

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №1

“ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА”

Цель работы

1. Получить навыки практической работы с осциллографом. Научиться определять амплитуду и частоту электрического сигнала с помощью осциллографа.
2. Исследовать фигуры Лиссажу.

Вступление

Перед работой с осциллографом и генератором звуковых и ультразвуковых колебаний надо ознакомиться с их техническими описаниями и инструкциями по эксплуатации. Ниже приведены основные конструктивные элементы осциллографа и правила работы с ним.

Электрический осциллограф служит для измерения параметров электрических колебаний: амплитуды, частоты, сдвига фаз между двумя сигналами. Генератор электрических сигналов служит для получения колебаний заданной частоты и амплитуды.

Основным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка (рис. 1). Она состоит из стеклянной колбы, в которой создан высокий вакуум. Внутри колбы последовательно расположены: нагреватель 1, катод 2, управляющий электрод 3, фокусирующий анод 4, второй анод 5, горизонтально отклоняющие пластины 6, вертикально отклоняющие пластины 7, экран 8, покрытый флуоресцентным веществом. Элементы 1-5 образуют электронную пушку, которая дает электронный пучок.

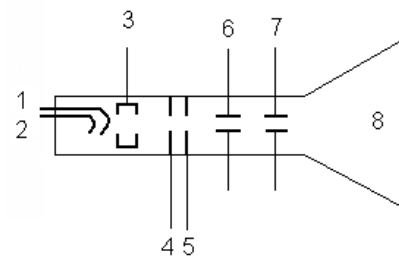


Рис.1

Интенсивность электронного пучка регулируется управляющим электродом 3, фокусирование пучка достигается системой электродов 3-5. Разность потенциалов между катодом и вторым анодом порядка 1-5 кВ. Потенциал фокусирующего анода 4 в несколько раз меньше, чем потенциал второго анода 5.

Фокусирующее действие электрического поля анодов 4,5 обусловлено распределением электрического потенциала между ними (рис. 2). Пусть электрон влетает в зазор между анодами слева направо под углом к оси. За время пролета через зазор электрон ускоряется за счет тангенциальной составляющей напряженности

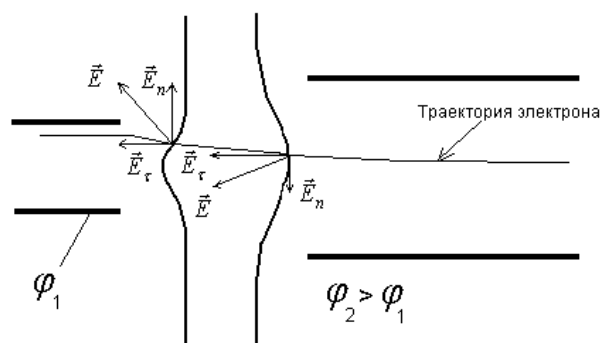


Рис.2

электрического поля E_t , которая имеет во время пролета одно и то же направление. Одновременно электрон отклоняется вначале к оси (вниз), а потом - от оси (вверх) под действием силы, обусловленной нормальной компонентой напряженности электрического поля E_n . Так как скорость электрона в первой половине зазора меньше, чем во второй, то время пролета электроном первой половины зазора больше, чем его

второй половины. В результате такое электрическое поле будет фокусировать электроны к оси и его действию подобно действию собирающих линз в оптике.

Процесс управления движением электронных пучков с помощью стационарных электрических полей является предметом изучения электронной оптики. Название электронная оптика происходит от сходства законов распространения световых волн в прозрачных веществах и электронных пучков в электрических полях.

Под влиянием электрического поля электроны движутся таким образом, что изменяется их нормальная к эквипотенциальной поверхности составляющая скорости, а тангенциальная составляющая скорости сохраняется. Поэтому, при переходе электрона от точки с потенциалом φ_1 к точке с потенциалом φ_2 выполняется следующее соотношение:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}, \quad (1)$$

где $\alpha_{1,2}$ - углы между соответствующими векторами скорости $V_{1,2}$ и их нормальными к эквипотенциальным поверхностям составляющими V_{n1} , V_{n2} . Если электроны начинают двигаться с поверхности катода, имея нулевую кинетическую энергию, то, ускоряясь электрическим полем и достигая эквипотенциальной линии с потенциалом φ_1 , они получают кинетическую энергию

$$W_1 = e\varphi_1 = mV_1^2 / 2. \quad (2)$$

Отсюда скорость электрона $V_1 = \sqrt{2e\varphi_1 / m}$. Аналогично скорость электрона на линии с потенциалом φ_2 равна $V_2 = \sqrt{2e\varphi_2 / m}$. Поэтому уравнение (1) можно переписать так

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sqrt{\varphi_2}}{\sqrt{\varphi_1}}. \quad (3)$$

Таким образом, в электронной оптике роль показателя преломления n выполняет величина $\sqrt{\varphi}$. Поэтому уравнение, описывающее преломление света в оптически неоднородной среде, переходит в уравнение преломления электронного пучка в электростатическом поле при замене $n \rightarrow \sqrt{\varphi}$. При отсутствии на отклоняющих пластинах постоянного напряжения пучок электронов попадает в центр экрана. Если на какую-то пару отклоняющихся пластин подать постоянное напряжение, то отклонение пучка электронов от центра экрана будет пропорционально величине напряжения. Таким образом, можно находить величину постоянного напряжения. При переменном напряжении на экране будет видно удвоенное значение амплитуды колебаний. Зачастую на вертикально отклоняющие пластины (вход Y) подается исследуемый сигнал. Одновременно электронный луч отклоняется в горизонтальном направлении (вход X) с постоянной скоростью с помощью напряжения, которое линейно изменяется во времени. Это напряжение имеет форму пилы и образуется генератором развертки. Для получения неподвижного изображения исследуемого сигнала на экране осциллографа используют процесс синхронизации, который состоит в том, что генератор развертки запускается через целое число периодов исследуемого сигнала.

Подавая на обе пары отклоняющих пластин гармоничные напряжения, можно наблюдать на экране их сумму. При этом проекции напряжения имеют значение:

$$\begin{aligned} U_Y &= U_{0Y} \sin(\omega_Y t - \varphi_Y) \\ U_X &= U_{0X} \sin(\omega_X t - \varphi_X) \end{aligned} \quad (4)$$

Если частоты гармонических колебаний равны ($\omega_Y = \omega_X$), а фазы равны ($\varphi_Y = \varphi_X$) или в противофазе ($\varphi_Y - \varphi_X = \pi$), то на экране будет прямая, наклон которой будет определяться соотношением амплитуд U_{0Y} и U_{0X} .

Если $\omega_Y = \omega_X$, $\varphi_Y - \varphi_X = \pi/2$, или $\varphi_Y - \varphi_X = 3\pi/2$, то на экране будет эллипс, эксцентриситет которого будет определяться соотношением амплитуд U_{0Y} и U_{0X} . Если частоты исследуемых сигналов ω_Y и ω_X будут отличаться в несколько раз, то на экране получим фигуры Лиссажу.

Методика эксперимента

Включить генератор электрических сигналов и дать ему возможность прогреться на протяжении 15-30 минут. При этом не допускать “зашкаливания” стрелки вольтметра, который регистрирует напряжение на выходе генератора. Переключатель «шкалы прибора» поставить на «x1» или «x2» в зависимости от величины напряжения. Другие положения переключателя «шкала прибора» используют для контроля ламп генератора. Когда внешнее сопротивление превышает 600 Ом (например, входное сопротивление осциллографа С1-72 порядка 1 МОм), включить тумблер «внутр. сопротивление». Когда внешнее сопротивление меньше 600 Ом , тумблер «внутр. сопротивление» надо выключить. Переключатель «Выход сопротивление Ω » можно выставить в одно из четырех положений, тогда стрелка, которая ведет к окну аттенюатора, указывает соответствующее максимальное значение шкалы вольтметра, который регистрирует напряжение на выходе генератора. При положении «АТТ» нелинейность характеристик генератора минимальная. Регулирование частоты исходного сигнала выполняется с помощью переключателя «Множитель» и ручки «Частота Hz».

Перед включением осциллографа в сеть переменного тока, ручки яркости, контрастности, «Усиление X» и «Усиление Y» выкрутить против часовой стрелки, а ручки «Частота», «Фокус», регулирование луча по вертикальной и горизонтальной оси поставить в среднее положение. Кнопки «Развертывание» и «Синхронизация» надо отпустить. После подачи напряжения на осциллограф надо нажать кнопку «Сеть» и через 2 мин. получить электронный луч на экране. Исследуемый сигнал подается на вход Y, при этом переключатель «Усиление Y» задает цену деления по оси ординат экрана осциллографа. Нужно также помнить, что в случае исследования сменного во времени электрического сигнала, длина светлой линии на экране осциллографа пропорциональна удвоенному значению амплитуды сменного напряжения U_{0Y} . Если сигнал на осциллограф подается с генератора, то вольтметр, который регистрирует напряжение на выходе генератора, показывает эффективную величину этого напряжения U_{ef} :

$$U_{0Y} = \sqrt{2} U_{ef} \quad (7)$$

Чтобы получить на экране осциллографа «развернутый сигнал», надо нажать кнопку «Внутр. Синхронизация». Если при этом на экране будет несколько периодов колебаний, которые двигаются по экрану, то для стабилизации изображения следует переключателем «время/см» выбрать такой период генератора развертки, при котором на экране осциллографа будет помещаться ровно один период электрического колебания. Дополнительно стабилизировать изображение можно с помощью ручек «Уровень» и «Стабилизация».

Когда исследуемый электрический сигнал надо синхронизировать с другим сигналом, необходимо последний подать на вход X и нажать кнопку синхронизации по входу «X». Если на одну пару отклоняющих пластин подать напряжение с известной частотой, а на вторую - с исследуемой, то на экране осциллографа появится фигура Лиссажу. Когда отношение частот напряжений, поданных на пластины осциллографа, является рациональным числом, то получаем замкнутые фигуры Лиссажу определенной формы, по которой можно судить о неизвестной частоте. Когда отношение частот является числом иррациональным, то фигуры Лиссажу не

имеют периодичности и представляют собой бесконечную незамкнутую кривую, которая нигде не повторяется. Фигуры Лиссажу в этом случае находятся в непрерывном движении.

Выполнение работы

1. Подготовить к работе генератор электрических сигналов.
2. Подготовить к работе электрический осциллограф.
3. Подать с генератора сигнал на вход осциллографа. Его частоту брать из самого высокого диапазона, а амплитуду - самой малой.
4. Определить с помощью осциллографа амплитуду и частоту этого электрического сигнала.
5. Нарисовать форму сигнала. Записать при этом значение переключателей «В/см», «время/см» и найденные значения амплитуды и частоты сигнала.
6. Записать данные электрического сигнала исходя из показателей генератора.
7. Определить относительную погрешность при определении амплитуды и частоты электрического сигнала, увеличивая амплитуду сигнала и уменьшая его частоту. Подавая на входы X и Y два электрических сигнала приблизительно одинаковой амплитуды, исследовать различные фигуры Лиссажу. Зарисовать фигуры Лиссажу, когда частоты соотносятся как: $1/1$, $1/2$, $1/3$, $1/4$.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы электронно-лучевой трубки.
2. Нарисуйте блок-схему электронного осциллографа и объясните назначение его элементов.
3. Как происходит фокусировка электронного потока в электронно-лучевой трубке?
4. Как определить частоту электрического сигнала генератора развертки, если известна частота электрического сигнала?
5. Как определить амплитуду электрического сигнала, который подается на вход Y?
6. Как определить частоту одного из двух периодических электрических сигналов по форме фигуры Лиссажу, если известна частота другого электрического сигнала?
7. Как определить амплитуду электрического сигнала, поданного на вход X?
8. Как происходит сложение взаимно перпендикулярных колебаний в электронно-лучевой трубке?
9. Для чего в осциллографе предназначен генератор развертки? Какую форму и почему имеет электрический сигнал генератора развертки?



10.

Английский физик, более известный просто как Дж. Дж. Томсон. Родился в Читем-Хилле (Cheetham Hill), пригороде Манчестера, в семье букиниста-антиквара. В 1876 году выиграл стипендию на обучение в Кембридже. В 1884-1919 годах — профессор кафедры экспериментальной физики Кембриджского университета и по совместительству — руководитель Кавендишской лаборатории, которая усилиями Томсона превратилась в один из самых известных научно-исследовательских центров мира. Одновременно в 1905-1918 годах — профессор Королевского института в Лондоне. Лауреат Нобелевской премии по физике 1906 года с формулировкой «за исследования прохождения электричества через газы», которая, естественно, включает и открытие электрона.

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №2

“ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ПРОВОДНИКАХ”

Цель работы.

1. Проверить закон Ома для однородного участка цепи.
2. Определить величину сопротивления проводника различными методами.
3. Определить зависимость электрического сопротивления провода от его длины.
4. Определить удельное электрическое сопротивление металлического провода.
5. Вычислить абсолютную и относительную погрешность в определении удельного электрического сопротивления

Вступление.

Проводником электрического тока называют такое физическое тело, в котором появляется упорядоченное движение электрических зарядов при помещении его в электрическое поле. В металлах такими зарядами являются электроны проводимости. Они слабо связаны с ядрами атомов и являются практически свободными для соседних атомов. Это позволяет им свободно двигаться по объему металла. Атомы проводников, которые утратили свои валентные электроны, составляют кристаллическую решетку. Ионы осуществляют хаотические тепловые колебания вблизи узлов кристаллических решеток. Электроны проводимости, при помещении металла в электрическое поле, не прекращая хаотического теплового движения, медленно двигаются вдоль силовых линий электрического поля. Величина тепловой скорости электронов при комнатных температурах порядка 10^6 м/с, а скорость их упорядоченного движения, определяющая величину тока, очень мала и имеет значение порядка 10^{-3} м/с.

При включении проводника в электрическую цепь по нему практически сразу начинает протекать электрический ток, несмотря на очень малое значение скорости упорядоченного движения. Это связано с тем, что когда к металлу прикладывается некоторая разность потенциалов и в металле появляется электрическое поле. Под действием сил электрического поля и сил трения, обусловленных столкновениями электронов с ионами кристаллической решетки, электроны приобретают некоторую упорядоченную скорость, которая определяет значение плотности электрического тока:

$$j = env \quad (1)$$

где n - концентрация свободных носителей заряда, e - заряд электронов проводимости, v - упорядоченная скорость электронов проводимости.

Закон Ома в дифференциальной форме имеет вид:

$$j = \sigma E, \quad (2)$$

где σ - коэффициент электропроводности.

Электропроводность σ связана с удельным электрическим сопротивлением ρ :

$$\rho = 1 / \sigma. \quad (3)$$

Для проводников цилиндрической формы закон Ома в интегральной форме имеет вид

$$U = IR, \quad (4)$$

где $I = jS$ - сила тока, U - падение напряжения, приложенное к проводнику длиной L и площадью поперечного сечения S , $R = \rho L / S$ - сопротивление проводника.

Электроны проводимости отличаются от свободных электронов в вакууме. Электроны проводимости взаимодействуют между собой значительно слабее, чем свободные электроны, ибо они окружены положительными ионами. Электроны проводимости образуют газ квазичастиц, которые подчиняются принципу Паули. Согласно этому принципу в каждом квантовом состоянии может находиться не больше одной частицы. Квантовое состояние электрона проводимости определяется импульсом электрона и собственным моментом импульса электрона, который называется спином и описывается статистикой Ферми - Дирака. Такие частицы называются фермионами. Характерной особенностью таких частиц является то, что они появляются и исчезают парами.

