

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра электроэнергетики и электромеханики

Допущены
к проведению занятий в 2018-2019 уч.году
Заведующий кафедрой
профессор

В.А.Шпенст

«__» _____ 2018 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
для проведения практических занятий по учебной дисциплине

**«ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И
КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»**

Специальность (направление подготовки):

13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»

Специализация (профиль): Электроснабжение

Разработал: доцент Коптева А.В.

*Обсуждены и одобрены на заседании кафедры
Протокол № 09/01 от 31 января 2018 г.*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018**

ВВЕДЕНИЕ

Контрольные задачи призваны облегчить самоконтроль студентов, изучающих дисциплину «Электротехническое и конструкционное материаловедение», и обеспечить контроль текущей успеваемости студентов.

Раздел 1 включает задачи по четырем основным разделам дисциплины: диэлектрики, полупроводники, проводники и магнитные материалы. Целью решения задач является изучение свойств электротехнических материалов, проявляющихся в электромагнитных полях в зависимости от их состава, структуры и окружающей среды. Понимание решения приведенных задач должно быть полным, так как без этого невозможно дальнейшее освоение электротехнических дисциплин.

Раздел 2 и приложения содержат справочный математический аппарат для решения представленных задач.

1. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

1.1. ДИЭЛЕКТРИКИ

Задача 1. В открытом распределительном устройстве опорный стержневой керамический изолятор ОНС изолирует и поддерживает шины контактных деталей. Изолятор представляет собой сплошной круглый стержень с выступающими ребрами. На торцевых частях изолятора закреплены металлические фланцы (колпаки), являющиеся электродами (рис.1).

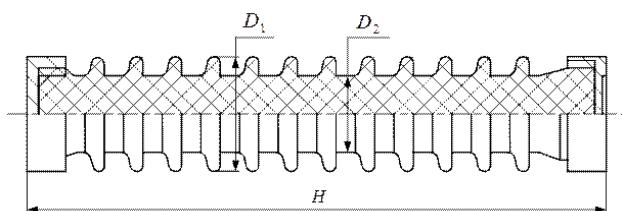


Рис.1. Конструкция опорного стержневого керамического изолятора ОНС

Определить полный ток утечки, протекающий в изоляторе, емкость и диэлектрические потери в нем, если известны: номинальное напряжение на нем U_n ; частота электрического поля f ; размеры и основные электрические параметры диэлектрика, из которого изготовлен изолятор – D_1 , D_2 , ρ_v , ρ_s , $\text{tg}\delta$ и др. Исходные данные соответственно варианту представлены в приложении 1. В качестве материала изолятора принять следующие материалы: для 1,5,7 варианты – электрофарфор; для вариантов 2, 4, 9 – ультрафарфор; для 3, 6 и 8 вариантов – стеатит.

Задача 2. На поверхности диэлектрика параллельно друг другу расположены два ножевых электрода. Расстояние между электродами $b = 2$ мм, их ширина $h = 10$ мм. Чему равно удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если сопротивление между электродами 5 МОм?

Задача 3. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l = 5$ см и площадью поперечного сечения $b \times h = 2 \times 0,5$ см² с торцов покрыт металлическими электродами. При напря-

жении $U_0 = 1500$ В через диэлектрик проходит ток $I_0 = 10^{-9}$ А. Найти удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если его удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м.

Задача 4. После отключения внешнего источника напряжение на обкладках конденсатора за 10 минут уменьшается на 90 %. Определить удельное сопротивление диэлектрика, если его диэлектрическая проницаемость равна 4.

Задача 5. Толщина и площадь плоского конденсатора равны 0,5 см и 2 см², диэлектрическая проницаемость равна 2,5. Частота приложенного напряжения 1 кГц. Тангенс угла диэлектрических потерь $5 \cdot 10^{-3}$. Определить удельную проводимость диэлектрика, если известно, что потеря энергии обусловлена его электропроводностью.

Задача 6. На поверхности диэлектрика параллельно друг другу на расстоянии 12 мм расположены два узких электрода длиной 20 мм. Определить удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если сопротивление между электродами 5 МОм.

Задача 7. Как изменится емкость плоского конденсатора, если сплошной диэлектрик между его обкладками заменить на пористый? Пористый диэлектрик на 50% легче сплошного. Диэлектрическая проницаемость сплошного диэлектрика равна 2,8.

Задача 8. В выходном фильтре источника постоянного напряжения 1,5 кВ применено последовательное соединение трех конденсаторов, рассчитанных на рабочее напряжение 630 В. Могут ли быть использованы в этом фильтре конденсаторы, сопротивление изоляции которых составляют 600, 1000 и 400 МОм?

Задача 9. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l = 5$ см и площадью поперечного сечения $b \times h = 2 \times 0,5$ см² с торцов покрыт металлическими электродами. При напряжении $U_0 = 1500$ В через диэлектрик проходит ток $I_0 = 10^{-9}$ А. Найти удельное объемное сопротивление диэлектрика, если его удельное поверхностное сопротивление $\rho_s = 2,14 \cdot 10^{12}$ Ом·м.

Задача 10. Активная мощность рассеяния в диэлектрике при напряжении 20 В и частоте 1 МГц равна 200 мкВт. Чему равна активная мощность рассеяния в этом же диэлектрике при напряжении 10 В и частоте 2 МГц? Считать, что потери в диэлектрике обуслов-

лены только сквозной электропроводностью.

Задача 11. Определить полное сопротивление пластины диэлектрика с размерами 20 мм х 10 мм х 1 мм в продольном направлении. Удельное объемное и удельное поверхностное сопротивление равны соответственно 10^{10} Ом·м и 10^{10} Ом.

Задача 12. На пластину пьезоэлектрического кварца толщиной 0,5 мм и с диэлектрической проницаемостью 4,6 действует механическое напряжение 105 Н/м². Определить поверхностную плотность заряда на противоположных плоскостях пластины, если пьезомодуль продольного пьезоэффекта равен $2 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

Задача 13. Тепловой датчик изготовлен из материала с пьезоэлектрическим коэффициентом 10^{-3} Кл/(м²·К) и имеет рабочую поверхность 10 см². Какой ток будет зафиксирован в цепи датчика, если температура его за 1 секунду увеличилась на 1 К?

Задача 14. При каком максимальном напряжении может работать слюдяной конденсатор емкостью $C = 1000$ пФ с площадью обкладок $S = 6 \cdot 10^{-4}$ м², если он должен иметь четырехкратный запас по электрической прочности. Диэлектрическая проницаемость слюды $\epsilon = 7$, ее электрическая прочность $E_{ПР} = 100$ МВ/м. Какова толщина h слюдяной пластинки?

Задача 15. Определите объёмный ток в диэлектрике плоского конденсатора при постоянном напряжении 1000 В, если площадь каждой его пластины 50 см², расстояние между ними 0,4 см, а в качестве диэлектрика используется электрофарфор.

