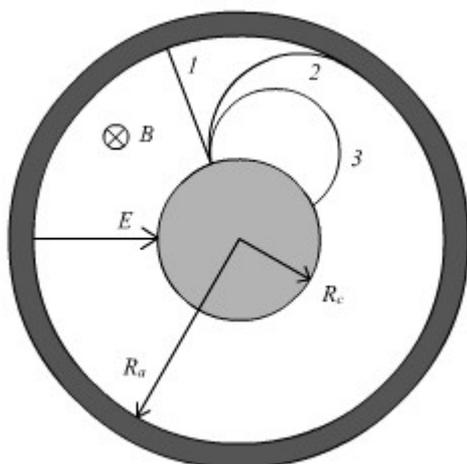
График $U_a(V_{кр}^2)$ находится справа от изображения проекции поперечного сечения диода.

Главное меню программы

С помощью главного меню возможна настройка интерфейса программы.

- **Файл:**
 - **Выход** - выход из программы
- **Опции:**
 - **Панель управления** - скрыть / показать панель управления
 - **Панель инструментов** - скрыть / показать панель инструментов
 - **Строка состояния** - скрыть / показать строку состояния
- **Помощь:**
 - **Справка** - вызывает данную справку
 - **О программе** - информация о программе

Моделируемая система



Траектории электронов в

Моделируется движение электронов в магнетроне, представляющем собой двухэлектродную электронную лампу (вакуумный диод), помещенную в однородное магнитное поле. Диод имеет коаксиальную цилиндрическую геометрию электродов. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси диода.

На рисунке изображено поперечное сечение диода. Внутренний цилиндр радиусом R_c - катод диода, внешний радиусом R_a - анод диода. Катод диода является источником электронов. Если на анод подано ускоряющее напряжение U_a , а магнитное поле отсутствует, то под действием электрического поля электроны ускоренно движутся к аноду. В

магнетроне

приближении нулевой начальной скорости это движение является радиальным (траектория 1). Электроны достигают анода, и имеет место анодный ток.

В присутствии магнитного поля возникающая магнитная сила искривляет траектории электронов в плоскости, перпендикулярной оси системы (траектории 2, 3). Увеличивая индукцию магнитного поля до некоторого критического значения $\mathbf{V}_{кр}$, можно добиться состояния, при котором траектории электронов будут касаться поверхности анода (траектория 2). При большем значении индукции электроны перестанут попадать на анод, и анодный ток будет отсутствовать.

Величина $\mathbf{V}_{кр}$ зависит от значения анодного напряжения. Найдем приближенно эту зависимость, предположив, что электрон движется по окружности с постоянной скоростью, равной ее максимальному значению. Такое приближение хорошо работает, если радиус катода мал по сравнению с радиусом анода. В этом случае потенциал электрического поля достаточно быстро нарастает вблизи катода, а далее изменяется очень медленно. Поэтому основное изменение модуля скорости электронов происходит вблизи катода, а при дальнейшем движении это изменение относительно мало. При этом траектории электронов можно аппроксимировать окружностями.

Максимальное значение скорости может быть выражено из закона сохранения энергии

$$\frac{1}{2} mV^2 = qU_a$$

Второй закон Ньютона для электрона, движущегося по окружности под действием силы Лоренца, связывает скорость частицы с радиусом траектории

$$\frac{mV^2}{R} = qVB$$

$$R = \frac{R_a - R_c}{2}$$

Объединяя эти уравнения и учитывая, что при формулу, выражающую связь величин $\mathbf{V}_{кр}$ и U_a , величина $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{кр}$, получаем

$$U_a = \frac{q}{m} \frac{B_{\varphi}^2}{8} R_a^2 \left(1 - \frac{R_c}{R_a} \right)^2$$

В приближении нулевой начальной скорости можно получить и точное выражение, если проинтегрировать уравнение движения электрона и использовать условие касания траекторией поверхности анода. Точное выражение имеет вид

$$U_a = \frac{q}{m} \frac{B_{\varphi}^2}{8} R_a^2 \left(1 - \left(\frac{R_c}{R_a} \right)^2 \right)^2$$

Имея экспериментальную связь $\mathbf{V}_{кр}$ и U_a , можно определить значение удельного заряда электрона q/m , воспользовавшись последней формулой.

В компьютерном эксперименте происходит численное интегрирование уравнения движения электрона в магнетроне, что позволяет динамически выводить на экран монитора траекторию движения частицы в межэлектродном пространстве. Изменяемыми параметрами являются: радиус анода (R_a), радиус катода (R_c), анодное напряжение (U_a) и индукция магнитного поля ($B_{кр}$).

Контрольные вопросы

1. Что такое магнетрон?
2. Какие силы действуют на электрон при его движении к аноду?
3. Куда направлена сила, действующая на электрон со стороны электрического поля?
4. Куда направлена сила, действующая на электрон со стороны магнитного поля?
5. Выведите рабочую формулу для определения $\frac{e}{m}$.
6. Почему при выводе рабочей формулы не учитывается сила, действующая на электрон со стороны электрического поля? Можно ли ее учесть?
7. Какие зависимости необходимо снять для определения $\frac{e}{m}$?
8. Какое магнитное поле называется критическим?
9. Как определяется в работе $B_{кр}$, при каких предположениях формула для определения $B_{кр}$ верна?
10. Объясните зависимость анодного тока магнетрона от индукции магнитного поля B .

Список литературы

1. Калашников С.Г. Электричество.- М., 1977
2. Савельев И.В. Курс общей физики.- М., 1978.- Т.2 и последующие издания этого курса.