Кроме электронов проводимости в металлах существуют квазичастицы другой природы, которые подчинены статистике Бозе-Эйнштейна. Они представляют собой элементарные упругие волны возбужденной кристаллической решетки и называются фононами. Вследствие существования больших сил межатомного взаимодействия частиц в узлах кристаллической решетки, возмущение, связанное с колебаниями ионов относительно положения равновесия, передается от одного иона к другому. В результате такого процесса в кристалле в некотором направлении распространяется упругая волна. Скорость распространения такой продольной волны равна скорости распространения звука в кристалле. Коллективное движение большого количества ионов заменяется движением в том, же направлении фонона, который переносит такую же энергию и импульс. Интенсивность тепловых колебаний и связанное с ними число фононов увеличивается с ростом температуры кристалла. Нужно отметить, что при нулевой температуре $T = 0 \text{ K}^0$ Кристаллическая решетка принимает участие в некотором слабом движении, которое не связано с тепловым хаотическим движением. Это движение называется нулевыми колебаниями. Одно из отличий фононов от фермионов состоит в том, что фононы, являясь бозонами, могут образовываться и исчезать по одному, или в ином количестве.

При протекании электрического тока в металле происходят процессы рассеяния электронов проводимости на фононах. Если при этом электроны отдают энергию кристаллической решетке, то число фононов увеличивается. Если электроны получают энергию от кристаллической решетки, то число фононов уменьшается. В отсутствие внешних электрических полей процессы поглощения и рождения фононов компенсируют один другого. При этом газы квазичастиц фононов и электронов находятся в состоянии термодинамического равновесия. Появившееся в проводнике внешнее электрическое поле выполняет работу над электронами проводимости, обеспечивая существование электрического тока и выделение Джоулевого тепла. При этом термодинамическое равновесие фононов и электронов проводимости нарушается, растет температура кристалла, и число фононов увеличивается.

Протекание тока по проводникам подчиняется законам Кирхгофа. Первый закон Кирхгофа состоит в том, что алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю

$$\sum I_j = 0 \quad (5)$$

Узлом называется такое соединение проводников, в котором сходятся 3 и более проводника. За положительное значение тока принимается такое, когда он втекает в узел, а за отрицательное – когда вытекает.

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма электродвижущих сил E_i в цепи равна сумме падений напряжений $I_j R_j$ на участках цепи.

$$\sum I_j R_j = \sum E_j \quad (6)$$

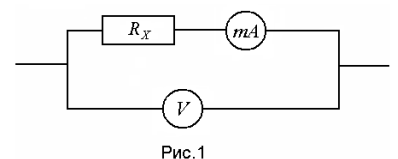


Рис.1

Методика эксперимента.

Для выполнения работы используется лабораторный прибор **FPM-01**, который позволяет измерять активное сопротивление металлического провода двумя различными способами.

В первом случае точно измеряется величина электрического тока, который протекает по проводу (рис.1). Вольтметр измеряет полное падение напряжения на активном сопротивлении R_X и амперметре с сопротивлением R_A . Собственное сопротивление амперметра равно $R_A = 0,15 \text{ Ом}$. Общее электрическое сопротивление последовательно соединенных сопротивлений R_X и R_A равно их сумме. Следовательно:

$$U_V = (R_X + R_A)I_A, \quad (7)$$

где U_V и I_A - значения вольтметра и амперметра соответственно. Поэтому можно определить

$$R_X = \frac{U_V}{I_A} - R_A, \quad (8)$$

Во втором случае точно измеряется величина падения напряжения на проводнике (рис.2). Воспользовавшись вторым законом Кирхгофа для сопротивлений R_X и R_V , соединенных параллельно, можно получить:

$$I_A = \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_V} \right) U_V, \quad (9)$$

где $R_V = 2500 \text{ Ом}$ - электрическое сопротивление вольтметра, которое намного больше электрического сопротивления амперметра R_A . Из уравнения (9) найдем R_X :

$$R_X = \frac{U_V}{I_A} \left(1 - \frac{U_V}{I_A R_V} \right)^{-1}. \quad (10)$$

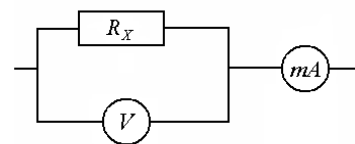


Рис.2

Выполнение работы.

1. Подключить прибор **FPM-01** к электросети и включить его.
2. Нажать кнопку измерения неизвестного сопротивления R_X техническими методами.
3. Вычислить неизвестное сопротивление проводника с помощью метода точного измерения тока, воспользовавшись формулой (8).
4. Зная, что диаметр металлического провода равен $0,36 \text{ мм}$, вычислить его удельное сопротивление по формуле $\rho = R_X S / L$.
5. Вычислить неизвестное сопротивление проводника с помощью метода точного измерения напряжения, воспользовавшись формулой (10).
6. Построить графическую зависимость $R_X = R_X(L)$, изменяя длину провода от значения 2 см до значения 50 см с шагом 4 см .
7. Найти абсолютную и относительную погрешности измерения удельного сопротивления ρ .

Контрольные вопросы.

1. Запишите закон Ома в интегральной и дифференциальной форме.
2. Выведите законы Кирхгофа.
3. Что такое электроны проводимости? Какой статистикой они описываются?
4. Что такое фононы и от чего зависит их количество?

5. Как зависит электрическое сопротивление проводника от его геометрических размеров?
6. Массивные проводники и вычисления их сопротивления.
7. Как можно увеличить диапазон измерения амперметра и вольтметра?



Немецкий физик Ом (Ohm) Георг Симон (1787-1854) установил основной закон электрического круга (закон Ома). Известный своими трудами из акустики, кристаллооптики.

В труде «Гальванический круг, разработанное математически» (1827) изложил основную зависимость между напряжением, током и сопротивлением. Закон Ома получил признание и начал входить в науку только в конце 1830-х годов.

Ранее всех из зарубежных ученых закон Ома признали российские физики Ленц и Якоби. Они помогли и его международному признанию. При участии российских физиков, 5 мая 1842 года Лондонское Королевское общество наградило Ома золотой медалью и выбрало своим членом.



Густав Роберт КИРХГОФ (Gustav Robert Kirchhof) (1824–77)

Немецкий физик. Родился в Кёнигсберге (современный Калининград). Законы расчета электрических цепей сформулировал, еще будучи студентом Кёнигсбергского университета. Продолжил свою блестящую карьеру в ряде германских университетов, последним из которых стал Берлинский, где он был профессором теоретической физики с 1875 года и до своей смерти. В период работы в университете г. Бреслау (на территории современной Польши) совместно с Робертом Бунзеном разработал основы спектроскопии. Кроме того, он открыл еще один цикл законов Кирхгофа, описывающих тепловое поглощение и излучение. Хотя вторую половину своей

жизни Кирхгоф в результате несчастного случая провел в инвалидной коляске, все современники отзывались о нем как о приятнейшем человеке и убежденном оптимисте.



Андре-Мари АМПЕР (André Marie Ampère) (1775–1836). Французский физик. Родился в Лионе в семье торговца. Получил домашнее образование, имея доступ к прекрасной семейной библиотеке. (В частности, самостоятельно выучил латынь, чтобы в подлиннике читать труды видных математиков.) Сделал заметную карьеру во французской системе образования, получив при Наполеоне Бонапарте назначение на пост генерального инспектора всей системы университетского образования Франции. В 1827 году опубликована его самая известная работа «Теория электродинамических явлений, выведенная

исключительно из опыта», в которой Ампер подытожил свои электродинамические исследования и дал точные математические формулировки

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №4

“ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ”

Цель работы.

8. Освоить осциллографический метод наблюдения процессов поляризации сегнетоэлектриков в переменных электрических полях.

9. Определить зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля.

Вступление.

Сегнетоэлектрики - это кристаллические диэлектрики, которые в некотором интервале температур $T_{K1} < T < T_{K2}$ (T_{K1} и T_{K2} - нижняя и верхняя температуры Кюри) в макроскопических объемах имеют спонтанную поляризацию, т.е. они обладают отличным от нуля макроскопическим электрическим дипольным моментом и создают в пространстве их окружающем электрическое поле. Обычно сегнетоэлектрики не являются однородно поляризованными, а состоят из доменов - областей, в которых дипольные моменты молекул ориентированы в одном направлении. При хаотическом положении и ориентации доменов суммарный дипольный электрический момент образца равен нулю.

Основные свойства сегнетоэлектриков - это аномально большие значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ (она достигает значений $10^4 - 10^5$) и нелинейная зависимость вектора поляризации P (электрического дипольного момента) от напряженности электрического поля E .

Если образец, суммарный дипольный электрический момент которого равен нулю, внести во внешнее электрическое поле E_0 , то происходит ориентация дипольных моментов атомов и молекул преимущественно в направлении внешнего электрического поля E_0 . В результате этого образец поляризуется, вектор поляризации P становится отличным от нуля. При небольших значениях электрического поля в сегнетоэлектрике увеличение поляризации происходит за счет смещения границ между доменами. При этом уменьшаются размеры доменов, поляризованных против поля, и увеличиваются размеры доменов, поляризованных по полю. При дальнейшем увеличении напряженности поля E поляризация увеличивается за счет поворота дипольных моментов целых доменов.

Электрическое поле в сегнетоэлектрике характеризуется тремя векторными полями: вектором электрической индукции D , вектором поляризации P и вектором напряженности E , которые связаны соотношением:

$$D = \epsilon_0 E + P. \quad (1)$$

Для обычных диэлектриков связь E и P в области достаточно малых электрических полей линейная:

$$P = \kappa \epsilon_0 E, \quad (2)$$

где κ - диэлектрическая восприимчивость, константа $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Фл/м}$ - диэлектрическая постоянная вакуума.

В сегнетоэлектриках зависимость поляризации P от напряженности электрического поля E является существенно нелинейной (рис. 1). Поэтому в соотношении (2) величина

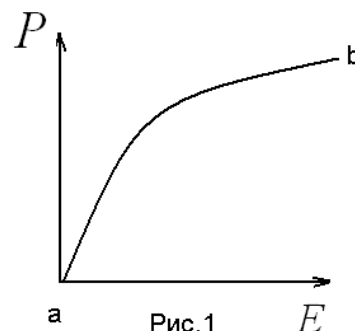


Рис.1

диэлектрической восприимчивости κ не постоянная, а переменная величина, которая является функцией электрического поля

$$\kappa = \kappa(E), \quad (3)$$

которая может достигать достаточно больших значений $10^3 - 10^4$. При внесении сегнетоэлектрика во внешнее переменное электрическое поле имеет место явление диэлектрического гистерезиса (отставания). Это явление связано с тем, что при уменьшении внешнего электрического поля, изменение поляризации проходит не по кривой начальной поляризации ab , а по новой кривой bc , которая располагается выше (рис. 2). Поляризованное состояние в диэлектрике сохраняется и в том случае, когда электрическое поле E внутри сегнетоэлектрика исчезает $E = 0$. В этом случае значение вектора поляризации равно остаточной поляризации P_0 .

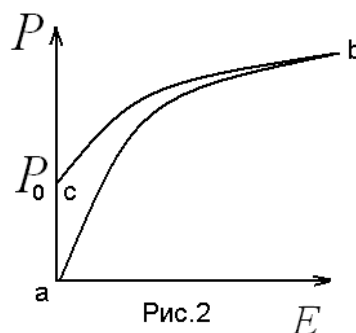


Рис. 2

Следовательно, поляризация сегнетоэлектриков P не определяется однозначно напряженностью электрического поля E , а зависит от его предыдущего состояния. Для того чтобы снять остаточную поляризацию, необходимо изменить направление внешнего электрического поля на противоположное. Величина напряженности электрического поля E_k , при которой поляризация обращается в нуль, называется коэрцитивной силой (рис. 3).

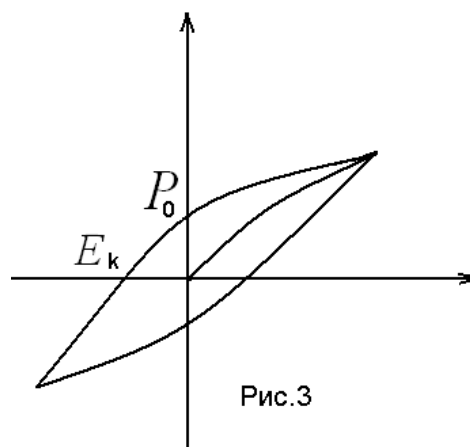


Рис. 3

Если сегнетоэлектрик поместить в переменное электрическое поле, то вследствие явления гистерезиса зависимость $P = P(E)$ будет иметь вид замкнутой кривой (рис. 3), которая называется петлей гистерезиса. Аналогичный вид имеет и зависимость $D(E)$.

Это следует из того, что если восприимчивость $\kappa \gg 1$ вектор поляризации $P \gg \epsilon_0 E$. Тогда из соотношения (1) получим $D \cong P$.

В данной работе изучается зависимость $D(E)$ для титаната бария BaTiO_3 . Он является сегнетоэлектриком в диапазоне температур от $T_{k1} = 5^\circ \text{C}$ до $T_{k2} = 120^\circ \text{C}$, где T_{k1} и T_{k2} — соответственно нижняя и верхняя температуры Кюри. Если $T > T_{k2}$ или $T < T_{k1}$ сегнетоэлектрик теряет свои свойства и становится обычным диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого близка к единице.

Если сегнетоэлектрик находится во внешнем переменном электрическом поле, то происходит его реполяризация. В этом случае в единице объема сегнетоэлектрика за один период переменного электрического поля выделяется количество теплоты

$$Q = \oint D dE, \quad (4)$$

которое численно равно площади, ограниченной петлей гистерезиса.

Описание экспериментальной установки.

Для исследования явления гистерезиса используется установка, принципиальная схема которой изображена на рис.4 (N - осциллограф, C_0 - электролитический конденсатор, C - конденсатор, заполненный сегнетоэлектриком, R_1 и R_2 - сопротивления, $U(t)$ - переменное синусоидальное напряжение частотой $f = 50 \text{ Гц}$, которое подается от звукового генератора на делитель напряжения, который состоит из сопротивлений $R_1 = 470 \text{ кОм}$ и $R_2 = 100 \text{ кОм}$.

Параллельно делителю напряжения подключаются две последовательно соединенные емкости: сегнетоконденсатор (вариконд) $C = 0.15 \text{ мкФ}$ и эталонный конденсатор $C_0 = 10 \text{ мкФ}$. Емкости конденсаторов выбраны таким образом, что $C \gg C_0$. Из схемы видно, что на пластину горизонтального отклонения подается напряжение U_X с резистора R_2 .

$$U_X = \frac{U(t)}{R_1 + R_2} R_2 \quad (5)$$

Горизонтальное смещение луча пропорционально мгновенному значению приложенного напряжения $U(t)$. Напряжение $U(t)$ прикладывается в основном к вариконду C (так как $C_0 \gg C$) и создает в нем электрическое поле напряженностью:

$$E(t) = \frac{U(t)}{d}, \quad (6)$$

где $d = 0.5 \text{ мм}$ - толщина сегнетоэлектрика. Подставив $U(t)$ из формулы (5) в (6) получим

$$E(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} U_X(t) \quad (7)$$

Вертикальное отклонение луча пропорционально напряжению U_Y на эталонном конденсаторе C_0 :

$$U_Y(t) = \frac{q_0(t)}{C_0}, \quad (8)$$

где q_0 - заряд на обкладках конденсатора C_0 . Так как конденсаторы C и C_0 включены последовательно, то заряды на обкладках обоих конденсаторов равны. Следовательно

$$U_Y(t) = \frac{q_0(t)}{C_0} = \frac{\sigma(t)S}{C_0}, \quad (9)$$

где $\sigma(t)$ - поверхностная плотность свободных зарядов на обкладках сегнетоконденсатора; S - площадь пластин сегнетоконденсатора, который конструктивно состоит из 9 параллельно соединенных конденсаторов с круговыми обкладками (диаметр каждой обкладки равен $d = 20 \text{ мм}$). Таким образом, площадь одной обкладки равна $S_1 = \pi d^2 / 4$, эффективная площадь всего конденсатора $S = 9S_1$. В системе СИ поверхностная плотность свободных зарядов $\sigma = q_0 / S = C_0 U_Y(t) / S$ численно равна модулю вектора электрического смещения D . Поэтому из соотношения (9) найдем

$$D(t) = \frac{C_0}{S} U_Y(t). \quad (10)$$

Следовательно, электрическое смещение D пропорционально вертикальному отклонению луча на экране осциллографа $U_Y(t)$ (10), а напряженность электрического поля $E(t)$ в сегнетоэлектрике пропорциональна смещению луча по горизонтали $U_X(t)$ (7). Выключив

развертку осциллографа на экране, можно наблюдать зависимость $D = D(E)$, которая представляет собой петлю гистерезиса. В связи с тем, что $D = \varepsilon_0 E + P \cong P$ кривая, которая наблюдается, отображает также и зависимость $P(E)$.