Задача 16. Определите мощность рассеиваемую в диэлектрике плоского конденсатора, если площадь каждой его пластины 100 см², расстояние между ними 0.01 см, объёмный ток утечки $2 \cdot 10^{-9}$ А, а в качестве диэлектрика взят стеатит.

Задача 17. Определите удельное поверхностное сопротивление в диэлектрике плоского конденсатора со сторонами пластины 1 см и 0.5 см толщиной диэлектрика 3 мм, если к нему приложено напряжение 1000В, а поверхностный ток утечки $2 \cdot 10^{-10}$ А.

Задача 18. Определите тангенс угла потерь диэлектрика конденсатора ёмкостью 40 пФ, к которому приложено напряжение 10 кВ частотой 400 Гц, а потери мощности составляют 1 мВт.

Задача 19. Определите поверхностный ток утечки плоского

конденсатора со сторонами пластины 20 мм и 5 мм, толщиной диэлектрика 0.5 см, если к нему приложено напряжение 1500В ($\rho_s = 10^8 \text{ Ом}$).

Задача 20. Найдите потери мощности в диэлектрике конденсатора ёмкостью 100 пФ, через который протекает ток $2 \cdot 10^{-7}$ А частотой 400 Гц, сопротивление диэлектрика $5 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а тангенс угла потерь 10^{-2} .

1.2. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Задача 21. Определить удельное сопротивление полупроводника n-типа, если концентрация электронов проводимости в нем равна 10^{22} м^{-3} , а их подвижность $u_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Задача 22. Оценить среднее время и длину свободного пробега носителей заряда при температуре $T = 300 \text{ К}$, если их подвижность $u = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а эффективная масса $m^* = 0,26m_0$.

Задача 23. При напряженности электрического поля 100 В/м плотность тока через полупроводник составляет $6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Определить концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность $u_n = 0,375 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Дырочной составляющей тока пренебречь.

Задача 24. Вычислить отношение полного тока через полупроводник к току, обусловленному дырочной составляющей: а) в собственном германии; б) в германии p-типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Принять собственную концентрацию носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $u_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, подвижность дырок $u_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Задача 25. Определить собственную удельную проводимость германия при комнатной температуре, используя значения концентрации и подвижностей носителей заряда из условия предыдущей задачи.

Задача 26. Вычислить удельное сопротивление германия p-типа с концентрацией дырок $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Найти отношение электронной проводимости к дырочной. Собственную концентрацию и подвижность носителей заряда взять такими же, как в задаче 24.

Задача 27. При температуре $T = 300 \text{ К}$ концентрация дырок в германии p-типа равна $2,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а концентрация электронов в 100

раз меньше. Подвижность дырок и электронов взять из условия задачи 24. Найти собственное удельное сопротивление германия.

Задача 28. Через пластину кремния с удельным сопротивлением $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ проходит электрический ток плотностью $10 \text{ мА}/\text{мм}^2$. средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности $0,14$ и $0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ соответственно.

Задача 29. Рассчитать концентрацию электронов и дырок в германии р-типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при температуре 300 К . Недостающие данные взять из условия задачи 15.

Задача 30. Полупроводник легирован акцепторной примесью до концентрации $N_a = 2n_i$. Определить, во сколько раз изменится удельная проводимость полупроводника по отношению к собственной, если отношение подвижностей электронов и дырок $\mu_n/\mu_p = b$. Считается, что все акцепторы находятся в ионизированном состоянии.

Задача 31. Решить предыдущую задачу для антимонида индия, концентрация акцепторных примесей которого $N_a = 5n_i$. Отношение подвижности электронов к подвижности дырок равно 50 .

Задача 32. Прямоугольный образец полупроводника n-типа с размерами $a = 50 \text{ мм}$, $b = 5 \text{ мм}$ и $c = 1 \text{ мм}$ помещен в магнитное поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости образца. Под действием напряжения $U_a = 0,42 \text{ В}$, приложенного вдоль образца, по нему протекает ток $I_a = 20 \text{ мА}$. Измерения показывают ЭДС Холла $U_H = 6,25 \text{ мВ}$. Найти удельную проводимость, подвижность и концентрацию носителей заряда для этого полупроводника, полагая, что электропроводность обусловлена носителями только одного знака.

Задача 33. Образец арсенида галлия с удельным сопротивлением $5\cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ характеризуется коэффициентом Холла $3\cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Определить: а) напряженность поля Холла, возникающего при пропускании через образец тока плотностью $10 \text{ мА}/\text{мм}^2$ и в действии магнитного поля с индукцией 2 Тл ; б) напряженность внешнего электрического поля для создания заданной плотности тока.

Задача 34. При перепаде температур $\Delta E = 3 \text{ К}$ по толщине кремниевой пластины n-типа между плоскостями образца возникает

термо-э.д.с. $\Delta U_t = 2,5$ мВ. Определить концентрацию доноров в материале, если средняя температура образца $T = 500$ К.

Задача 35. Обратный ток насыщения I_s германиевого $p - n$ – перехода равен $0,5$ мкА. Какое напряжение U надо приложить к этому переходу в прямом направлении, чтобы при температуре $T = 293$ К через $p - n$ – переход протекал прямой ток I значением 100 мА? Начертить вольт-амперную характеристику $p - n$ – перехода.

1.3. ПРОВОДНИКИ

Задача 36. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при $T = 300$ К, если ее удельное сопротивление при этой температуре равно $0,017$ мкОм·м.

Задача 37. Удельное сопротивление серебра при комнатной температуре равно $0,015$ мкОм·м, а температурный коэффициент удельного сопротивления составляет $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Определить, как и во сколько раз изменится длина свободного пробега электронов при нагревании проводника от 300 до 1000 К.

Задача 38. В медном проводнике под действием электрического поля проходит электрический ток плотностью 1 А/мм². Определить скорость дрейфа и ее отношение к средней суммарной скорости движения электронов при температуре 300 К.

Задача 39. При включении в электрическую цепь проводника диаметром $0,5$ мм и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника составила $2,4$ В при токе 2 А. Определить удельное сопротивление материала проводника.

Задача 40. Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 1 км по медному проводу, если удельное сопротивление меди $0,017$ мкОм·м, а разность потенциалов на концах проводника $U = 220$ В. За какое время электрон пролетит это же расстояние, двигаясь без соударений, при той же разности потенциалов? Каково время передачи сигнала?

Задача 41. Вычислить удельное сопротивление металлического проводника, имеющего плотность 970 кг/м³ и молярную массу $0,023$ кг/моль, если известно, что средняя скорость дрейфа электронов в электрическом поле напряженностью $0,1$ В/м составляет $5 \cdot 10^{-4}$ м/с (при этом полагается, что на каждый атом кристаллической ре-

шетки приходится один электрон).

Задача 42. В металлическом проводнике с площадью поперечного сечения $0,01 \text{ мм}^2$ и сопротивлением 10 Ом концентрация свободных электронов равна $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Определить среднюю скорость дрейфа электронов при напряжении $0,1 \text{ В}$.

Задача 43. К медной проволоке длиной 6 м и диаметром $0,56 \text{ мм}$ приложено напряжение $0,1 \text{ В}$. Сколько электронов пройдет через поперечное сечение проводника за 10 с , если удельное сопротивление меди равно $0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$?

Задача 44. Стержень из графита соединен последовательно с медным стержнем такого же сечения. Определить, при каком отношении длин стержней сопротивление этой композиции не зависит от температуры. Удельные сопротивления меди и графита равны соответственно $0,017$ и $8,0 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, а значения α_r для этих материалов составляют $4,3 \cdot 10^{-3}$ и -10^{-3} К^{-1} .

Задача 45. Определить температурный коэффициент линейного расширения α_l и удлинение нихромовой проволоки, если известно, что при повышении температуры от 20 до 1000°C электрическое сопротивление проволоки изменяется от 50 до $56,6 \text{ Ом}$. Длина проволоки в холодном состоянии $l = 50 \text{ м}$. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихрома $\alpha_r = 15 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Задача 46. При нагревании провода из манганина длиной $1,5 \text{ м}$ и диаметром $0,1 \text{ мм}$ от 20 до 100°C его сопротивление уменьшается на $0,07 \text{ Ом}$, а длина возрастает на $0,16\%$. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления. При комнатной температуре удельное сопротивление манганина $\rho = 0,47 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Задача 47. Пользуясь законом Видемана-Франца-Лоренца, определить отношение удельных теплопроводностей серебра и олова при температурах 20 и 200°C . При температуре 20°C удельные сопротивления серебра и олова равны соответственно $0,015$ и $0,113 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, а температурные коэффициенты удельного сопротивления составляют соответственно $4,1 \cdot 10^{-3}$ и $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Задача 48. К графитовому стержню длиной $0,2 \text{ м}$ приложено напряжение 6 В . Определить плотность тока в стержне в первый момент после подачи напряжения, если удельное сопротивление графита равно $4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Как и почему меняется плотность тока в

стержне со временем?

Задача 49. Вычислить удельную теплопроводность меди при комнатной температуре по измеренному значению ее удельного сопротивления $\rho = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Задача 50. Два отрезка медной и алюминиевой проволоки длиной по 1 м имеют одинаковое электрическое сопротивление. Какой из отрезков весит меньше и на сколько, если сечение медной проволоки равно 4 мм^2 ?

Задача 51. Определите размеры (сечение, диаметр) алюминиево – медной проволоки (алюминий внутри, медь снаружи), предназначенной для замены медной проволоки контрольных кабелей сечением 10 мм^2 , обладающей той же проводимостью. Сечение меди составляет 20% общего сечения алюминиево – медной проволоки.

Задача 52. Питание электрической установки осуществляется трехфазным током с помощью трех свинцовых высоковольтных кабелей.

Задача 53. Определить ёмкость одного свинцового высоковольтного кабеля, минимальную и максимальную напряженности электрического поля в изоляции кабеля и реактивную (зарядовую) мощность в нём, если известны: линейное напряжение $U=6 \text{ кВ}$, частота поля $f=50 \text{ Гц}$, сечение алюминиевой жилы кабеля $S=95 \text{ мм}^2$, толщина бумажной пропитанной изоляции $d=5 \text{ мм}$ с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=3,5$, длина кабеля $l=15 \text{ м}$.

Задача 54. Электрическая установка, имеющая мощность 1000 Вт , питается от электрической сети напряжением 220 В . Питающая линия выполнена проводами, имеющими предельно допускаемую температуру нагрева $\theta_{\text{пред}}=85^\circ\text{C}$, и коэффициент теплопередачи $\sigma = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Вт/мм}^2\cdot\text{град}$. Сечение провода $S=0,75 \text{ мм}^2$. Рассчитать допустимую по условиям нагрева плотность тока и допустимый ток, сравнить его с рабочим током и определить надежность и экономичность работы установки с данными проводами.

1.4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Задача 55. Построить зависимость магнитной проницаемости железа от напряженности магнитного поля H , воспользовав-

шись кривой намагничивания железа, представленной на рисунке 2.

Определите $\mu_{нач}$, μ_{max} .

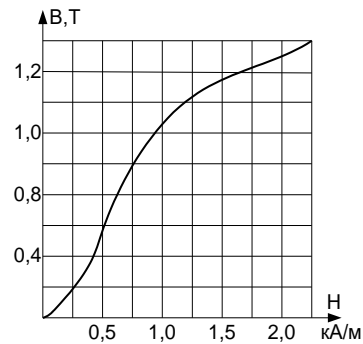


Рис.2. Кривая намагничивания железа

Задача 56. Выполнить аппроксимацию кривых намагничивания трансформатора в виде зависимости $B = \alpha \operatorname{sh}(\beta H)$. Кривые намагничивания электротехнических сталей приведены на рисунке 3.

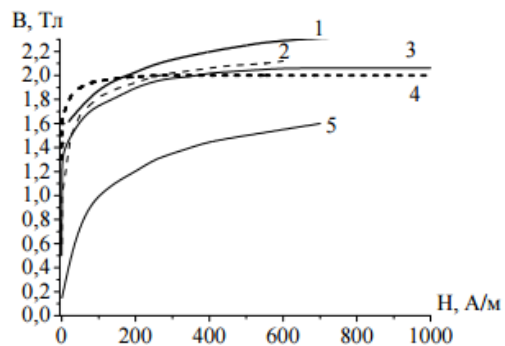


Рис. 3. Кривые намагничивания электротехнических сталей; 1- сталь Э, 2- листовая сталь для полюсов, 3- сталь Э11, 4- сталь Э330, 5 – чугун.

Задача 57. Магнитодиэлектрик выполнен из порошков никелево-цинкового феррита НН400 и полистирола с объемным содержанием магнитного материала α . Определить магнитную и диэлектрическую проницаемость материала, если магнитная диэлектриче-

ская проницаемость магнитного материала μ_a , ϵ_m имеет заданные значения. Диэлектрическая проницаемость полистирола $\epsilon_d = 2,5$. Исходные данные приведены в табл.1.

Таблица 1

Исходные данные соответственно варианту

№ варианта	α	ϵ_m
1	0,1	40
2	0,2	20
3	0,3	60
4	0,4	35
5	0,5	50
6	0,4	25
7	0,3	45
8	0,2	30
9	0,1	65
0	0,5	55

Задача 58. Что такое ферромагнитная керамика? Ее свойства и область применения.

Задача 59. Что представляет собой магнитодиэлектрики? Укажите их основные свойства и назначение.

Задача 60. Какие сплавы имеют прямоугольную петлю гистерезиса? Каковы их состав и структура?

Задача 61. Назовите состав и свойства основных ферритов с ППГ. Какие основные группы можно выделить среди этих ферритов?

Задача 62. Как классифицируются магнитотвердые материалы и каковы их характеристики?

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

2.1. ДИЭЛЕКТРИКИ

Поляризованность P характеризует интенсивность поляризации диэлектрика, т.е. такого состояния вещества, при котором его элементарный объем приобретает электрический момент:

$$P = n \cdot q \cdot l, \quad (1)$$

где q - величина заряда одного диполя, Кл;

l - расстояние между центрами положительного и отрицательного заряда, м;

n - число диполей в 1 м³.