Смещение луча по осям X и Y зависит от чувствительности осциллографа по соответствующим каналам. Если цену деления масштабной сетки осциллографа по оси X обозначить через a_x , а по оси Y - через a_y (единица измерения a_x и a_y - вольт/деление), то по смещению электронного луча на экране осциллографа можно определяется напряжение, подаваемое на пластины конденсатора X и Y

$$U_x = a_x x, \quad U_y = a_y y. \quad (11)$$

Учитывая (11), формулы (7) и (10) принимают вид:

$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} a_x x, \quad (12)$$

$$D = C_0 a_y y / S. \quad (13)$$

Используя соотношения (12), (13) можно определить диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика:

$$\varepsilon = \frac{D}{E \varepsilon_0} = \frac{C_0 R_2 d}{S \varepsilon_0 (R_1 + R_2) a_x x} a_y y \quad (14)$$

Необходимо отметить, что для правильного определения ε , все величины, входящие в правую часть уравнения (14), должны быть выражены в системе СИ.

Выполнение работы.

1. Собрать электрическую схему, изображенную на рис. 4 и включить осциллограф. На первичную обмотку повышающего трансформатора подается напряжение частотой $f = 10 \text{ Гц}$ от звукового генератора. Со вторичной обмотки трансформатора напряжение подается на последовательно соединенные конденсаторы C и C_0 .

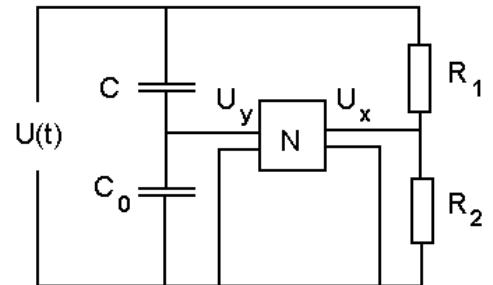


Рис.4

2. Выключить развертку осциллографа. Ручками управления луча установить освещенное пятно в центр экрана.

3. Подать переменное напряжение на вариконд (сегнетоконденсатор) и получить на экране устойчивое изображение петли гистерезиса. В случае нечеткой петли гистерезиса необходимо подождать несколько минут для прогрева сегнетоэлектрика.

4. Вырезать кальку по размеру экрана. Переснять петлю гистерезиса с экрана на кальку, на которой предварительно нанести сетку с сантиметровыми делениями.

5. Определить координаты верхней точки петли гистерезиса x_0 и y_0 , соответствующие максимальной петле гистерезиса, в делениях масштабной сетки и записать полученные величины в таблицу. С помощью вольтметра или осциллографа провести калибровку каналов X и Y . При этом обратить внимание на то, что вольтметр показывает эффективное значение напряжения, а смещение луча на экране осциллографа определяется амплитудным значением напряжения. Например, для осциллографа С1-68 чувствительность входа «Пластины X » не меньше 10 см/В .

6. Постепенно уменьшая выходное напряжение генератора, провести 8-10 измерений значений координат x и y верхнего конца петли при различных напряжениях.

7. По формулам (12) и (13) подсчитать величины напряженности E и индукции электрического поля D , занести эти значения в таблицу.

8. Построить график зависимости $D = D(E)$.
9. Определить относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = D/(\varepsilon_0 E)$, используя полученную зависимость $D = D(E)$ и построить график $\varepsilon = \varepsilon(E)$.
10. Воспользовавшись предельной петлей гистерезиса (петлей наибольшего размера) определить остаточную индукцию D_0 и коэрцитивную силу E_k .
11. Подсчитать работу по переполяризации единицы объема диэлектрика за один период переменного напряжения.

Контрольные вопросы.

3. Электрический диполь и его поведение во внешнем электрическом поле.
4. Каково физическое толкование вектора поляризации P ?
5. Физический смысл диэлектрической проницаемости вещества.
6. Что происходит с сегнетоэлектриком при нагревании выше температуры Кюри?
7. Что такое явление гистерезиса и как получают петлю гистерезиса?
8. Какой смысл остаточной индукции D_0 , остаточной поляризации P_0 и коэрцитивной силы E_k ?
9. Как можно определить напряженность и индукцию электрического поля в диэлектрике?
10. Как подсчитать работу по переполяризации диэлектрика?
11. Применение сегнетоэлектриков.
12. Нарисовать схему лабораторной установки и объяснить принцип ее работы.



П. Кюри (Curie) (15.5.1859, Париж, - 19.4.1906, там же), французский физик, член Французской АН (1905). По окончании Парижского университета (1877) работал там же ассистентом. В 1882—1904 руководил практическими работами, а затем преподавал в Школе индустриальной физики и химии в Париже, из 1904 профессор Парижского университета. Основные труды из физики кристаллов, магнетизма и радиоактивности. П. Кюри уже в молодые годы стал известен своими работами по изучению свойств кристаллов. Ему принадлежит открытие явления пьезоэлектричества (появление электрической разницы потенциалов в результате механической деформации кристалла). В 1884—85 изучал вопрос симметрии кристаллов (в частности, сформулировал т.н. [Кюри принцип](#)) и проблему симметрии в физике вообще (1894). Исследования магнитных явлений привели к установлению зависимости магнитной восприимчивости парамагнитных тел от абсолютной температуры ([Кюри закон](#)) и к выявлению особенной температуры, выше которой ферромагнитные материалы превращаются в парамагнитные (температура [Кюри](#)). С 1898 вместе с женой М. [Склодовской-Кюри](#) занимался изучением [радиоактивности](#). Ими были открыты полоний и радий (1898), установленный сложный состав излучения радия и окрашивания стекла и фарфора под действием этого излучения (1899). В 1903 обнаружил спонтанное выделение тепла солями радия; проводил также исследование биологического действия радиоактивности. Нобелевская премия (1903). П. Кюри погиб под колесами омнибуса на улице Парижа.

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №5 (иногда нумеруется как 8)

“ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ”

Цель работы.

11. Экспериментальным путем установить распределение потенциала электрического поля между двумя параллельными пластинами.
12. Исследовать распределение силовых линий электрического поля в электростатической линзе.

Вступление.

Электростатическое поле в каждой точке пространства характеризуется напряженностью электрического поля E и потенциалом электрического поля φ , которые связаны между собой соотношением:

$$E = -\text{grad}\varphi \quad (1)$$

Вектор напряженности электрического поля E является силовой характеристикой поля. Его значение в данной точке пространства численно равно силе, которая действует на единичный положительный заряд, а направление E в данной точке пространства совпадает с направлением силы, действующий на положительный заряд, расположенный в этой точке.

Потенциал φ является энергетической характеристикой электрического поля и определяется работой, которую надо выполнить внешним силам, чтобы перенести единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку пространства. Для простоты и наглядности используются представления о силовых линиях и поверхностях равного потенциала (эквипотенциальных поверхностях). Электрические силовые линии соответствуют траекториям, вдоль которых начала бы двигаться в электрическом поле положительно заряженная частица без учета ее массы. Вектор E направлен вдоль касательной к силовой линии. Величина напряженности электрического поля в данной области пространства пропорциональна плотности силовых линий. Если объединить точки пространства, которые имеют одинаковый потенциал, то получим эквипотенциальные поверхности. Силовые линии ортогональны к эквипотенциальным поверхностям.

С технической точки зрения проще провести измерения скалярного потенциала электрического поля φ , чем вектора напряженности E .

Методика эксперимента.

Для моделирования взаимодействия статических электрических зарядов в работе используется процесс протекания тока в электролите, в котором расположена система электродов. Эта замена возможна, если поддерживать постоянные значения потенциалов на электродах. Докажем последнее утверждение с помощью закона Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E, \quad (2)$$

где j - плотность электрического тока, σ - электропроводность электролита. Электролит является однородным проводником, электропроводность σ является скаляром, поэтому

направления векторов \vec{j} и \vec{E} совпадают. Можно исследовать пространственное распределение электрического поля тока, с помощью измерения пространственного распределения потенциала электрического поля тока, протекающего в электролите. Для измерения потенциала электрического поля в электролите используется металлический зонд, который помещается в исследуемую точку. В электролите заряды переходят с зонда в раствор. Вследствие наличия малого электрического тока между зондом и электродами происходит выравнивание потенциала зонда и точки электролита, в которой находится зонд. Чтобы этот ток не искажал действительную картину электрического поля необходимо, чтобы сопротивление электрической цепи зонда было много больше, чем сопротивление электролита (на том же принципе основано применение вольтметра). Это условие реализуется тем, что в электрическую цепь зонда включен усилитель вертикального отклонения осциллографа, который имеет большое входное сопротивление (порядка $МОм$).

Чтобы потенциальная картина поля электрических токов в электролите была тождественна картине поля электростатических зарядов, необходимо поддерживать между электродами постоянное значение разности потенциалов. Если на электроды подавать постоянное напряжение, то протекает постоянный ток. Так как ток в электролите переносится свободными зарядами, в том числе ионами разных знаков, которые в отличие от электронов обладают достаточно большой массой, то на электродах оседают вещества из раствора электролита. Вследствие этих процессов картина распределения потенциала будет искажена, особенно вблизи электродов. Для предотвращения этого явления надо подавать на электроды переменное напряжение.

Покажем, что в этом случае линии электрического тока в электролите совпадают с линиями напряженности электрического поля. Поток вектора \vec{j} через замкнутую поверхность S , которая ограничивает объем V равен

$$\oint_S \vec{j} dS = \int_V \text{div} \vec{j} dV = dQ/dt, \quad (3)$$

где dQ/dt - электрический заряд, который пересекает за 1 секунду поверхность S , ограничивающую объем V . При протекании постоянного тока заряд Q в объеме V не изменяется, поэтому справедливо равенство $dQ/dt = 0$. Поэтому в каждой точке электролита $\text{div} \vec{j} = 0$ и при условии $\sigma = \text{const}$ соответственно и $\text{div} \vec{E} = 0$.

Это уравнение соответствует уравнению Лапласа для потенциала электростатического поля при отсутствии объемных зарядов $\text{div} \vec{E} = -\Delta\varphi = 0$. Кроме того, что распределение потенциала в электролите должно удовлетворять уравнению Лапласа $\Delta\varphi = 0$, необходимо, чтобы на границах раздела электролита и электродов выполнялись следующие граничные условия, которые заключаются в непрерывности электрического тока и потенциала.

Для выполнения работы используется лабораторный макет, изображенный на рис. 1.

В первой части работы исследуются эквипотенциальные линии электрического поля между двумя плоскими электродами. В электролитической ванне (B), которая заполнена электролитом (водопроводной водой), расположены металлические электроды ($1, 2$). На электроды подано переменное напряжение амплитудой $U = 16 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$. Электрическое поле между электродами исследуется с помощью зонда 3 , реостата R_2 и измерительного прибора N , в качестве которого может быть взят осциллограф или чувствительный вольтметр переменного тока. Для измерения разности потенциалов между точками 1 и 2 применяется вольтметр переменного тока V_2 .

Электрическое сопротивление реостата и сопротивление электролита между зондом и электродами образуют электрическую схему, известную под названием мостик Уитстона, в

диагональ которого включен чувствительный измерительный прибор N . Изменяя расположение зонда 3 по отношению к электродам 1 и 2, можно найти такие точки поля, потенциал которых равен потенциалу средней точки (ползунка) реостата R_2 . Геометрическое место точек с одинаковым потенциалом отвечает одной эквипотенциальной поверхности. При малой глубине ванны вместо поверхности получается ее горизонтальный разрез, то есть эквипотенциальная линия.

Необходимо нарисовать эквипотенциальные линии на миллиметровой бумаге для нескольких значений потенциала ползунка реостата R_2 .

В второй части работы исследуются процесс управления движением электронных пучков с помощью стационарных электрических полей. Эти вопросы изучаются в рамках электронной оптики. Название электронная оптика происходит ввиду сходства законов распространения света в прозрачных средах и движения электронных пучков в электрических полях.

Сила F , действующая на электрон, совпадает с направлением напряженности E . Ускорение электрона a также направлено вдоль E . Так как эквипотенциальные поверхности перпендикулярны E , то под влиянием электрического поля электроны двигаются так, что изменяется только нормальная к эквипотенциальной поверхности составная часть скорости. Тангенциальная составная скорости электронов при этом не изменяется. При переходе электрона из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 выполняется соотношение:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}, \quad (4)$$

где $\alpha_{1,2}$ - углы между соответствующими векторами скорости $v_{1,2}$ и их нормальными составными частями $v_{n1,n2}$. В геометрической оптике на границе раздела сред выполняется закон преломления Снеллиуса:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}. \quad (5)$$

Сравнивая соотношения (4) и (5) видим, что они совпадают, если вместо скоростей $v_{1,2}$ записать соответственно коэффициенты преломления двух оптически прозрачных сред n_1, n_2 .

Если электроны начинают движение в электростатическом поле с нулевой скоростью из области с нулевым потенциалом, то, ускоряясь электрическим полем, они получают кинетическую энергию. Кинетическая энергия электрона W в последующие моменты времени равна работе сил электрического поля A и определяется потенциалом φ точки пространства, где он находится: $W = A = e\varphi$. Поэтому уравнение (4) можно переписать и в таком виде

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sqrt{\varphi_2}}{\sqrt{\varphi_1}}. \quad (5)$$

Таким образом, в электронной оптике роль показателя преломления выполняет величина $\sqrt{\varphi}$. Закон преломления света при распространении в неоднородных оптически прозрачных средах переходит в закон преломления электронного пучка при движении в неоднородных электростатических полях при замене $n \rightarrow \sqrt{\varphi}$.

Если в пространстве между электродами 1 и 2 расположить еще один электрод, который составлялся бы с двух частей, то, подавая на эти части одинаковый потенциал, можно моделировать электростатическую линзу.

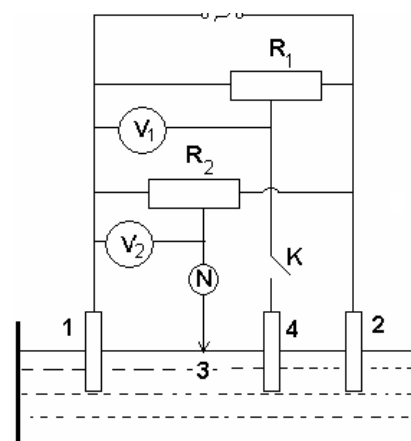


Рис. 1

Выполнение работы.

12. Собрать электрическую цепь, согласно схеме, представленной на рис.1.
13. Определить расположения электродов в ванне и отобразить это на миллиметровой бумаге.
14. Заполнить ванну электролитом и подать поочередно напряжение 1 В , 5 В , 10 В , 12 В на электроды 1,2.
15. Пользуясь измерительным прибором, определить эквипотенциальные линии, которые отвечают выбранной разности потенциалов между электродами 1,2 и нанести их на миллиметровую бумагу. Нарисовать силовые линии электрического поля.
16. Собрать электрическую цепь, расположив в пространстве между электродами 1 и 2 еще один электрод 4, который состоит из двух соединенных между собой пластин. Сперва заданном напряжении между электродами 1 и 2 необходимо измерить потенциал электрического поля φ_0 в том месте, где в последующем будет расположен электрод 4. Подавая на электрод 4 сперва потенциал $1,8\varphi_0$, а затем $0,5\varphi_0$, нарисовать на миллиметровке картину эквипотенциальных линий в обоих случаях. На основе анализа полученных результатов сделать выводы о свойствах электростатических линз в обоих случаях. В каком случае эти линзы будут собирающими или рассеивающими для электронов, для положительно заряженных ионов? Найти фокусное расстояние электростатической линзы для обоих случаев.