Поляризованность совпадает по значению с поверхностной плотностью зарядов, возникающих на поверхности диэлектрика. Поляризация в электрическом поле - это процесс смещения связанных зарядов на ограниченное расстояние или поворот диполей под действием внешнего электрического поля. Если диэлектрик находится между обкладками конденсатора, то вследствие поляризации заряд конденсатора увеличивается в ϵ раз при том же значении электрического напряжения U .

Для оценки электрических свойств среды ее абсолютную диэлектрическую проницаемость сравнивают с диэлектрической постоянной вакуума. Результат сравнения выражают относительной величиной, которая называется относительной диэлектрической проницаемостью ϵ :

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{абс.}}{\epsilon_0}. \quad (2)$$

Величина ϵ называется *относительной диэлектрической проницаемостью* и показывает во сколько раз емкость конденсатора с данным диэлектриком C больше емкости такого же конденсатора, если между его обкладками будет находиться вакуум C_0 :

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (3)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость является табличной величиной, некоторые значения приведены в приложении 2.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м }.$$

Характеристикой системы, состоящей из двух проводящих тел, разделенных диэлектриком, является емкость. В технике такая

система называется конденсатором, а сами проводящие тела – обкладками, которые могут иметь форму пластин, цилиндров, секторов (рис. 4).

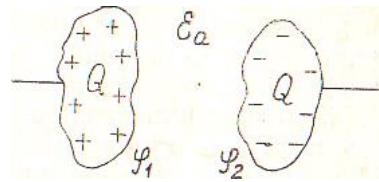


Рис. 4. Проводящие тела, разделенные диэлектриком

При подключении конденсатора к источнику на его обкладках накапливаются электрические заряды, равные по величине, но обратные по знаку, а между обкладками имеется разность потенциалов. При этом величина зарядов оказывается пропорциональной разности потенциалов:

$$Q = C(\varphi_1 - \varphi_2) = CU. \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности, входящий в формулу, называется емкостью:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что емкость характеризует способность системы проводящих тел, разделенных диэлектриком, накапливать электрические заряды.

Емкость зависит от формы, геометрических размеров обкладок, расстояния между ними и свойств диэлектрика и не зависит ни от величины заряда, ни от напряжения, а определяется их отношением.

В системе СИ емкость измеряется в фарадах (Ф), но так как фарада является очень крупной единицей, то на практике используются доли этой единицы, такие как микрофарада ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$) и пикофарада ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

Емкость плоского конденсатора. Для определения емкости воспользуемся формулой напряженности между двумя бесконечными плоскостями

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \quad (7)$$

в которой электрическую постоянную ε_0 заменим диэлектрической проницаемостью ε_a диэлектрика. С учетом формулы $U = E \cdot l$ получим:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_a} = \frac{U}{l}. \quad (8)$$

Умножим обе части равенства на S – площадь одной пластины:

$$\frac{\sigma S}{\varepsilon_a} = \frac{US}{l} = \frac{Q}{\varepsilon_a}. \quad (9)$$

Ёмкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_a S}{l}. \quad (10)$$

Электрическая ёмкость проводника:

$$C = \frac{Q}{\varphi}, \quad (11)$$

где C – ёмкость проводника в фарадах; Q – заряд в кулонах; φ – потенциал проводника в вольтах.

Ёмкость шара:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 R, \quad (12)$$

где R – радиус шара в метрах.

Ёмкость плоского многопластиночного конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S(n-1)}{d}, \quad (13)$$

где n – число пластин (обкладок) конденсатора.

Ёмкость плоского двухпластиночного конденсатора с несколькими диэлектрическими прослойками (слоистый диэлектрик)

$$C = \frac{S}{\left(\frac{d_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} + \frac{d_2}{\varepsilon_2 \varepsilon_0} + \dots\right)}, \quad (14)$$

где d_1, d_2 – толщина отдельных слоёв диэлектрика в метрах; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительная диэлектрическая проницаемость отдельных слоёв диэлектрика.

Ёмкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (15)$$

где r_2 – радиус большего (внешнего) цилиндра в метрах; r_1 – радиус меньшего (внутреннего) цилиндра в метрах.

Обратная величина общей ёмкости группы последовательно соединённых конденсаторов равна сумме обратных величин ёмкостей отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (16)$$

В том случае, когда все конденсаторы имеют одинаковые ёмкости, очевидно, что

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{n}{C}, \quad C_{\text{общ}} = \frac{C}{n}.$$

Общая ёмкость системы параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёмкостей отдельных конденсаторов

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n. \quad (17)$$

Энергия электрического поля заряженного конденсатора

$$W_c = \frac{CU^2}{2}. \quad (18)$$

Электропроводность диэлектриков. В общем случае ток в

диэлектрике

$$I = I_{см} + I_{абс} + I_{скв}, \quad (19)$$

где $I_{см}$ - ток смещения, $I_{абс}$ - ток абсорбции, $I_{скв}$ - ток сквозной проводимости. Кратковременный ток смещения обусловлен быстрыми видами поляризации (электронной, ионной). Ток абсорбции обусловлен активными составляющими токов, связанных с замедленными (релаксационными) механизмами поляризации в полярных и неоднородных диэлектриках. Время протекания тока абсорбции зависит от типа диэлектрика и механизма поляризации. Во многих диэлектриках, используемых в качестве электрической изоляции, ток абсорбции устанавливается за время меньше 1 минуты. При постоянном напряжении после установления тока абсорбции через диэлектрик будет протекать сквозной ток.

Электропроводность материала – это способность его к переносу заряда с помощью заряженных частиц. Характеризуется объемной γ_v и поверхностной удельной γ_s электропроводностью, величина которых обратно пропорциональны объемному ρ_v и поверхностному ρ_s удельному электрическому сопротивлению.

Для твердых диэлектриков наиболее характерна ионная электропроводность. Для многих ионных кристаллов удельная электропроводность экспоненциально зависит от температуры

$$\gamma_t = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (20)$$

где γ_0 – удельная электрическая проводимость при начальной температуре;

ΔW - энергия активации перемещения ионов, Дж;

k - постоянная Больцмана;

T - температура, К.

В низкотемпературной области проводимость в основном определяется примесными ионами, в высокотемпературной области - собственными ионами.

Поверхностное сопротивление твердого диэлектрика зависит

от природы диэлектрика, температуры, влажности, приложенного напряжения и характеризуется удельным поверхностным сопротивлением ρ_s , Ом.

Поверхностное сопротивление диэлектрика

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{h}{b}, \quad (21)$$

где h - расстояние между электродами, м;

b - ширина электрода, м.

Объемное сопротивление твердого диэлектрика определяется следующей зависимостью:

$$R_v = \rho_v \cdot \frac{h}{S}, \quad (22)$$

где h - расстояние между электродами, м;

S - площадь одного электрода, к которому приложено напряжение, м.

Полная электрическая проводимость твердого диэлектрика определяется суммированием объемной и поверхностной проводимостей.

Диэлектрические потери - часть энергии электрического поля, которая рассеивается в диэлектрике в виде тепла. Потери энергии в диэлектрике обусловлены протеканием сквозного (объемного и поверхностного) тока и процессами установления поляризации при изменении напряженности электрического поля.

Потери мощности на нагрев диэлектрика в постоянном электрическом поле:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (23)$$

где U - напряжение, В;

R - сопротивление диэлектрика, Ом.

Потери мощности в единице объема диэлектрика называются удельными электрическими потерями и определяются по формуле

$$P_{уд} = \frac{E^2}{\rho}, \quad (24)$$

где E - напряженность электрического поля, В/м; ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

В переменном электрическом поле, кроме потерь на электропроводность, в диэлектриках возникают релаксационные, ионизационные, резонансные потери.

Для количественной оценки потерь энергии используется тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. В конденсаторе с идеальным диэлектриком, то есть диэлектриком без потерь, вектор тока I_c опережает вектор напряжения U на 90° . В реальных диэлектриках угол сдвига фаз φ между током и напряжением меньше 90° за счет потерь, обусловленных протеканием активного тока I_a (рисунок 5).

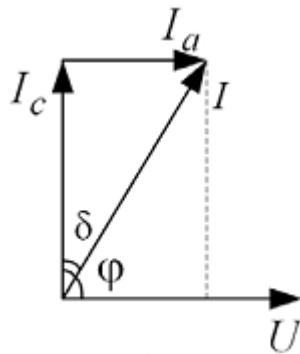


Рис. 5. Графическое изображение угла сдвига фаз φ

Угол δ , дополняющий угол сдвига фаз между током и напряжением до 90° , называется углом диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери (мощность, рассеиваемая в диэлектрике)

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta, \quad (25)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, рад/с; f - частота, Гц.

2.2. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Различают собственную γ электропроводность, когда полупроводник не имеет примесей, примесную γ_n n - типа, когда в него введена донорная примесь; примесную γ_p p - типа, когда в полупроводник введена акцепторная примесь. Электропроводность любого материала определяется формулой:

$$\gamma = e \cdot n \cdot u_n + e \cdot p \cdot u_p, \quad (26)$$

где n, p – концентрация электронов и дырок соответственно;
 u_n, u_p – подвижности электронов и дырок.

В примесных полупроводниках одним из слагаемых, в зависимости от типа проводимости, можно пренебречь.

Примесная проводимость n- типа γ_n возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой больше, чем валентность полупроводника. Например, для четырехвалентного кремния - Si, донорной примесью является пятивалентный мышьяк - As. Атом мышьяка, отдавший свой электрон в зону проводимости, превращается в положительно заряженный ион, который хотя и имеет заряд, но закреплен в кристаллической решетке и в электропроводности не участвует. Перенос зарядов происходит только за счет электронов.

$$\gamma_n = q \cdot n \cdot u_n. \quad (27)$$

Примесная проводимость p- типа (γ_p) возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой меньше валентности основного полупроводника. Например, если в кремний ввести трехвалентный алюминий, он является акцепторной примесью для Si. Акцептор захватывает электрон из валентной зоны, превращаясь при этом в отрицательно заряженный ион, а в валентной зоне начинается эстафетное перемещение электронов, т. е. будет иметь место дырочная проводимость.

$$\gamma_p = q \cdot p \cdot u_p. \quad (28)$$

Собственная концентрация носителей заряда (электронов и дырок)

$$n_i = p_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}}, \quad (29)$$

где ΔW_0 - ширина запрещенной зоны, Дж;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура, К;

N_C - эффективная плотность состояний в зоне проводимости, м^{-3} ;

N_V - эффективная плотность состояний в валентной зоне, м^{-3} .

$$N_C = 2 \cdot \frac{(2\pi \cdot m_n \cdot k \cdot T)^{3/2}}{h^3}; \quad N_V = 2 \cdot \frac{(2\pi \cdot m_p \cdot k \cdot T)^{3/2}}{h^3}, \quad (30;31)$$

где m_n, m_p - эффективные массы электрона и дырки соответственно, кг;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг - масса электрона.

Концентрации электронов и дырок в *примесных* полупроводниках

$$n = n_i \cdot e^{-\frac{(W_C - W_F)}{kT}}; \quad p = p_i \cdot e^{-\frac{(W_F - W_V)}{kT}}, \quad (32;33)$$

где W_C - энергия дна зоны проводимости, Дж;

W_V - энергия потолка валентной зоны, Дж;

W_F - энергия уровня Ферми, Дж.

Уровень Ферми в собственном полупроводнике:

$$W_F = \frac{W_C + W_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p}{m_n} = W_i + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p}{m_n}, \quad (33)$$

где W_i - уровень, соответствующий середине запрещенной зоны.

Вероятность заполнения энергетического уровня W электроном и дыркой при температуре T :

1). для собственного полупроводника (статистика Максвелла-Больцмана)

$$f_n(W, T) = e^{-\frac{W_F - W}{kT}}; \quad f_p(W, T) = e^{-\frac{W - W_F}{kT}} \quad (34;35)$$

2). для примесного полупроводника (статистика Ферми-Дирака)

$$f_n(W, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}}; \quad f_p(W, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W_F - W}{k^*T}}}. \quad (35;36)$$

Уровень Ферми в примесных полупроводниках:

$$W_F^n = \frac{W_C - W_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{N_C}; \quad (37)$$

$$W_F^p = \frac{W_A - W_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_A}. \quad (38)$$

Концентрации основных носителей n и p в электронном и дырочном полупроводниках соответственно при температурах частичной ионизации примесных атомов:

$$n = \sqrt{\frac{N_C N_D}{2}} \cdot e^{-\frac{W_D}{2kT}}; \quad p = \sqrt{\frac{N_V N_A}{2}} \cdot e^{-\frac{W_A}{2kT}}, \quad (39;40)$$

где N_D, N_A - концентрации донорных и акцепторных примесей, м^{-3} ;

W_D, W_A - энергии активации донорных и акцепторных примесей соответственно, Дж.

Концентрации основных носителей в примесных полупроводниках при температурах полной ионизации атомов примеси и пренебрежимо низкой концентрации собственных носителей

$$n \approx N_D, \quad p \approx N_A.$$

Условие электронейтральности:

$$n + N_A^* = p + N_D^*, \quad (41)$$

где N_D, N_A - концентрации ионизированных донорных и акцепторных примесей.

Подвижность носителей:

$$\mu = \frac{v}{E}, \quad (42)$$

где v - дрейфовая скорость носителей, м/с;

E - напряженность электрического поля, В/м.

В слабых электрических полях дрейфовая скорость намного меньше тепловой, и подвижность определяется формулой:

$$\mu = \frac{e \cdot l_{\text{ср}}}{m^* \cdot v_{\text{тепл}}}, \quad (43)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона;

m^* - эффективная масса частицы, кг;

$l_{\text{ср}}$ - средняя длина свободного пробега частицы, м;

$v_{\text{тепл}} = (3kT/m^*)^{1/2}$ - средняя тепловая скорость частицы, м/с.