Контрольные вопросы.

13. Что такой потенциал и напряженность электрического поля и как они связаны?
14. Что такое силовые и эквипотенциальные линии электрического поля?
15. Почему можно заменить исследование поля неподвижных зарядов исследованием поля электрических токов?
16. Почему на электроды лабораторного макета подают переменное напряжение постоянной частоты?
17. Выведите закон преломления электронных пучков.
18. Объясните принцип эффект фокусировки или дефокусировки заряженных частиц электронной линзой.
19. Сформулируйте и запишите закон Кулона и теорему Гаусса.
20. Какие условия потенциальности электрического поля?
21. Докажите ортогональность эквипотенциальных и силовых линий электрического поля.



ФАРАДЕЙ Майкл (Faraday) (1791–1867). Английский физик, основоположник учения об электромагнитном поле. Обнаружил химическое действие электрического тока, взаимосвязь между электричеством и магнетизмом, магнетизмом и светом. Открыл (1831) электромагнитную индукцию – явление, которое легло в основу электротехники. Установил (1833–34) законы электролиза, названные его именем, открыл пара- и диамагнетизм, вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея). Доказал тождественность различных видов электричества. Ввел понятия электрического и магнитного поля, высказал идею существования электромагнитных волн.



Шарль Огюстен де КУЛОН (Charles Augustin de Coulomb) (1736–1806). Французский инженер и физик. Родился в провинциальном местечке Ангулем в семье влиятельных поместных дворян. Большую часть своей жизни Кулон посвятил военной инженерии. Выйдя в отставку по окончании военно-инженерной службы, где он занимался строительством каналов и фортификационных укреплений во Франции и ее колониях в Карибском регионе, получил назначение в Париж на должность консультанта, оставлявшую ему достаточно времени и сил для начала научной карьеры. В его честь единица СИ количества электричества носит название *кулон*.

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №6

“ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ”

Цель работы.

1. Исследовать вольтамперную характеристику $n - P$ перехода для светодиода при прямом включении.
2. Исследовать вольтамперную характеристику $P - n$ перехода для светодиода при обратном включении.
3. Исследовать $n - P$ переход с германиевым диодом, как выпрямитель переменного тока.

Вступление. Полупроводники n и P типа

Электрический ток в полупроводниках осуществляется электронами зон проводимости и валентности. Рассматривают два вида зарядов: отрицательные - электроны зоны проводимости и положительные - дырки зоны валентности. Их заряды равны по величине и противоположны по знаку. Дырки зоны валентности появляются при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости и представляют собой вакансии, то есть не занятые электронами места. Дырки подобно электронам могут двигаться, занимая соответствующие энергетические уровни. Обозначим концентрации электронов через n , а дырок - через P .

Электропроводность чистого полупроводника, который состоит из атомов одного сорта, обусловлена разрывом ковалентных связей между атомами при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости и называется собственной проводимостью. Электропроводность полупроводника, которая обусловлена атомами примеси, называется примесной проводимостью. Она бывает донорной или акцепторной.

Донорная проводимость имеет место, если в чистый полупроводник, например четырехвалентный германий или кремний, добавить пятивалентную сурьму, мышьяк или фосфор. В этом случае четыре электрона атома пятивалентной примеси примут участие в образовании ковалентных связей с атомами основного вещества, пятый же электрон, ненужный для этого, оказывается слабо связанным с атомом примеси (рис.1а).

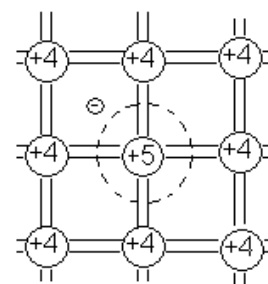


Рис.1а

Энергия его связи с атомом порядка $0,01 \text{ эВ}$, то есть значительно меньше ширины запрещенной энергетической зоны ΔW между зонами валентности и проводимости, которая составляет обычно около 1 эВ . Нижний энергетический уровень зоны проводимости обозначен через W_{Π} , верхний энергетический уровень зоны валентности – через W_B .

Примесные донорные атомы образуют дополнительные разрешенные уровни энергии в запрещенной зоне основного полупроводника вблизи дна зоны проводимости, которые обозначены через W_D (рис.1б).

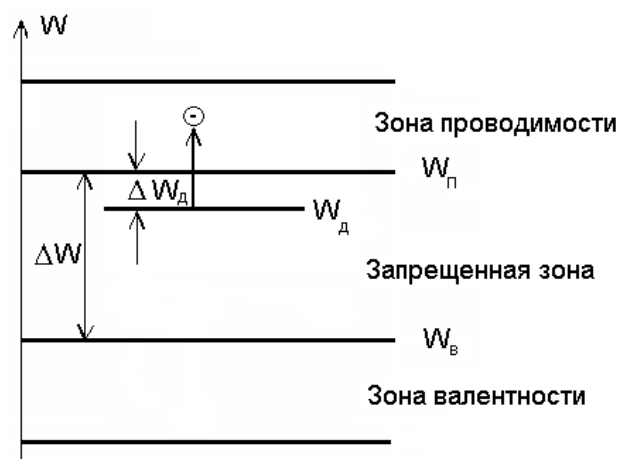


Рис.1б

При температуре абсолютного нуля эти уровни заполнены электронами и проводимость равно нулю. При комнатных температурах электроны донорных уровней получают тепловую энергию порядка $\Delta W_D \approx 0,01 \text{ эВ}$, необходимую для перехода в зону проводимости. Концентрация электронов в зоне проводимости практически равна концентрации донорных примесей n_D . Полупроводник, в котором равновесная концентрация электронов n_{n0} значительно превышает равновесную концентрацию дырок n_{p0} , называется электронным полупроводником, или полупроводником n - типа.

Для увеличения концентрации дырок в чистый полупроводник вводят небольшое количество акцепторной примеси. Для германия и кремния акцепторными примесями являются атомы третьей группы периодической системы (например, галлий или индий). Эти элементы имеют по три валентных электрона и, следовательно, для заполнения четырех валентных связей не хватает одного электрона. Акцепторные примеси имеют свойство захватывать и удерживать возле себя этот электрон. При этом примесные атомы превращаются в отрицательные ионы, а возле соседних атомов появляются дырки (рис.2а).

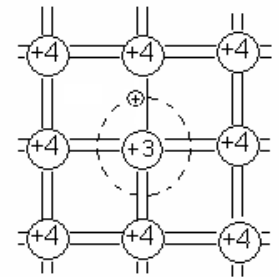


Рис. 2а

Акцепторные атомы образуют вспомогательные разрешенные равные энергии в запрещенной зоне вблизи валентной зоны, обозначенные через W_A (рис. 2б).

При абсолютном нуле температур эти уровни остаются свободными. Для того чтобы электрон перешел из валентной зоны на акцепторный уровень, необходимая небольшая энергия ΔW_A (порядка $0,01 \text{ эВ}$), которую можно получить за счет тепловой энергии при комнатных температурах. Поэтому акцепторные уровни заполняются электронами, а в зоне валентности появляются дырки. Концентрация электронов в акцепторной зоне при комнатных температурах практически равна концентрации акцепторных примесей n_A (рис.2б).

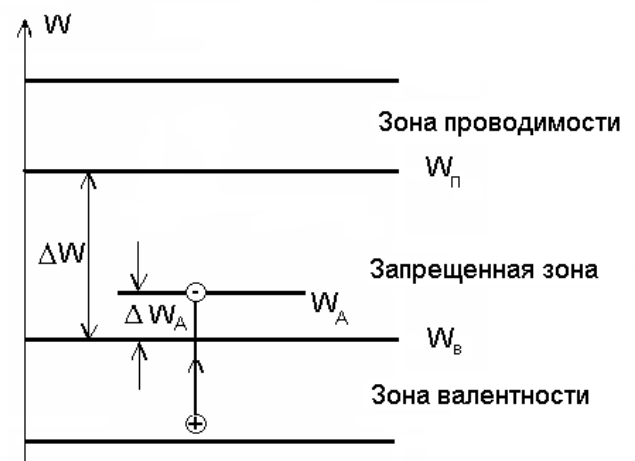


Рис.2б

Полупроводник, в котором равновесная концентрация дырок n_{p0} значительно превышает концентрацию электронов n_{n0} , называется дырочным полупроводником, или полупроводником P - типа.

Электроны в твердом теле и в каждом атоме занимают в первую очередь наиболее низкие разрешенные энергетические уровни. Поэтому при переходе электронов из валентной зоны на вспомогательные акцепторные уровни происходит перемещение электронов в валентной зоне, и в первую очередь освобождаются верхние энергетические уровни валентной зоны. Электроны зоны проводимости в первую очередь занимают самые низкие разрешенные энергетические уровни.

Уровень Ферми в полупроводниках

Распределение электронов зоны проводимости по энергиям в полупроводниках определяется функцией Ферми-Дирака $f_n(W)$, которая дает вероятность того, что разрешенный уровень с энергией W будет занят электроном

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + \exp\{(W - W_F)/kT\}}, \quad (1)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, W_F - энергия Ферми. При любых значениях температуры полупроводника T уровень Ферми совпадает с уровнем, вероятность заполнения которого электронами равна 50 %. При температуре $T = 0^\circ K$ для всех значений энергии $W > W_F$ функция распределения $f_n(W) = 0$. В этом случае все энергетические уровни зоны проводимости, расположенные выше уровня Ферми, уровни свободны.

Вероятность того, что разрешенный уровень с энергией W будет занятый дыркой, определяется функцией распределения дырок $f_p(W)$

$$f_p(W) = \frac{1}{1 + \exp(W_F - W/kT)} = 1 - f_n(W). \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) следует, что $f_p(W) + f_n(W) = 1$. Это значит, что вероятность того, что энергетический уровень заполнен или свободен при любой температуре равна единице.

При $T = 0^\circ K$ функция $f_p(W)$ для всех значений $W < W_F$ равна нулю, то есть дырок с такими энергиями нет и все состояния заполнены электронами. Все энергетические уровни валентной зоны расположены ниже уровня Ферми.

Вероятность нахождения электрона на уровне с энергией Ферми при любой температуре равна 50 %. Уровень Ферми представляет собой химический потенциал электронов данного твердого тела в расчете на один электрон. В состоянии термодинамического равновесия уровень Ферми всего данного кристалла полупроводника является общим (одинаковым) независимо от присутствия примесей и распределения их концентрации по объему кристалла.

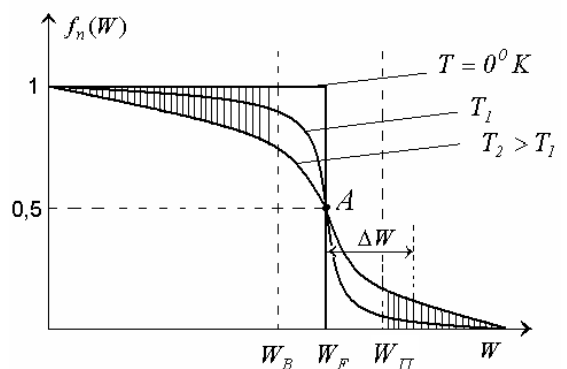


Рис.3а

Если представить себе, что электрон из верха валентной зоны с уровнем W_B переходит на дно зоны проводимости на уровень $W_П$, то при этом выполняется работа, которая равна ширине запрещенной зоны. Эта работа распределяется поровну на образование электрона и дырки.

График функции Ферми для собственного полупроводника при температуре $T = 0^\circ K$ имеет вид прямоугольника (рис. 3а). С повышением температуры функция Ферми переходит в плавную кривую, симметричную относительно точки A .

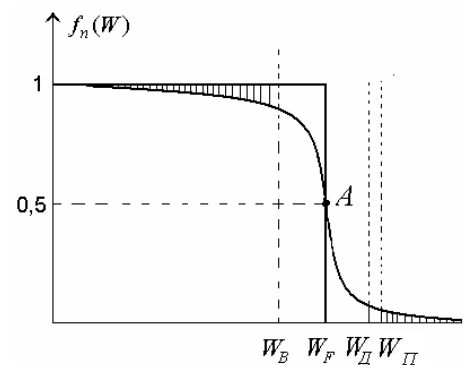


Рис.3б

В полупроводниках n - типа переход электронов из донорных уровней в зону проводимости не связан с появлением дырок. Поэтому вероятность появления электронов в зоне проводимости большая, чем вероятность появления дырок.

Это возможно лишь в случае, когда уровень Ферми будет смещен в сторону зоны проводимости (рис.36). Чем высшая концентрация донорной примеси, тем ближе к зоне проводимости расположенный уровень Ферми.

Аналогично можно показать, что в полупроводнике P - типа уровень Ферми будет смещен в сторону валентной зоны тем больше, чем выше концентрация акцепторной примеси. На рис. 36 W_D - энергетический уровень донорной примеси.

p-n переход.

На границе областей с дырочной и электронной проводимостями возникает $n-p$ переход. Различие в концентрации дырок и электронов в полупроводниках P - и n -типа приводит к диффузии положительных зарядов из P в n область и отрицательных зарядов из n в P область. Возле $n-p$ перехода дырочный полупроводник заряжается отрицательно, а электронный - положительно (рис. 4а). Это препятствует диффузии электронов и дырок. На границе полупроводников возникает запирающий слой шириной d . Он препятствует движению основных носителей заряда (электронов в n - и дырок в P - полупроводнике).

Потенциальная энергия электрона E_d в n -области определяется его зарядом e и потенциалом ϕ $p-n$ перехода в этой области ($E_d = -e\phi < 0$). Она будет меньше потенциальной энергии E_d не основных носителей (дырок) в n -полупроводнике ($E_d = e\phi > 0$). В P -полупроводнике потенциал $p-n$ перехода отрицательный и потенциальная энергия неосновных носителей (электронов) будет большей, чем энергия дырок.

На рис.4а сплошной линией показана потенциальная энергия электронов в n - и P - полупроводниках, а пунктирной - потенциальная энергия дырок. При отсутствии внешнего электрического поля основные носители заряда не могут преодолеть потенциальный барьер, который образован запирающим слоем шириной d , и перейти из валентной зоны в зону проводимости. Некоторому количеству основных носителей заряда все же удастся преодолеть потенциальный барьер, вследствие чего через переход потечет небольшой ток I_0 . Этот ток компенсируется встречным током неосновных носителей I_H .

Если на n - полупроводник подать положительный потенциал, а на P - отрицательный, то электроны и дырки под действием электрического поля придут в движение от области $p-n$ перехода (рис. 4б). Закрывающий слой расширяется и его сопротивление увеличивается. Увеличивается и высота потенциального барьера. Поэтому основные носители не могут преодолеть его, и через $p-n$ переход потечет ток только неосновных носителей I_H .

p - n

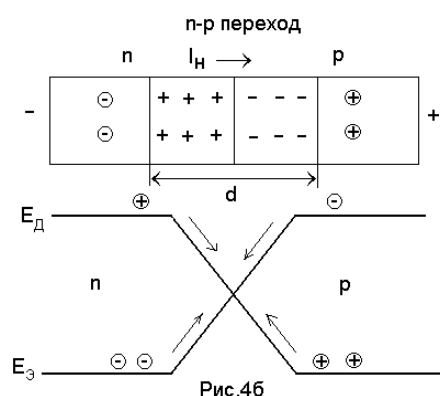


Рис.4б

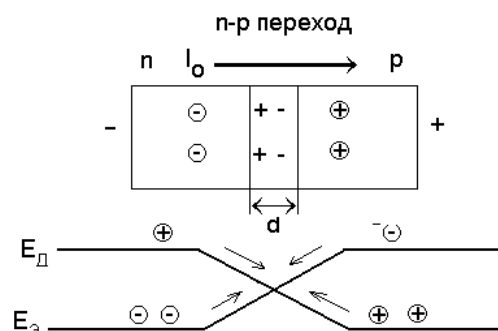


Рис.4в

Если на n -полупроводник подать отрицательный потенциал, а на P - положительный, то электроны и дырки под действием электрического поля придут в движение в направлениях к $P-n$ переходу (рис. 4в). Запирающий слой сужается, его сопротивление уменьшается. Уменьшается и высота потенциального барьера. Основные носители приходят в движение через $P-n$ переход, создавая большой основной ток I_0 . При этом ток неосновных носителей значительно меньше основного тока.