Подвижность определяется рассеянием на фононах, нейтральных и ионизированных примесях, дефектах структуры и сложным образом зависит от температуры.

С подвижностью связаны *коэффициенты диффузии* носителей:

$$D_n = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \mu_n; \quad D_p = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \mu_p. \quad (44;45)$$

ЭДС Холла в полупроводниках с носителями заряда одного знака:

$$U_H = \frac{R_H IB}{\delta}, \quad (46)$$

где I - протекающий ток, А;

B - магнитная индукция, Тл;

δ - толщина пластины, м;

R_H - коэффициент Холла, м³/Кл.

Он положителен для полупроводников р-типа и отрицателен для полупроводников п-типа и связан с концентрацией носителей заряда соотношением

$$n = \frac{1}{R_H e}. \quad (47)$$

Фотопроводимость. При освещении полупроводника он приобретает добавочную проводимость γ_Φ :

$$\gamma_\Phi = \gamma - \gamma_0 = e(\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p_0 \cdot \mu_p), \quad (48)$$

где γ_0 и γ – электрическая проводимость до и после освещения;

Δn , Δp – концентрации фотовозбужденных электронов и дырок.

Дифференциальная термо-э.д.с. (отнесенная к единичной разности температур):

$$\alpha_i = \frac{k}{\gamma} \left\{ n\mu_n \left(2 + \ln \frac{N_C}{n_i} \right) - p\mu_p \left(2 + \ln \frac{N_V}{p_i} \right) \right\}; \quad (49)$$

Первое слагаемое в (49) характеризует вклад, вносимый электронами, а второе – дырками.

Для *примесных* полупроводников одним из слагаемых, в зависимости от типа проводимости, можно пренебречь; например, для полупроводника *n*-типа дифференциальная термо-э.д.с.

$$\alpha_i^n = \frac{k}{\gamma} \left\{ n\mu_n \left(2 + \ln \frac{N_C}{n_i} \right) \right\} = \frac{k}{e} \left(2 + \ln \frac{N_C}{n_i} \right). \quad (50)$$

*Высота потенциального барьера *p-n* перехода*, или контактная разность потенциалов в равновесном состоянии

$$U_K = \chi_p - \chi_n = W_{Fn} - W_{Fp}; \quad (51)$$

$$U_K = kT \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} = kT \ln \frac{p_{po}}{p_{no}} = kT \ln \frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} = kT \ln \frac{\rho_i^2 (b+1)^2}{\rho_p \rho_n b}, \quad (52)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;
 T – температура, К;

p_{p0}, p_{n0} - концентрации дырок в p и n слоях, м^{-3} ;
 n_{n0}, n_{p0} - концентрации электронов в n и p слоях, м^{-3} ;
 ρ_i, ρ_n, ρ_p - удельные сопротивления соответственно собственного полупроводника, n - и p - слоев;
 $b = \mu_n/\mu_p$ - отношение подвижностей электронов и дырок.
 Вольтамперная характеристика идеального p - n -перехода имеет вид:

$$I = I_S (e^{\frac{\bar{e}U}{kT}} - 1), \quad (53)$$

где I_S – обратный ток (ток насыщения);
 U – высота потенциального барьера.

$$I_S = \left(\frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right) S, \quad (54)$$

где D_p, D_n - коэффициенты диффузии дырок и электронов, $\text{м}^2/\text{с}$;
 p_{n0}, n_{p0} - равновесные концентрации дырок и электронов в n и p слоях;
 S - площадь перехода, м^2 ;
 L_p, L_n - диффузионные длины дырок и электронов, м ,

$$L_{p(n)} = \sqrt{D_{p(n)} \cdot \tau_{p(n)}}, \quad (55)$$

где τ_p, τ_n - время жизни дырок и электронов соответственно, с .

Барьерная емкость p - n перехода:

$$C_B = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l_0} \sqrt{\frac{U_K}{U_K - U}}, \quad (56)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума;
 ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала;
 U - приложенное обратное напряжение, В ;

L_0 - равновесная ширина перехода

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U_K}{e} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}, \quad (57)$$

где N_D, N_A – концентрации донорных и акцепторных примесей в n и p слоях, м^{-3}

2.3. ПРОВОДНИКИ

Плотность тока в проводнике с одним типом носителей заряда

$$J = \gamma \cdot E, \quad (58)$$

где γ - электропроводность, См/м ;

$E = U/l$ - напряженность электрического поля в проводнике длиной l , м, при разности потенциалов между его концами U , В.

Электропроводность проводников:

$$\gamma = q \cdot n \cdot u, \quad (59)$$

где n - концентрация свободных электронов, м^{-3} ;

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$u = v/E$ - подвижность электронов, $\text{м}^2/(\text{В}, \text{м}^3/\text{Кл с})$;

v - скорость, приобретаемая электронами в электрическом поле, м/с .

Удельное электрическое сопротивление - это величина, обратная удельной электрической проводимости:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (60)$$

В соответствии с классической электронной теорией металлов выражение для удельного электрического сопротивления имеет вид:

$$\rho = \frac{2 \cdot m_0 \cdot v_T}{e^2 \cdot n \cdot l_{\text{cp}}}, \quad (61)$$

где $m_0 = 0,91 \cdot 10^{-30}$ кг - масса электрона;
 l_{cp} - средняя длина свободного пробега электронов, м;
 v_T - средняя скорость теплового движения электронов, м/с,
 которая определяется из соотношения:

$$\frac{m_0 \cdot v_T^2}{2} = \frac{3}{2} k \cdot T, \quad (62)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана,
 T - температура, К.

Если атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация свободных электронов n будет равна концентрации атомов N и может быть рассчитана по формуле

$$n = N = \frac{d}{M} N_A, \quad (63)$$

где d - плотность вещества, кг/м³;
 M - молярная масса, кг/моль;
 $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль - постоянная Авогадро.

В соответствии с квантовой теорией удельное электрическое сопротивление металлов

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{1/3} \cdot \frac{h}{e^2 \cdot n^{2/3} \cdot l_{cp}}, \quad (65)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка.

Средняя скорость дрейфа за время свободного пробега

$$v = \frac{e \cdot E}{2m_0} \cdot \tau_0, \quad (66)$$

где τ_0 – время свободного пробега.

Примеси и структурные дефекты увеличивают удельное сопротивление металлов. В соответствии с правилом Маттиссена:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \quad (67)$$

где ρ_T - удельное электрическое сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристал-

лической решетки;

$\rho_{ост} = \rho_{пр} + \rho_{деф}$ - остаточное удельное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на статических дефектах структуры: примесных атомах ($\rho_{пр}$) и собственных дефектах структуры ($\rho_{деф}$).