Если на $P-n$ переход подать переменное напряжение, то через него большой ток будет протекать только во время одного полупериода, когда на n -полупроводнике отрицательный потенциал, а на P -положительный. Поэтому $P-n$ переход можно использовать для выпрямления переменного тока.

Методика эксперимента.

Для исследования $P-n$ перехода используется схема, показанная на рис.5. В работе исследуется его вольтамперная характеристика при прямом и обратном включении светодиода VD1.

При прямом протекании тока на светодиод VD1 подается постоянное напряжение, которое изменяется в пределах $0B - 15B$ и измеряется вольтметром. Для измерения прямого тока используется миллиамперметр с пределами измерений до $15mA$. Во время прохождения прямого тока светодиод VD1 излучает свет.

При обратном протекании тока на светодиод VD1 подается постоянное напряжение, которое изменяется в пределах (!!!) $0B - 5B$ и измеряется вольтметром. Для измерения обратного тока используется микроамперметр с пределами измерений до $1000 \mu A$.

Емкость $P-n$ перехода определяется для германиевого диода VD2. Для этого используется конденсатор с емкостью $C = 5000n\Phi$, генератор звуковой частоты и осциллограф.

Выполнение работы.

1. Исследовать $P-n$ переход с светодиодом VD1 при прямом включении диода (рис.5). Включить источник постоянного напряжения и изменять напряжение от $0B$ до $15B$, измеряя миллиамперметром силу тока в цепи I_0 и напряжение на диоде U_D . Определить прямое сопротивление $P-n$ перехода R для всех значений входного напряжения по формуле:

$$R_{PP} = U_D / I_0 \quad (3)$$

2. Построить графики зависимостей $I_0(U_D)$ и $R_{PP}(U_D)$.

3. Исследовать $P-n$ переход со светодиодом VD1 при обратном включении диода (рис.6).

Включить источник постоянного напряжения и, изменяя напряжение через $1B$ от $0B$ до $5B$, измерить микроамперметром силу тока в цепи.

4. Используя полученные данные вычислить значения обратного сопротивления $P-n$ перехода R_{OB} для всех значений входного напряжения. Так как $R_{OB} \gg R_{PP}$, то

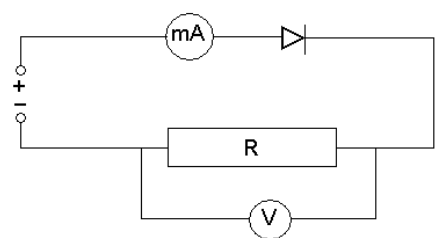


Рис.5

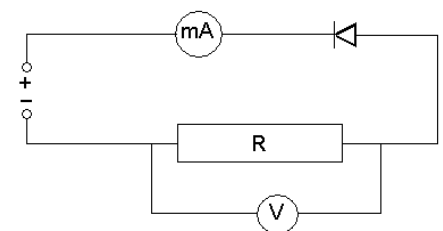


Рис.6

$$R_{OB} = U_D / I_{OB} \quad (4)$$

5. Построить графики зависимостей $I_{OB}(U)$ и $R_{OB}(U)$. По графикам подсчитать коэффициент передачи тока $K_I = I_{PP} / I_{OB}$ при одном и том же прямом и обратном напряжении на диоде.

6. Исследовать $p-n$ переход с германиевым диодом VD2 как выпрямитель переменного тока. Собрать схему согласно рис.7 и с помощью осциллографа наблюдать одностороннюю проводимость $p-n$ перехода. Зарисовать полученные характеристики.

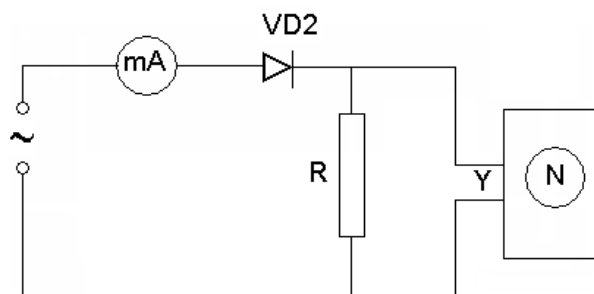


Рис.7

7. Исследовать $p-n$ переход с германиевым диодом VD2 как выпрямитель переменного тока. Собрать схему согласно рис.8. Эта схема отличается от схемы на рис.7 тем, что для сглаживания пульсаций выходного напряжения параллельно сопротивлению R , которое подается на осциллограф N , подключен конденсатор C . Убедиться в том, что выпрямительные свойства RC -фильтра зависят от характерного времени $\tau = RC$, которое должно быть порядка периода переменного напряжения подаваемого с звукового генератора. Зарисовать полученные характеристики.

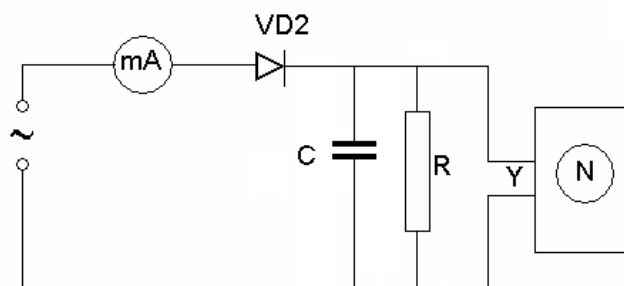


Рис.8

Контрольные вопросы.

1. Что такая валентная зона, зона проводимости и запрещенная зона?
2. Что такое полупроводники n - и p -типа?
3. Что такое собственная, акцепторная и донорная проводимость?
4. Какой статистикой описываются электроны проводимости в полупроводнике?
5. Что такое дырки проводимости и какой статистикой они описываются?
6. Когда и почему $p-n$ переход имеет емкость? Как можно ее измерить?
7. От чего зависит ширина $p-n$ перехода? Как можно ее измерить?



Энрико Ферми (29.9.1901 – 28.11.1954)

В 1926 г. занял должность профессора кафедры теоретической физики университета в Риме. Здесь он занялся исследованием искусственной радиоактивности. Энрико Ферми решил повторить опыты супругов Ирен и Фредерика Жолио-Кюри по бомбардировке образцов разных веществ, заменив альфа-частицы, выступающие в роли "снарядов", нейтронами. В то время физики не считали нейтроны пригодными для расщепления атомов. В 1938 г. Ферми был удостоен Нобелевской премии по физике - "за открытие искусственной радиоактивности, вызванной медленными нейтронами". В том же году Ферми эмигрировал в США и стал

профессором Колумбийского университета и руководителем исследований в области исследования ядерной энергии, участвовал в создании проекта атомной бомбы.

Под руководством Энрико Ферми в декабре 1942 г. в США был запущен первый в мире ядерный реактор.

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №7

“ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ”

Цель работы.

1. Изучить явление термоэлектронной эмиссии.
2. Определить работу выхода электрона из материала катода.
3. Определить значения удельного заряда электрона.

Вступление.

Валентные электроны в металлах не связаны со своими атомами и могут свободно двигаться внутри металла. Они образуют газ свободных частиц. На границе металл-вакуум существует потенциальный барьер, который препятствует электронам покинуть металл. По этой причине металл представляет собой для электронов некоторую потенциальную яму. Ее глубина определяется величиной работы, которая необходима, чтобы удалить электрон из металла на бесконечность. Необходимую энергию можно сообщить электрону, например, нагревая металл. Процесс излучения электронов нагретыми металлами называется термоэлектронной эмиссией. Распределение электронов проводимости в металле по энергиям W описывается квантовой статистикой Ферми-Дирака с функцией распределения $f_n(W)$:

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + \exp\{(W - W_F)/kT\}}, \quad (1)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, W_F - энергия Ферми.

$$E_F = \frac{h^2}{2m} (3n/8\pi)^{2/3}. \quad (2)$$

В формуле (2) h - постоянная Планка, m - масса электрона, n - концентрация свободных электронов в металле. Энергия Ферми – это наибольшая энергия, которую может иметь электрон при нулевой температуре ($T = 0^\circ K$).

На рис. 1 показанное распределение электронов по энергиям при $T = 0^\circ K$ (сплошная линия 1) и для $T > 0^\circ K$ (пунктирная кривая 2).

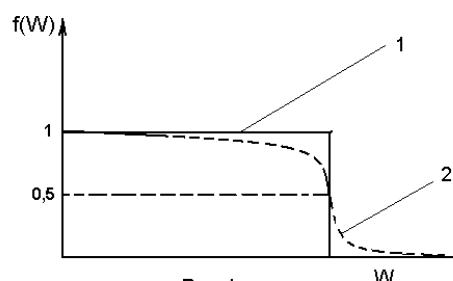


Рис.1

При температуре $T > 0^\circ K$ появляются электроны, которые могут покинуть металл. Но они не могут далеко отойти от поверхности металла, так как в металле индуцируется положительный заряд, который притягивает электрон к металлу. Каждый новый электрон, покидающий металл, должен преодолеть отталкивающее действие со стороны электронов, которые вылетели ранее, и действие силы притяжения к металлу, который приобретает положительный заряд после вылета электрона. Для того чтобы электрон мог покинуть металл, он должен иметь некоторую энергию, величина которой определяется свойствами металла. При отсутствии внешних полей между металлом и отрицательно заряженным облаком электронов существует динамическое равновесие, при

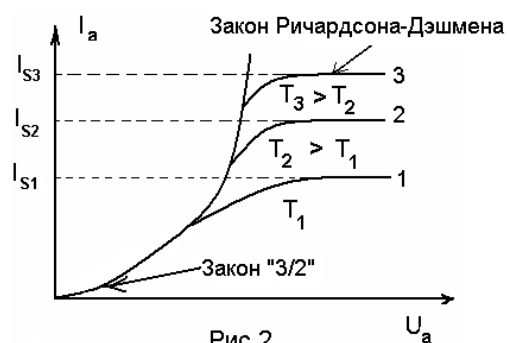


Рис.2

котором среднее число электронов, которые покидают металл, равно среднему числу электронов, возвращающихся в металл.

У поверхности металла можно создать электрическое поле, так, что электронное облако уменьшится и отойдет от катода. В этом случае тормозящее действие облака уменьшится, и металл смогут покинуть новые электроны. Величина энергии, которую надо сообщить электронам, имеющим наибольшую энергию $E = E_F$ при температуре $T = 0^0 K$, для того, чтобы они оставили металл, называют работой выхода A_ϕ . Работа выхода обычно измеряется в электрон-вольтах и имеет значение порядка $1-5 \text{ эВ}$. Получить термоэлектрический ток можно в вакуумном диоде (вакуумной лампе с двумя электродами: катодом и анодом). Можно подать на анод положительное напряжение относительно катода, используя источник постоянного напряжения. Электрическое поле, действующее на электрон внутри диода, будет состоять из поля между электродами и поля, создаваемого электронным облаком. Зависимость величины тока через диод I_a от приложенного анодного напряжения U_a для нескольких значений температуры катода показанная на рис. 2

При малых значениях напряжения U_a , когда скорость электронов, вылетающих из катода, равна или близка к нулю, влияние пространственного заряда облака электронов существенно и зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a имеет вид:

$$I_a = \xi U_a^{3/2}, \quad (3)$$

где ξ - некоторая константа, определяемая геометрией электродов вакуумного диода. Уравнение (3) называют законом Ленгмюра-Богуславского. Для диода с цилиндрическими коаксиальными электродами коэффициент пропорциональности ξ имеет такой вид:

$$\xi = \frac{2^{3/2} (e/m)^{1/2} L}{9R\beta^2}, \quad (4)$$

где e/m - удельный заряд электрона, $R = 0.7 \text{ см}$, $L = 1.0 \text{ см}$, где R и L - радиус и длина катода, коэффициент $\beta = 4.28$. Отметим, что все величины, необходимые для определения ξ , необходимо брать в системе СГС.

При достаточно больших значениях анодного напряжения U_a ток в лампе достигает тока насыщения I_s . Плотность тока насыщения j_s определяется максимальным потоком электронов, покидающих катод. Поток электронов равен количеству электронов, которые покидают катод с единицы поверхности в единицу времени. Управлять значением j_s , можно изменяя ток накала, который определяется температурой катода. Зависимость j_s от температуры катода и его материала определяется законом Ричардсона - Дэшмена:

$$j_s = BT^2 \exp(-A_\phi / kT), \quad (5)$$

где $B = 4\pi me k^2 / h^3 = 1.204 \cdot 10^6 \text{ А}/(\text{м}^2 \text{град}^2)$ - константа, одинаковая для всех металлов, A_ϕ - работа выхода электронов из металла. Ток эмиссии зависит от температуры по экспоненциальному закону, быстро возрастаая при ее увеличении.

Из формулы (5) видно также, что для получения больших значений тока необходимо использовать катоды из материалов с меньшей работой выхода электронов. Работа выхода электронов из оксидированных (т.е. покрытых окислами лужноземельных металлов) и торированных (вольфрамовых (W), покрытых молекулярным слоем тория) катодов значительно меньше, чем работа выхода электронов с поверхностей чистых металлов. Используются также бариевые и ($W + Ba$) и цезиевые ($W + Cs$) катоды.

Описание экспериментальной установки.

Величина тока через лампу определяется температурой катода и напряженностью электрического поля в лампе. При достаточно большой напряженности электрического поля, все электроны, покидающие катод, попадают на анод. При этом достигается насыщение тока через лампу, когда дальнейшее увеличение напряжения на аноде U_a не приводит к сколь либо существенному увеличению анодного тока. Напряжение на аноде U_a и температура катода определяется блоками питания постоянного тока.

Температуру катода рекомендуется находить по зависимости плотности тока насыщения j_s от температуры катода T в соответствии с графиком, изображенным на рис.4.

При проведении расчетов считать, что диаметр провода катода $d = 0,08 \text{ мм}$, а его длина $L = 1,0 \text{ см}$. В режиме насыщения ток эмиссии катода равен анодному току.

Выполнение работы.

1. Собрать схему, изображенную на рис. 3, используя вакуумный диод 1Ц11П.

2. Исследовать зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a , изменяя напряжение U_a в пределах от 0 В до 50 В , пользуясь блоком питания постоянного тока.

3. Нарисовать график зависимости $I_a(U_a)$ для трех значений тока накала $I_n = 150 \text{ мА}, 160 \text{ мА}, 170 \text{ мА}$, выходя на режим насыщения анодного тока (область закон Ричардсона-Дэшмена на рис.2).

4. Вычислить работу выхода A_ϕ электронов из материала катода. Для этого из формулы (5) получим

$$\ln j_s = \ln B + \ln T^2 - A_\phi / kT. \quad (6)$$

Поскольку $\ln T$ изменяется значительно медленнее по сравнению с $1/T$, то можно приближенно считать, что $\ln T = \text{const}$.

Тогда

$$\ln j_s = \text{Const} - A_\phi / kT. \quad (7)$$

График зависимости $\ln j_s$ от величины $1/T$ представляет собой прямую линию. Тангенс угла наклона этой прямой равен A_ϕ / k . Тангенс угла наклона один и тот же, как для графика плотности тока $j_s(1/T)$, так и для графика тока насыщения $I_s(1/T)$, причем в любых единицах измерения.

5. Записать A_ϕ в электронвольтах и сравнить с работой выхода для других металлов, пользуясь справочной литературой. Оценить погрешность в определении A_ϕ .

6. Определить зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a для различных токов накала на нелинейном участке вольтамперной характеристики диода (область Закон “3/2” на рис.2), пользуясь схемой, показанной на рис. 3. Построить графики $I_a = I_a(U_a^{3/2})$.

7. Из полученных графиков определить среднее значение углового коэффициента ξ , который входит в формулу (4).

8. Вычислить величину удельного заряда электрона, пользуясь формулой

$$e/m = \frac{81R^2\beta^4\xi^2}{8L^2}. \quad (8)$$

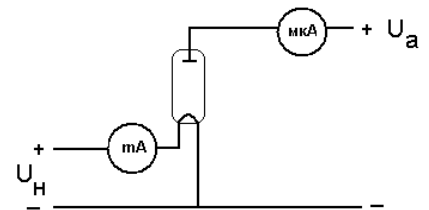


Рис.3

Отметим, что формула (8) записана в системе СГСЭ. При этом для лампы 1Ц11П считать, что $\beta = 4.28$, $R = 0.7 \text{ см}$, $L = 1.0 \text{ см}$.

9. Нарисовать зависимость силы анодного тока I_a от температуры катода T при фиксированном значении анодного напряжения U_a на основе данных измерений при трех значениях тока накала $I_n = 150 \text{ mA}, 160 \text{ mA}, 170 \text{ mA}$.

Контрольные вопросы.

6. Какие виды эмиссии электронов из металла Вам известны?
7. Что такая работа выхода?
8. Выведите закон Ленгмюра-Богуславского для вакуумного диода с плоскими электродами.
9. Почему образуется потенциальный барьер на границе металл-вакуум?
10. Какие физические процессы определяют различные участки вольтамперной характеристики вакуумного диода?
11. Как зависит вольтамперная характеристика лампы от температуры катода?
12. Что такое ток насыщения? Как он зависит от температуры катода и почему?
13. Почему в вакуумном диоде может существовать анодный ток даже тогда, когда на анод подается небольшой отрицательный потенциал?



Томас Алва Эдисон (Edison) (1847-1931) Американский изобретатель и предприниматель. Автор свыше 1000 изобретений, главным образом в различных областях электротехники. Усовершенствовал телеграф и телефон, изобрел фонограф (1877), лампу накаливания (1879), аккумуляторную батарею (1889). Построил первую в мире электростанцию общественного пользования (1882) и многое др. Сфера деятельности Эдисона может быть прослежена по его патентам: 389 в области электрического освещения и электричества, 195 в области фонографа, 150 – телеграфия, 141 – аккумуляторные батареи, 34 – телефония. Обнаружил (1883), что между горячей нитью лампы накаливания и другим электродом, помещенным в эту же лампу, течет ток, и что этот ток течет только в одном направлении (процесс термоионной эмиссии – испускание веществом положительных и отрицательных ионов при нагревании). Процесс был назван «эффект Эдисона». Изобрел щелочную аккумуляторную батарею (АКБ) (1889). К 1909 Эдисон стал основным поставщиком АКБ для подводных лодок и транспортных средств (он даже организовал компанию по изготовлению электрических автомобилей). В 1912 Генри Форд, один из поклонников Эдисона, заказал ему АКБ для автомобильного стартера.

РИЧАРДСОН (Richardson) Оуэн Уилланс (1879-1959), английский физик, член Лондонского королевского общества (с 1913). Основные труды по термоэлектронной эмиссии. В 1901 нашёл зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии от температуры поверхности металла ([Ричардсона-Дэшмена формула](#)). Занимался изучением фотоэлектрического эффекта, эмиссии электронов под действием химических агентов, некоторых вопросов магнетизма, квантовой теории, спектроскопии, физики рентгеновских лучей и т. д. Нобелевская премия (1928).

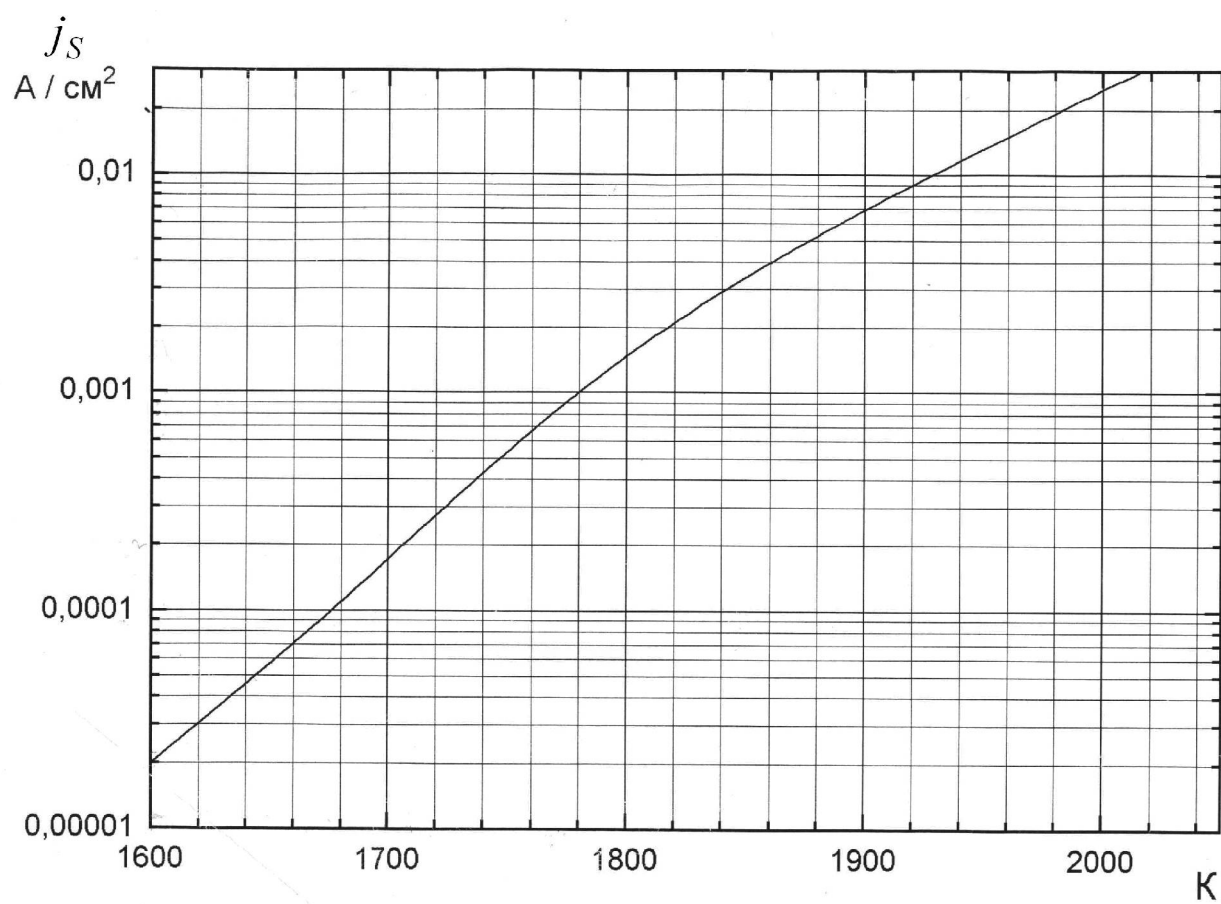


Рис.4. Зависимость тока насыщения от температуры

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №8

“ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕЕБЕКА”

Цель работы:

1. Исследовать термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) возникающую в электрической цепи, состоящей из различных металлов, места контактов которых поддерживаются при различных температурах.
2. Определить зависимость ТЭДС от разности температур контактов.
3. Определить удельную ТЭДС термопары хромель - конпель.

Вступление

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух проводников 1 и 2 с различной концентрацией электронов n_1 и n_2 (для определенности предположим, что $n_2 > n_1$) (рис. 1).

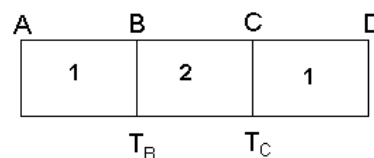


Рис.1

Пусть температуры проводников и контактов равны ($T_B = T_C$). Различие в концентрациях проводников приводит к процессу диффузии. При этом некоторое количество электронов переходит из второго проводника, где их концентрация больше в проводники 1, где концентрация электронов меньше. Следовательно, проводник 2 заряжается положительно, а проводники 1 заряжаются отрицательно.

Поскольку цепь разомкнута, то плотность тока \vec{j} в цепи равна нулю. По закону Ома напряженность электрического поля \vec{E} в каждой точке проводника тоже равна нулю. Это значит, что потенциал внутри проводника постоянный. Следовательно, электрическое поле внутри проводников может быть только в приграничных областях B и C (и на границе проводников 1 с вакуумом). При этом потенциал φ в областях контактов B и C должен резко изменяться (рис. 2а).

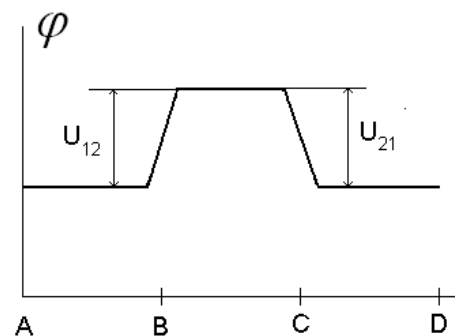


Рис.2а

Скачки потенциала φ в контактах B и C равны по величине и противоположны по знаку, и потому вольтметр, присоединенный к концам цепи A и D, не покажет падения напряжения. Это значит, что суммарная работа сил электрического поля и сторонних сил на участке AD равна нулю.

Предположим, что температура контакта B T_B больше температуры контакта C T_C . Для простоты будем считать, что температура разомкнутых контактов A та B одинакова и равна T_C . Поскольку тепловые скорости электронов вблизи контакта B большие, чем вблизи контакта C, то в проводнике 2 возникает диффузионный поток электронов, направленный от B к C. Для случая полупроводников концентрация электронов увеличивается при повышении температуры, появится дополнительный поток электронов в том же самом направлении, вызванный разностью концентраций электронов на горячем и холодном концах проводника. Поэтому на концах проводника 2 устанавливается электрическое поле, которое препятствует диффузии электронов. В равновесном состоянии под действием этого поля диффузионный ток исчезает и на концах проводника 2 возникает разность потенциалов. Сказанное целиком относится и к

проводникам 1. Вследствие диффузии и контактных скачков потенциалов U_{12} и U_{21} в цепи $ABCD$ возникает напряжение U , которое называется ТЭДС ε . Она состоит из падения напряжения в объеме проводника и скачков потенциала на контактах. Распределение потенциала в цепи, показано на рис.26.

ТЭДС пропорциональна разности температур контактов, если эта разность не очень большая:

$$\varepsilon = \alpha(T_B - T_C), \quad (1)$$

где α - удельная ТЭДС (или дифференциальная ТЭДС), которая возникает при разности температур контактов в $1^\circ K$. Удельная ТЭДС определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT}. \quad (2)$$

Она зависит не только от данной пары проводников, но и от температуры контакта. В таблице 1 приведены значения α для нескольких металлов и сплавов по отношению к свинцу в интервале температур $0^\circ C - 100^\circ C$. Положительный знак α отвечает тем металлам, к которым течет ток через нагретый спай. Пользуясь этой таблицей, можно вычислить ТЭДС не только относительно свинца, а и для любой другой пары металлов. Так, например, удельная ТЭДС пары хромель-копель, которая исследуется в данной работе, равна: хромель-копель = (хромель-свинец) - (копель - свинец) = 24 - (-38) = 62 мкВ/град.

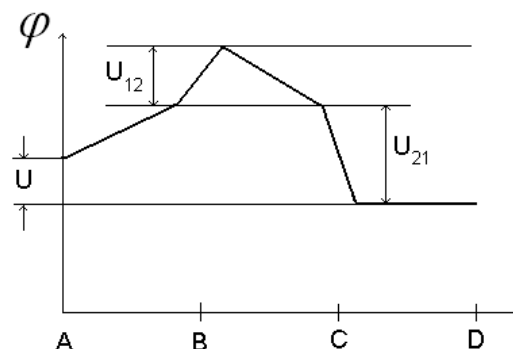


Рис.26

Таблица 1.

Название металла или сплава	ТЭДС мкВ/град
Сурьма	+43
Хромель (90%, 10%)	+24
Железо	+15
Медь	+3.2
Алюминий	-0.4
Копель (56%, 44%)	-38
Висмут	-68

Из приведенной таблицы видно, что ТЭДС у термопар, которые состоят из металлов мала. В полупроводниковых термопарах ТЭДС больше в десятки и сотни раз.

Одна из причин, которая обуславливает объемную составляющую термоЭДС, связана с неоднородным распределением температуры в проводнике. Если градиент температуры поддерживается постоянным, то через проводник будет идти постоянный поток тепла. В металлах перенос тепла осуществляется в основном движением электронов проводимости. Возникает диффузионный поток электронов, направленный против градиента температуры. В результате, концентрация электронов на горячем конце уменьшится, а на холодном увеличится. Внутри проводника возникнет электрическое поле E_T , направленное против градиента температуры, которое препятствует дальнейшему разделению зарядов.

Описание экспериментальной установки.

Принципиальная электрическая схема установки, показана на рис. 3.

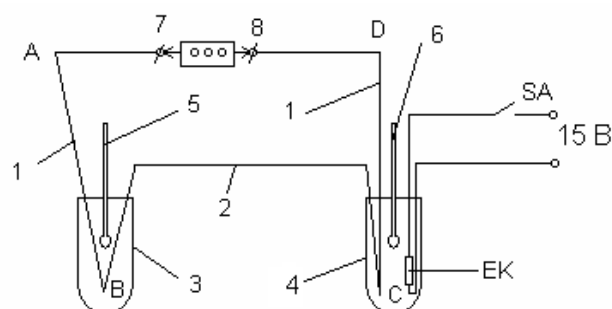


Рис.3

Термопара состоит из сплавов хромель 1 и конпель 2. Места спаев B и C погружены в термостаты 3 и 4, которые наполнены стеарином. Сюда же погружены и термометры 5 и 6. В термостате 4 есть нагреватель EK , который подключается через переключатель SA к источнику постоянного напряжения $15 В$. Клеммы 7,8 ($X1, X2$) используются для подключения цифрового вольтметра.

Выполнение работы.

17. Подключить цифровой вольтметр к клеммам 7,8. Записать температуру холодного спая.
18. Переключателем SA замкнуть цепь питания нагревателя и нагреть термостат 4 на $4^{\circ}C - 5^{\circ}C$, после этого выключить нагреватель EK . Ввиду тепловой инерции системы температура еще будет некоторое время подниматься. Когда температура установится, определить по шкале вольтметра ТЭДС ε . Температуру горячего спая T_C и соответствующую ей ТЭДС ε записать в таблицу измерений.
19. Руководствуясь пунктом 2, продолжить нагревания до $70^{\circ}C$, проводя измерения через каждые $(5-6)^{\circ}C$. Периодически контролировать температуру T_B холодного спая.
20. Отключить нагреватель и измерить ТЭДС ε при охлаждении спая C до температур, которые измерялись при нагревании. Данные занести в таблицу. Определить среднее значение ТЭДС ε , полученное как при нагревании спая C , так и при его охлаждении.
21. Построить график зависимости $\varepsilon = f(T_B - T_C)$.
22. По этому графику определить удельную ТЭДС и сравнить ее величину со значением, найденным согласно данным таблицы 1 для термопары хромель - конпель.
23. Определить погрешность измерения удельной ТЭДС α .

Контрольные вопросы.

1. Какими физическими процессами обусловлено возникновение контактной разности потенциалов?
2. Чему равно сумма контактной разности потенциалов цепи, которая состоит из различных металлов, при одинаковой и различной температурах контактов?
3. Как определяется и от чего зависит удельная ТЭДС термопары?
4. Как определить ТЭДС по известному значению удельной ТЭДС α и температурам концов термопары?
5. Как определить ТЭДС для любой из пар металлов, используя данные таблицы 1?
6. Почему значения удельной ТЭДС металлов и сплавов в таблице 1 приведены относительно свинца?
7. Где больше удельная ТЭДС α - в полупроводниках или металлах?
8. Что можно сказать о знаке α для металла $M1$ на рис.4, если проводник $M2$ - свинец?
9. Объясните возникновение термоЭДС в однородном материале в результате пространственной неоднородности температуры (рис.5).