Удельное сопротивление металлических сплавов, имеющих структуру неупорядоченного твердого раствора, $\rho_{ост}$ может существенно превышать $\rho_{т}$. Для многих двухкомпонентных сплавов металлов, не принадлежащих к числу переходных или редкоземельных элементов, зависимость $\rho_{ост}$ от состава описывается законом Нордгейма:

$$\rho_{ост} = CX_A X_B = CX_A(1 - X_B), \quad (68)$$

где C - константа, зависящая от природы сплава;

X_A, X_B - атомные доли компонентов в сплаве.

С увеличением температуры удельное сопротивление растет.

При инженерных расчетах допускается использование формулы:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha_\rho(T - T_0)], \quad (69)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление в начале температурного диапазона;

$$\alpha_\rho = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0(\hat{O} - \hat{O}_0)} - \text{средний температурный коэффициент}$$

удельного сопротивления в данном диапазоне температур, K^{-1} ;

ρ - удельное сопротивление при температуре T .

Температурные коэффициенты удельного сопротивления α_ρ , сопротивления α_R и удлинения α_l связаны соотношением

$$\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l. \quad (70)$$

Температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha_R = (R_2 - R_1)/[R_1(T_2 - T_1)]. \quad (71)$$

Зависимость длины проводника от температуры

$$l = l_0 [1 + \alpha_l(T - T_0)], \quad (72)$$

где l_0 - начальная длина проводника при температуре T_0 ;

l – длина при температуре T ;

α_l – температурный коэффициент линейного удлинения.

В металлах благодаря высокой концентрации свободных электронов преобладает электронная теплопроводность. Экспериментальный закон Видемана – Франца - Лоренца устанавливает связь между удельной теплопроводностью λ , Вт*м/К, и удельной электрической проводимостью γ , См/м:

$$\lambda/\gamma = L_0 T, \quad (73)$$

где L_0 – число Лоренца .

Количество теплоты Q , выделяющееся в единицу времени в единице объема проводника, по которому протекает ток плотностью J , при напряженности электрического поля E , выражается формулой

$$Q = JE = \gamma E^2. \quad (74)$$

Термоэлектродвижущая сила (термоЭДС). В однородном проводнике при наличии градиента температуры на его концах возникает разность потенциалов. Ее значение, отнесенное к единичной разности температур на концах проводника, называют абсолютной удельной термоЭДС. В термоэлектрической цепи, составленной из разнородных проводников (термопаре), относительная удельная термоЭДС представляет собой разность абсолютных удельных термоЭДС составляющих проводников

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B, \quad (75)$$

где α_T^A и α_T^B - абсолютные удельные термоЭДС контактирующих металлов А и В.

Сопротивление проводников на высоких частотах. На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводника: плотность тока максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Распределение тока по сечению проводника описывается уравнением:

$$J(z) = J_0 e^{-\frac{z}{\Delta}}, \quad (76)$$

где J_0 - плотность тока на поверхности;
 z - координата по нормали к поверхности в глубь проводника, м;

Δ - глубина проникновения поля в проводник, м.

Плотность тока изменяется по тому же закону, что и напряженность электрического поля E , так как $J = \gamma E$. Связь глубины проникновения поля с физическими характеристиками вещества определяется выражением:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu \gamma}}, \quad (77)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная;

μ - относительная магнитная проницаемость вещества;

f - частота, Гц.

2.4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Условия, необходимые для ферромагнитности материалов.

Каждое из приведенных ниже условий необходимо, но недостаточно, а наличие всех условий и составляет природу существования и проявления ферромагнитных свойств.

1. Существование элементарных круговых токов в атомах.
2. Наличие нескомпенсированных спиновых моментов электронов.
3. Соотношение между диаметром электронной орбиты (D), имеющей нескомпенсированный спиновый момент, и постоянной кристаллической решетки вещества (a) должно быть:

$$2,8 \geq a/D \geq 1,6.$$

4. Наличие доменной структуры, т.е. таких кристаллических областей, в которых дипольные магнитные моменты оказываются параллельно ориентированы.

5. Температура материала (вещества) должна быть ниже точки Кюри, так как при более высокой температуре происходит исчез-

новение доменной структуры, материал переходит из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Степень намагничивания вещества характеризуют величиной намагниченности, или интенсивности намагничивания (J), которая определяется как предел отношения результирующего магнитного момента Σm , отнесенного к объему вещества (V), когда объем стремится к нулю:

$$J = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Sigma m}{V} \quad (78)$$

Если поместить вещество во внешнее магнитное поле с напряженностью H , то соотношение между J и H будет

$$J = 4\pi\chi H, \quad (79)$$

где χ (каппа) называется магнитной вязкостью.

Относительная магнитная проницаемость μ зависит от χ :

$$\mu = 1 + 4\pi\chi. \quad (80)$$

Интенсивность намагничивания можно определить, зная μ

$$\mu = 1 + J/H \quad (81)$$

Суммарное магнитное поле характеризуется магнитной индукцией B :

$$B = \mu_0 (H + J), \quad (82)$$

где μ_0 - магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума);

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Г/м.}$$

Выражая значение J через χ , а затем и μ , получим:

$$B = \mu_0 H(1 + 4\pi\chi) \text{ или } B = \mu_0 \mu H. \quad (83)$$

Абсолютная величина магнитной проницаемости

$$\mu_{\text{абс}} = \mu_0 \cdot \mu. \quad (84)$$

Процесс намагничивания характеризуется для каждого ферромагнетика своей основной кривой намагничивания $B = f(H)$.

Зависимость магнитной индукции материала от напряженности внешнего магнитного поля имеет форму петли гистерезиса.

Классификация материалов по форме петли гистерезиса приведена в таблице 2.

Таблица 2.

Классификация основных материалов по форме петли гистерезиса

Материал	Форма петли гистерезиса	Применение
Магнитомягкие	Узкая, округлая, небольшая площадь, $H_c \rightarrow 0$	Сердечники трансформаторов и электрические машины.
Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ)	Узкая, округлая, небольшая площадь, $H_c \rightarrow 0$	Элементы памяти.
Магнитотвердые	Широкая, $H_c \gg 0$	Для изготовления постоянных магнитов.

Затраты энергии, которые идут на перемагничивание ферромагнетиков, на возникновение вихревых токов в переменном магнитном поле, на магнитную вязкость материала — создают так называемые потери, которые можно разделить на следующие виды:

а) потери на гистерезис P_H , пропорциональны площади петли гистерезиса. Их можно рассчитать по формуле Ч. Штейнмеца:

$$P_H = \eta \cdot f \cdot V^n \max \cdot V, \quad (85)$$

где η - коэффициент гистерезиса для данного материала;

f - частота поля, Гц;

V_{\max} - максимальная индукция, Тл;

V - объем образца, м³;

$n \approx 1,6 \dots 2$ - значение показателя степени.

б) потери на вихревые токи, формула Ч. Штейнмеца:

$$P_{в.т} = \xi \cdot f^2 \cdot V^n \max \cdot V, \quad (86)$$

где ξ - коэффициент, зависящий от удельного электрического сопротивления материала и от формы образца.