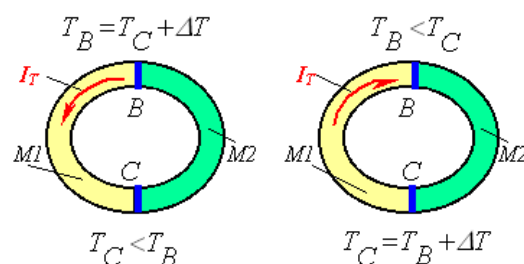


Рис.4

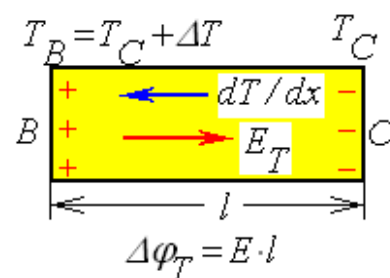


Рис.5

Какой знак свободных носителей заряда в данном случае? Как связаны перенос тепла и заряда в данном случае?

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №9

“ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ЕМКОСТНЫМ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ”

Цель работы.

- Изучить поведение активного и емкостного сопротивлений в цепи переменного синусоидального тока.
- Получить зависимость индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты тока.
- Определить мощность, выделяемую в цепи с активным и емкостным сопротивлениями.

Введение.

Цепь переменного синусоидального тока с активным и емкостным сопротивлением.

Рассмотрим конденсатор емкостью C , последовательно соединенный с активным сопротивлением R (рис.4). Колебания частоты ω возбуждаются источником переменной ЭДС $U = U_m \cos \omega t$.

Дифференциальное уравнение, описывающее колебания тока и напряжения в цепи с активным и емкостным сопротивлениями имеет вид

$$\frac{Idt}{C} + RI = U. \quad (16)$$

Алгебраический метод для установившихся вынужденных колебаний в цепи заключается в том, что мы ищем решение уравнения (16) в виде

$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (17)$$

Подставляя (17) в уравнение (16), получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = 1/(\omega CR), \quad (18)$$

$$I_m = U_m / \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}, \quad (19)$$

где $X_C = 1/(\omega C)$ играет роль емкостного сопротивления.

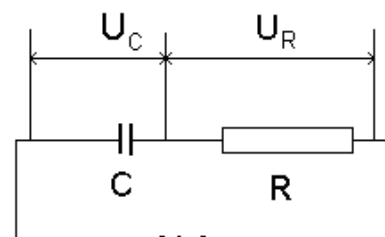


Рис. 4

Метод векторных диаграмм. Пусть в цепи катушки существует переменный синусоидальный ток

$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (20)$$

Напряжение U , приложенное к цепи, одновременно существует на активном R и емкостном сопротивлениях X_C :

$$U_a = IR \text{ и } U_L = I/\omega C. \quad (21)$$

Для построения результирующего напряжения U по составляющим U_a и U_C , необходимо векторное сложение U_a и U_C . Для удобства будем строить диаграммы, используя действующие значения величин U_a и U_C .

Действующее значение силы тока I одно и то же в сопротивлениях R и X_C . Отложим вектор тока I на диаграмме (рис.5) в горизонтальном направлении.

При этом напряжение U_a совпадает по фазе с током I и, следовательно, направление вектора U_a совпадает с направлением вектора тока I .

Напряжение на конденсаторе $U_C = \int \frac{C}{I} dt$ отстает по фазе от тока через конденсатор I на угол $\pi/2$, поэтому вектор U_C направлен вдоль вертикальной

оси вниз. Сложив вектора напряжений U_C и U_a , получим вектор действующего напряжения U , модуль которого равен:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_C^2} . \quad (22)$$

Полное сопротивление всей цепи $Z = U / I$ из (9) равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} , \quad (23)$$

а сила тока I

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \quad (24)$$

Из треугольника сопротивлений (рис.5) получаем, что $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I}{\omega CR}$. Так как напряжение U отстает по фазе от тока I на угол φ , то угол - положительная величина.

Мгновенная мощность, рассеиваемая в цепи, равна

$$P = U_m I_m \cos(\omega t + \varphi) \cos \omega t , \quad (25)$$

и уже не является синусоидальной величиной (рис.6). Средняя за период активная мощность P , расходуемая источником на активном сопротивлении R , равна (13), где угол φ определяется выражением (18).

Положительная энергия, поступающая от источника тока к емкости, больше, чем отрицательная энергия, возвращаемая источнику тока. Разность этих энергий равна энергии, поглощаемой активным сопротивлением цепи. Площади, расположенные выше линии времени на рис.6, определяют величину положительной энергии, а расположенные ниже линии времени - величину отрицательной энергии.

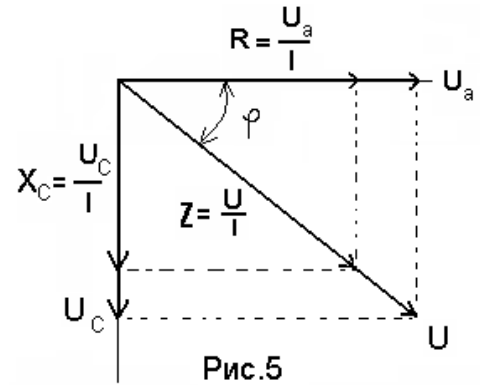


Рис.5

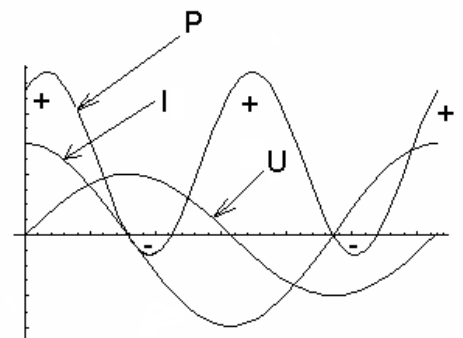


Рис.6

Опис експериментальної установки.

Електрична схема установки для дослідження ланцюга змінного синусоїдального струму з активним опором $R_a = 200 \text{ Ом}$ і ємкостями $C_1 = 1 \text{ мкФ}$ $C_2 = 1 \text{ нФ}$ показана на рис.7.

Пластини X осцилографа підключені до ділянки ланцюга з активним опором, а пластини Y - до ділянки ланцюга з ємкісним опором.

Виконання роботи.

22. Зібрати схему, зображену на рис.7.

23. Виставити частоту генератора, рівну 1 КГц .
24. Включити осцилограф і генератор. Виставити таку амплітуду генератора, щоб сигнал поміщався на екрані осцилографа.
25. Зміряти падіння напруги на активному опорі R і ємкості C_1 . За отриманими даними обчислити результуючу напругу, прикладену до всього кола і порівняти із значенням напруги на генераторі.
26. Обчислити струм в ланцюзі.
27. Визначити повний опір ланцюгу на частоті 1 КГц .
28. Повторити пункти 1-7 для ємкості $C_2 = 1\text{ нФ}$ на частоті 400 Гц .
29. Використовуючи осцилограф визначити коефіцієнт потужності, повну, активну і реактивну потужності ланцюга, вимірюючи амплітуду напруги на активних і реактивних опорах.
30. Зняти графіки залежності ємкісного опору від частоти для двох значень ємкості.

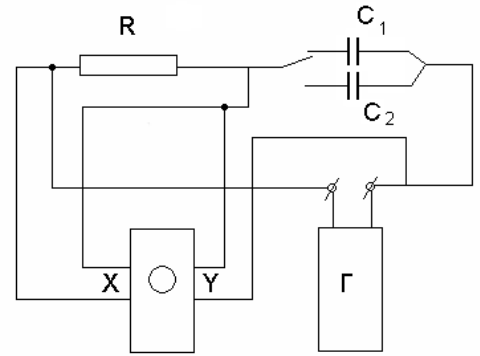


Рис.7

Контрольные вопросы.

13. Какие методы исследования цепей с активными и реактивными сопротивлениями Вы знаете?
14. Почему в конденсаторе фаза напряжения отстает от фазы тока?
15. Что такое реактивная мощность?
16. Как определить угол φ сдвига фаз между током и напряжением по фигуре Лиссажу?
17. Что такое коэффициент мощности?

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №10

“ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ”

Цель работы.

10. Изучить метод Гаусса для определения постоянного магнитного поля.
11. Определить величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Введение.

Предположение о существовании магнитного поля Земли впервые высказал в 1600 г. английский естествоиспытатель Гильберт. Магнитное поле Земли является неоднородным и достаточно сложно зависит от времени. Магнитное поле Земли состоит из основной постоянной составляющей, которая обусловлена процессами, протекающими в жидком металлическом ядре Земли (динамо эффект) и переменной составляющей, которая определяется электрическими токами, протекающими в земной коре и над земной поверхностью. Основное постоянное поле имеет дипольный характер до высот порядка нескольких радиусов Земли. На больших высотах структура магнитного поля значительно более сложная. Магнитное поле в этой области пространства называется магнитосферой. Дипольный магнитный момент Земли равен примерно $8,3 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ($8,3 \cdot 10^{25}$ единиц СГС). Напряженность магнитного поля Земли уменьшается от магнитных полюсов до магнитного экватора от $55,7 \text{ А/м}$ до $33,4 \text{ А/м}$, (от $0,7 \text{ Э}$ до $0,42 \text{ Э}$).

Основное магнитное поле Земли существует около 2,5 миллиардов лет (возраст Земли около 4,54 миллиардов лет) и его значение примерно такое же, как и сейчас. Характеристики магнитного поля могут оставаться неизменными на протяжении сотен тысяч или десятков миллионов лет, а потом за $10^3 - 10^4$ лет измениться на порядок или совсем поменять свою полярность.

Переменное магнитное поле Земли, созданное магнитными токами, протекающими в ионосфере и магнитосфере, более неустойчиво.

Наблюдаются вековые и более кратко протекающие вариации магнитного поля во времени. Вследствие вековых вариаций имеет место прецессия геомагнитного полюса относительно географического с периодом 200 лет. Кратко протекающие вариации связаны с движением Земли около Солнца (сезонные вариации), вращением около собственной оси (суточные вариации) и процессами на Солнце, которые влияют на интенсивность солнечного ветра (потoki частиц и излучение, которые падают на Землю со стороны Солнца). Сильные возмущения магнитосферы - магнитные бури - сопровождаются появлением в верхней атмосфере полярного сияния, ионосферных возмущений, электромагнитных излучений.

Магнитное поле Земли находится во взаимодействии с магнитными полями Солнца, планет и потоков заряженных частиц,

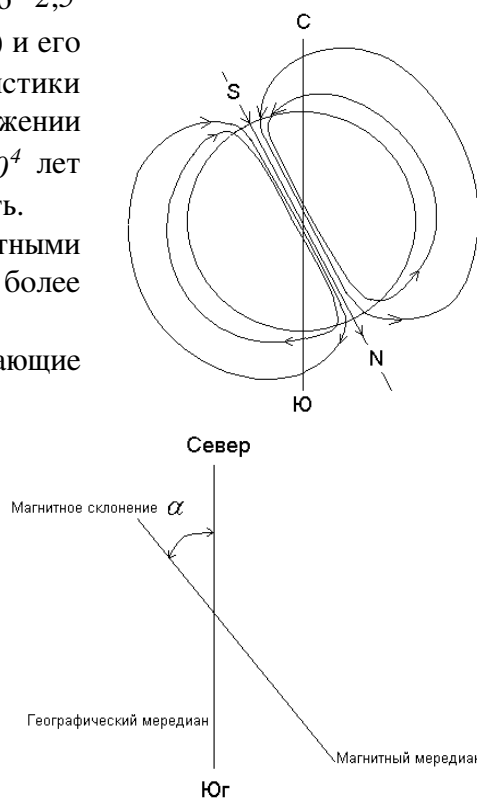


Рис.2

испускаемых в изобилии Солнцем. Если влиянием самого Солнца и тем более планет из-за удалённости можно пренебречь, то с потоками частиц, иначе – солнечным ветром, так не поступишь. Солнечный ветер представляет собой потоки мчащихся со скоростью около 500 км/с частиц, испускаемых солнечной атмосферой. В моменты солнечных вспышек, а также в периоды образования на Солнце группы больших пятен, резко возрастает число свободных электронов, которые бомбардируют атмосферу Земли. Это приводит к возмущению токов текущих в ионосфере Земли и, благодаря этому, происходит изменение магнитного поля Земли. Возникают магнитные бури. Такие потоки порождают сильное магнитное поле, которое и взаимодействует с полем Земли, сильно деформируя его. Благодаря своему магнитному полю, Земля удерживает в так называемых радиационных поясах захваченные частицы солнечного ветра, не позволяя им проходить в атмосферу Земли и тем более к поверхности. Частицы солнечного ветра были бы очень вредны для всего живого. При взаимодействии упоминавшихся полей образуется граница, по одну сторону которой находится возмущённое (подвергшееся изменениям из-за внешних влияний) магнитное поле частиц солнечного ветра, по другую – возмущённое поле Земли. Эту границу стоит рассматривать как предел околоземного пространства, границу магнитосферы и атмосферы. Вне этой границы преобладает влияние внешних магнитных полей. В направлении к Солнцу магнитосфера Земли сплюснута под натиском солнечного ветра и простирается всего до 10 радиусов планеты. В противоположном направлении имеет место вытянутость до 1000 радиусов Земли.

Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими полюсами. Магнитный полюс, который находится вблизи Северного географического полюса, называется Южным, и наоборот, магнитный полюс Земли, который находится вблизи Южного географического полюса, называется Северным. Через магнитные полюса можно провести магнитные меридианы (рис.1), а перпендикулярно к ним магнитный экватор и линии меньших размеров - магнитные параллели. Если в данной точке Земли свободно подвесить магнитную стрелку за центр масс так, чтобы она могла вращаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях, то она установится в направлении напряженности магнитного поля Земли в данной точке. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны к поверхности Земли на магнитных полюсах, а на магнитном экваторе они параллельны земной поверхности. В других точках земной поверхности силовая линия или напряженность магнитного поля a , значит и свободно подвешенная магнитная стрелка, будет расположена под некоторым углом к вертикали в данной точке. Она также будет расположена под некоторым углом к горизонтальной плоскости в данной точке (рис. 2). Так как магнитные и географические полюса не совпадают, то не совпадают и их меридианы. Таким образом, положение свободно подвешенной магнитной стрелки характеризуется двумя углами: магнитным наклоном β и магнитным склонением α .

Магнитное склонение α - угол между направлением магнитного и географического меридианов. Различают западное и восточное склонение (когда северный полюс стрелки отклоняется вправо или влево от географического меридиана).

Магнитное наклонение β - угол между направлением магнитного поля и горизонтальной плоскостью в данной точке (рис. 3). Магнитное наклонение β бывает северным или южным когда соответственно северный или южный конец стрелки ниже горизонтальной плоскости.

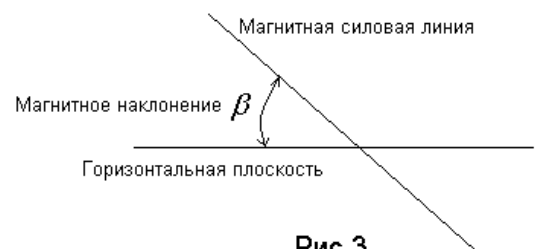


Рис.3

Описание экспериментальной установки и методика эксперимента.