в) потери на последствие $P_{п.с.}$, (потери на магнитную вязкость), которые не поддаются аналитическому расчету и определяются исходя из полных потерь P , $P_{г}$ и $P_{в.т.}$ по формуле:

$$P_{п.с.} = P - P_{г} - P_{в.т.} \quad (87)$$

Потери на вихревые токи можно уменьшить, увеличивая электрическое сопротивление ферромагнетика. Для этого магнитопровод, например, для трансформаторов набирают из отдельных тонких, изолированных друг от друга пластин ферромагнетика. При этом увеличивается электрическое сопротивление сердечника трансформатора и уменьшаются токи, а следовательно потери, возникающие из-за них.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев.- Л.: Энергоиздат, 1985.
2. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин.- СПб.: «Лань», 2003.
3. Прахова, М.Ю. Физические основы электроматериаловедения: учеб. методическое пособие/ М.Ю. Прахова, Н.А. Ишинбаев. – Уфа, 2012.
4. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов.- М.: Высшая школа, 2008.
5. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.Н. Лахтин, В.П. Леонтьева.-М.: Машиностроение, 1990.
6. Материаловедение / под общ.ред. Б.Н. Арзамасова.-М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002.
7. Харламова, Т.Е. МатериаловедениеТКМ: учеб.пособие. Ч.2. Электроматериаловедение / Т.Е. Харламова.-СПб.: СЗТУ, 2007.
8. Харламова, Т.Е. Материаловедение. ТКМ: УМК. Ч.1 / Т.Е. Харламова.-СПб.: СЗТУ, 2008.
9. Харламова, Т.Е. Материаловедение. ТКМ: УМК. Ч.2. / Т.Е. Харламова.-СПб.: СЗТУ, 2009.
10. Электротехнический справочник: в 2-х томах. Т.1 / под ред. В.Г. Герасимова и др.- М.: Изд-во МЭИ, 2003.

Приложение 1

Исходные данные к задаче 1

Параметры	Номер варианта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho_v, \text{ Ом·м}$	$7 \cdot 10^{10}$	10^{12}	10^{13}	10^{13}	$2 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{10}$	10^{14}	$5 \cdot 10^{12}$
$\rho_s, \text{ Ом}$	10^{12}	10^{13}	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{13}$	10^{13}	10^{14}	10^{14}
E	6	8,6	6,3	8	7	6,8	6	7	8,5
$\text{tg} \delta$	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-4}$	0,03	0,002	0,035	0,003	$8 \cdot 10^{-4}$
$U_n, \text{ кВ}$	10	35	20	10	35	10	20	110	35
H, мм	170	420	315	1050	500	210	360	1060	420
D ₁ , мм	160	180	170	220	225	170	180	220	200
D ₂ , мм	140	160	150	200	200	150	160	200	180
f, Гц	50								

Приложение 2

Справочные данные некоторых физических констант

Наименование константы	Обозначение	Размерность	Численное значение
Электрическая постоянная	ϵ_0	Ф/м	$8,854 \cdot 10^{-12}$
Масса покоя электрона	m_0	кг	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Заряд электрона	e	Кл	$1,602 \cdot 10^{-19}$
Число Авогадро	N_0	моль ⁻¹	$6,022 \cdot 10^{23}$
Постоянная Планка	h	Дж*с	$6,62 \cdot 10^{-34}$
		эВ*с	$4,14 \cdot 10^{-15}$
Постоянная Больцмана	k	Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
		эВ/К	$8,62 \cdot 10^{-5}$
Постоянная Фарадея	F	Кл/моль	$9,648 \cdot 10^4$
Число Лоренца	L_0	В ² /К ²	$2,45 \cdot 10^{-8}$
Универсальная газовая постоянная	R	Дж/(моль*К)	8,314

Приложение 3

Основные параметры некоторых проводниковых металлов

Наименование	ρ , мкОм*м при 20°C	TKR, 1/град при 20°C	γ , (мкОм*м) ⁻¹
Алюминий	0,0265-0,0295	0,0041-0,00439	36
Вольфрам	0,053-0,055	0,0041-0,0050	
Железо	0,098-0,105	0,005-0,006	58
Золото	0,0220-0,0235	0,00365-0,00387	
Медь	0,0172-0,0182	0,0041-0,0043	
Молибден	0,048-0,054	0,00473-0,00512	
Никель	0,0683-0,0725	0,00680	
Олово	0,116-0,124	0,00438-0,00440	
Платина	0,096-0,105	0,00257-0,00398	
Свинец	0,217-0,227	0,0038-0,0041	
Серебро	0,0150-0,0162	0,0034-0,0038	
Сталь	0,103-0,137	0,0057-0,0062	
Цинк	0,0535-0,0625	0,0039-0,0041	
Константан	0,45-0,52	$(0,3-0,5) \cdot 10^{-5}$	
Нихром	1,00-1,27	$(12-17) \cdot 10^{-5}$	

Приложение 4

Основные параметры некоторых диэлектрических материалов

Диэлектрик	ρ_V , Ом м	$tg\delta$	$E_{гпр}$ МВ/м
Полиэтилен	$10^{13} \div 10^{15}$	0,0001 ÷ 0,0005	10 ÷ 15
Полистирол	$10^{13} \div 10^{15}$	0,0001 ÷ 0,0003	20 ÷ 35
Политетрафторэтилен	$10^{15} \div 10^{16}$	0,0001 ÷ 0,0002	20 ÷ 30
Поливинилхлорид	$10^{13} \div 10^{14}$	0,03 ÷ 0,08	15 ÷ 20
Полиметилметакрилат	$10^{11} \div 10^{12}$	0,02 ÷ 0,08	20 ÷ 35
Полиамидные	$10^{11} \div 10^{12}$	0,015 ÷ 0,035	15 ÷ 20
Эпоксидные	$10^{12} \div 10^{13}$	0,01 ÷ 0,03	20 ÷ 80
Фенолоформальдегидные	$10^{11} \div 10^{12}$	0,01 ÷ 0,01	10 ÷ 20
Полиэфирные	$10^{11} \div 10^{12}$	0,002 ÷ 0,02	15 ÷ 20
Кремнийорганические	$10^{12} \div 10^{13}$	0,01 ÷ 0,03	15 ÷ 20

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ.....	3
1.1. Диэлектрики	3
1.2. Полупроводники	6
1.3. Проводники.....	8
1.4. Магнитные материалы.....	10
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ	12
2.1. Диэлектрики	12
2.2. Полупроводники	20
2.3. Проводники.....	26
2.4. Магнитные материалы.....	30
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	34
Приложения.....	38

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Методические указания для практических занятий

Составители: *А.В.Коптева, И.Н. Войтюк,*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой электро-
энергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *А.В. Коптева*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Подписано к печати XX.XX.14. Формат 60 x 84/16. Бум. для копировальной
техники. Отпечатано на ризографе. Усл.печ.л. 2,85. Усл.кр.-отт. 2,85. Уч.-
изд.л. 2,2. Тираж X00 экз. Заказ XX. С XX.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный»
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2