Метод определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, предложенный Гауссом, состоит в исследовании взаимодействия магнитной стрелки компаса с магнитным полем Земли и полем постоянного магнита, который расположен на некотором расстоянии от оси стрелки компаса. Угол между направлениями стрелки компаса и магнитного меридиана определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha = H / H_o, \quad (1)$$

где H - напряженность магнитного поля постоянного магнита, который характеризуется магнитным моментом M , H_o - горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Постоянный магнит расположен так, что его ось перпендикулярна к магнитному меридиану и проходит через ось магнитной стрелки. В этом случае

$$H = \frac{2M}{r^3}, \quad (2)$$

где r - расстояние от нейтральной линии магнита, которая проходит по середине магнита между его южным и северным магнитным полюсами, до оси стрелки. Подставляя (2) в (1) получим выражение для горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_o :

$$H_o = \frac{2M}{r^3 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Магнитный момент постоянного магнита M можно определить, зная период его свободных крутильных колебаний. Для этого прикрепим магнит на нитке в магнитном поле Земли. Он будет находиться в состоянии покоя, когда его собственное магнитное поле будет ориентировано параллельно внешнему геомагнитному полю. Отклоним магнит от положения равновесия на угол $\varphi \approx 10^\circ - 15^\circ$ и дадим ему возможность свободно колебаться (вращаться) в горизонтальной плоскости. Период собственных колебаний магнита в этом случае равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{H_o M}}, \quad (4)$$

где I - момент инерции постоянного магнита. Для магнита, который имеет форму прямоугольного параллелепипеда,

$$I = \frac{m}{12}(a^2 + b^2) \quad (5)$$

где m - масса, a - длина магнита, b - ширина магнита. Если исключить из уравнений (4) и (5) величину магнитного момента постоянного магнита M , можно найти выражение для горизонтальной составляющей магнитного поля Земли:

$$H_o = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{2I}{r^3 \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (6)$$

Все величины, которые стоят в правой части уравнения (6), можно найти путем прямых измерений. Для этого необходимо иметь весы, часы и линейку, угол α считывается по шкале компаса.

Выполнение работы.

24. Штангельциркулем измерить размеры магнита, а на весах взвесить его массу. На основе этих данных определить момент инерции магнита по формуле (5).
25. Подвесить магнит на штативе на шелковой нитке. Отклонив магнит от ориентации вдоль магнитного поля Земли на угол $\varphi \approx 10^\circ - 15^\circ$, определить период его собственных колебаний.
26. Положить компас на центр деревянного прибора и определить направление магнитного меридиана. При этом прибор должен находиться по возможности дальше от всяких железных предметов.
27. Развернуть длинную рейку прибора перпендикулярно к магнитному меридиану. К верхней поверхности длинной рейки прикреплена подвижная планка со стрелкой для определения координаты планки относительно центра прибора.
28. Планку расположить на краю рейки. На планку положить магнит так, чтобы его нейтральная линия совпадала с направлением стрелки.
29. Передвигая планку ближе к центру прибора, замечаем угол α , на который стрелочка компаса отклоняется от магнитного меридиана, и расстояние от магнита до стрелки компаса r .
30. Угол α измерить для четырех значений r . По этим данным по формуле (3) вычислить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли H_0 .
31. С целью более точного определения H_0 измерения провести еще три раза: вначале повернув магнит вторым полюсом к компасу, затем повернуть длинную рейку на 180° и снова провести эксперименты для двух положений магнита.
32. Найти среднюю величину H_0 и абсолютную ошибку, с которой вычислена горизонтальная составляющая магнитного поля Земли.

Контрольные вопросы.

4. Что такое магнитное склонение и магнитное наклонение?
5. Почему, говоря о координатах магнитных полюсов, необходимо указывать соответственно год?
6. Почему постоянный магнит, подвешенный на шелковой нитке, может совершать крутильные колебания?
7. Вывести момент инерции постоянного магнита в форме параллелепипеда.
8. Вывести период малых колебаний рассматриваемых крутильных колебаний.
9. Что такое вековые и быстро протекающие вариации магнитного поля Земли?
10. Что такое магнитосфера, ионосфера и солнечный ветер?
11. Каким образом магнитные бури влияют на радиосвязь?



ГАУСС (Gauss) Карл Фридрих (1777 - 1855). Сформулировал ряд принципов теории вероятностей и математической статистики, включая распределение случайных величин вокруг среднего значения, получившее название распределения Гаусса. В 1801 году, разработал метод наименьших квадратов. Гаусс первым всерьез занялся изучением земного магнетизма и единица напряженности магнитного поля названа гауссом в его честь. Вместе с Вебером Гаусс создал абсолютную систему электромагнитных единиц и сконструировал в 1833 первый в Германии электромагнитный телеграф. В 1835 Гаусс основал магнитную обсерваторию при Гёттингенской астрономической обсерватории. В 1838 он издал труд «Общая теория земного магнетизма».

Лаборатория “Электричества и магнетизма”

Лабораторная работа №11

“ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОИДА И СИСТЕМЫ ДВУХ СОЛЕНОИДОВ”

Цель работы:

12. Изучить пространственное распределение магнитного поля катушки с током
13. Проверить принцип суперпозиции магнитных полей на примере двух коротких соленоидов.

Введение

Индукция магнитного поля dB , создаваемого элементом проводника dl , по которому протекает ток I в точке пространства, которая находится на расстоянии r от элемента тока dl , описывается законом Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[dl \times r]}{r^3}. \quad (1)$$

Используя уравнение (1) найдем величину магнитного поля на оси витка, по которому проходит постоянный электрический ток,

$$B = \mu_0 \frac{IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где R - радиус кругового витка с током, x - расстояние вдоль оси от центра витка до точки M на оси кругового тока, в которой измеряется магнитное поле. Индукция магнитного поля в центре кругового тока ($x = 0$) равна:

$$B_0 = \mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (3)$$

На рис.1 видно, что

$$\sin \theta = \frac{R}{(R^2 + x^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

Тогда соотношение (2) может быть записано в виде

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R} \sin^3 \theta = B_0 \sin^3 \theta \quad (5)$$

Совокупность близко расположенных круговых витков с током, центры которых лежат на общей оси, составляют соленоид. Магнитное поле на оси соленоида можно вычислить, как сумму полей, создаваемых каждым витком с током (принцип суперпозиции).

Соленоид называется коротким, если его длина L значительно меньше радиуса обмотки соленоида R , и наоборот длинным, если $L \gg R$.

Определим индукцию B в точке M (рис.2) для соленоида длиной L , радиусом R и числом витков N (т.е. плотностью

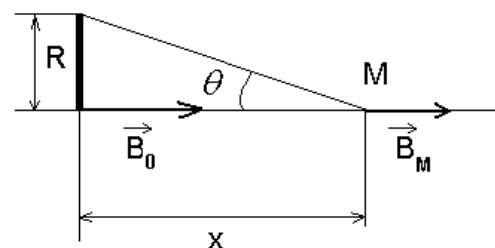


Рис.1

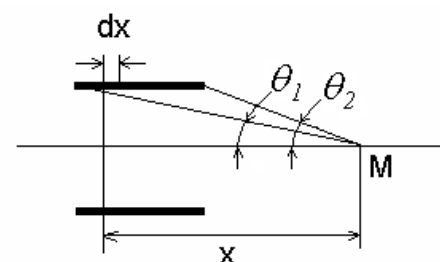


Рис.2

намотки, или числом витков на единицу длины $n = N / L$). Вклад участка соленоида длиной dx в результирующее магнитное поле равен:

$$dB = nB_0 \sin^3 \theta dx \quad (6)$$

Запишем переменную dx через угол θ . На рис. 2 видно, что $x = R / \tan \theta$, откуда $dx = -R d\theta / \sin^2 \theta$. Тогда $dB = -nB_0 R \sin \theta d\theta$ интегрируя это выражение по углу θ , получим:

$$B = nB_0 R (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (7)$$

где θ_1 и θ_2 - углы, под которыми видны радиусы соленоида из точки на его оси, в которой вычисляется магнитное поле (рис. 2). Если точка на оси лежит внутри соленоида, то удобно ввести угол θ_2 (рис. 3). Тогда формула (7) с учетом формулы (3), принимает вид:

$$B = 0,5 \mu_0 n I (\cos \theta_1 + \cos \theta_2). \quad (8)$$

Магнитное поле в центре короткого соленоида равно

$$B = \mu_0 n I \cos \theta_1. \quad (9)$$

Принцип суперпозиции магнитных полей можно проверить экспериментально, используя два коротких соленоида (катушки Гельмгольца). Результирующее поле в точке M (рис.4) при этом определяется алгебраической суммой полей, которые создаются каждой катушкой отдельно, а распределение $B(x)$ вдоль оси соленоидов будет определяться суммой кривых $B_1(x)$ и $B_2(x)$, создаваемых каждой катушкой отдельно (рис. 5). На рис.5 проиллюстрирована суперпозиция полей, создаваемых катушками Гельмгольца при протекании токов одинакового направления.

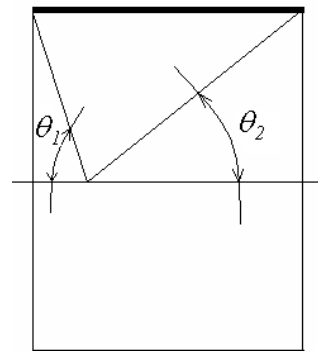


Рис.3

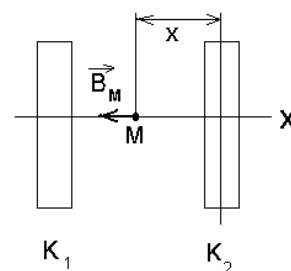


Рис.4

Описание экспериментальной установки

Описание установки показано на рис. 6. Катушка K_2 неподвижна, а катушка K_1 может перемещаться по направляющим. Расстояние между центрами катушек определяется по шкале, которая располагается на панели. Измерительный датчик D закреплен на стержне, который может перемещаться вдоль оси соленоида. Датчик позволяет измерять индукцию магнитного поля на оси системы.

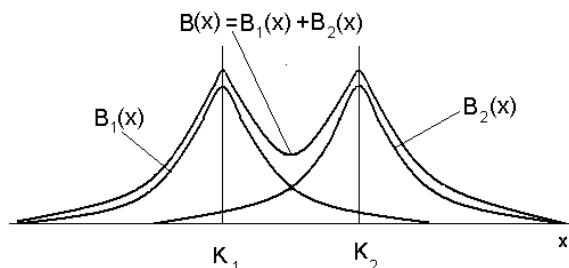


Рис.5

Переменный ток, который протекает по соленоиду, создает в пространстве переменное магнитное поле, которое возбуждает в катушке D электродвижущую силу индукции (ЭДС):

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = -SN \frac{dB}{dt} \quad (10)$$

где Φ - поток вектора индукции магнитного поля через катушку, S - площадь сечения катушки датчика, $N = 1500$ - число витков катушки датчика. Учитывая, что

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} B_m \cos \omega t = -\omega B \quad (11)$$

получим

$$\varepsilon = \omega BSN = 2\pi fBSN, \quad (12)$$

где линейная частота переменного тока $f = 50 \text{ Гц}$.

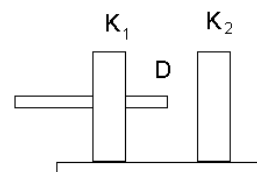


Рис.6

Измерения ЭДС \mathcal{E} можно проводить или вольтметром, или при помощи осциллографа. В связи с тем, что входное сопротивление вольтметра очень велико, можно записать, что

$$\mathcal{E} = 2^{1/2} U. \quad (13)$$

Тогда из (12) и (13), можно получить амплитудное значение индукции магнитного поля:

$$B = 2^{1/2} kU, \quad (14)$$

где константа $k = 0,5 \pi f S N = 0,363 \times 10^4 \text{ Тл/мВ}$.

При использовании осциллографа

$$B = kU. \quad (15)$$

Радиусы коротких соленоидов $R = 6,5 \text{ см}$, длины намотки (ширина катушки) $L = 2,5 \text{ см}$, число витков обмоток соленоидов $N = 290$.

Выполнение работы

33. Показать, что соленоид, который используется, можно считать коротким. Для этого, используя геометрические размеры соленоида, сравнить формулы (3) и (9). При этом принять число витков одинаковыми.

34. Собрать схему показную на рис.7, используя неподвижную катушку K_1 . Установить ток через соленоид $I = 1 - 1,5 \text{ А}$.

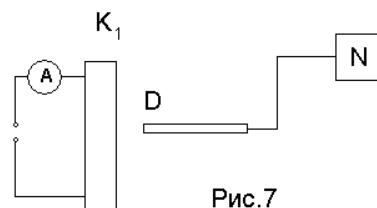


Рис.7

- Перемещая датчик D вдоль оси соленоида, измерять поле первой катушки $B_1(x)$. Расстояние x отсчитывать по шкале, нанесенной на подвижном зонде.
35. Нарисовать графики зависимости $B_1(x)$ от продольной координаты x .
36. Установить вторую катушку на расстоянии, равном удвоенному радиусу катушки R , от первой. Подключить вторую катушку к источнику тока и повторить предыдущие измерения со второй катушкой. Сила электрического тока через катушку должна быть точно такой же, как и в измерениях для катушки K_1 . Построить зависимость поля второй катушки $B_2(x)$ от продольной координаты x на том же графике, где нарисована зависимость $B_1(x)$.
37. Соединить обе катушки последовательно с источником питания. Установить ток через катушки такой же, как и раньше. Передвинуть датчик вдоль оси соленоида и снять распределение $B(x) = B_1(x) + B_2(x)$. Построить зависимость $B(x)$ и нанести результаты на предыдущий график. Доказать, что принцип суперпозиции выполняется.
38. Изменить направление протекания тока в одной из катушек на противоположное. Построить зависимость $B(x) = B_1(x) + B_2(x)$. Нанести результаты на предыдущий график. Доказать, что принцип суперпозиции выполняется.

Контрольные вопросы

- Закон Био-Савара-Лапласа и его применение для вычисления магнитного поля, создаваемого электрическим током, протекающим по тонкому проводнику.
- В чем состоит принцип суперпозиции?
- Вывести формулу для вычисления напряженности магнитного поля на оси короткого и длинного соленоидов.
- Как измеряется магнитная индукция?
- Какие методы компенсации неоднородности магнитного поля вы знаете?
- Сформулировать закон электромагнитной индукции.
- Вывести закон полного тока для вектора индукции магнитного поля. Применение закона полного тока для определения магнитного поля.

19. Где можно использовать неоднородное магнитное поле с конфигурацией, создаваемой катушками Гельмгольца?



Жан-Батист Био (21 апреля 1774 - 3 февраля 1862) - знаменитый французский ученый, физик, геодезист и астроном. Био вместе с [Саваром](#) определил, путем опыта, закон действия проводника, по которому проходит гальванический ток, на магнитную стрелку.



Лаплас (Laplace) Пьер Симон (1749-1827). Французский математик, физик и астроном. Внес огромный взнос в развитие математической физики в рамках классической механики Ньютона, применил [Закон всемирного тяготения Ньютона](#) к теории строения Солнечной системы. Опубликовал монументальный многотомный труд «Трактат о небесной механике» (*Traité de mécanique céleste*, 1796), который заложил основы нового раздела физической науки, который с тех пор так и именуется «небесной механикой». При Наполеоне занимал видные государственные посты, вплоть до поста министра внутренних дел.



Савар Феликс (1791 - 1841).

Французский врач и физик. Получив медицинское образование, Савар, тем не менее, поступил на работу в Коллеж де Франс в качестве профессора акустики. Там он изучал принцип работы музыкальных инструментов, прежде всего скрипки, на примере колебаний песчаных волн в слое песка на плоской поверхности, отражающих акустические колебания. Кроме того, он изобрел колесо Савара для точного измерения высоты музыкальных тонов и кварцевую пластину Савара для изучения поляризации света. Однако самая известная работа ученого – его сотрудничество с Био, вылившееся в закон Био—Савара.



Гельмгольц (Helmholtz) Герман Людвиг Фердинанд (31.VIII.1821–8.IX.1894)

Немецкий физик, математик, физиолог и психолог. В 1856 исследованиям комбинационных тонов начались акустические работы Гельмгольца. Он построил модель уха, которая позволила выучить характер действия звуковых волн на орган слуха, решил задачу т. из. органной трубы, разработал теорию восприятия и издания звуков. Кроме того, он проводит важные исследования колебания струн и акустических резонаторов (резонаторов Гельмгольца), занимается гидродинамикой вихрей, разрабатывает принцип механического подобия, который позволил объяснить ряд метеорологических

явлений и механизм образования морских волн.