



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

Учебно-методическое пособие
«Избранные разделы физики»
по дисциплине

«Физика»

Авторы
Гольцов Ю. И.,
Ларина Т. Н.

Ростов-на-Дону, 2021

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной заочной форм обучения направления 20.03.03 – «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профиль подготовки «Автомобильный сервис».

Состоит из разделов электричество, магнетизм и оптика, включающих: электронное строение твердых тел, свойства вещества в электростатическом поле, электрический ток в веществе, терморезистивный и тензорезистивный эффекты, контактные и гальваномагнитные явления, поведение вещества в магнитном поле, взаимодействие вещества с оптическим излучением.

Материал сопровождается иллюстрациями и контрольными вопросами по каждому разделу, содержит тестовые задания для самоподготовки.

Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика» Гольцов Ю.И.,
к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика» Ларина Т.Н.

Оглавление

1. Электронное строение твёрдых тел	4
1.1. Элементы зонной теории строения твердых тел	4
1.2. Металлы, диэлектрики и полупроводники в зонной теории	5
1.3. Контрольные вопросы	11
1.4. Тестовые задания.....	11
2. Вещество в электрическом поле.....	14
2.1. Проводники в электрическом поле	14
2.2. Электрическая ёмкость. Конденсаторы	15
2.3. Диэлектрики в электрическом поле	22
2.4. Пьезоэлектрический эффект	36
2.5. Пирозлектрики	40
2.6. Контрольные вопросы	41
2.7. Тестовые задания.....	42
3. Электрический ток в веществе	45
3.1. Электрическое сопротивление проводников	45
3.2. Терморезистивный эффект.....	46
3.3. Тензорезистивный эффект.....	49
3.4. Контактные явления в металлах	51
3.6. Электропроводность растворов электролитов.....	60
3.7. Химические источники тока.....	63
3.8. Контрольные вопросы	69
3.9. Тестовые задания.....	69
4. Магнитные явления в вакууме и веществе	75
4.1. Магнитное поле проводников с током	75
4.2. Явление электромагнитной индукции	78
4.3. Вещество в магнитном поле.....	84
4.4. Контрольные вопросы	93



4.5. Тестовые задания.....	93
5. Оптика. Взаимодействие вещества с оптическим излучением	97
5.1. Оптическое излучение и его характеристики	97
5.2. Прохождение оптического излучения через границу раздела двух сред ...	99
5.2.1. Законы отражения и преломления света	99
5.3. Взаимодействие оптического излучения с оптически анизотропными средами	104
5.4 Контрольные вопросы	110
5.5 Тестовые задания.....	110
6. Библиографический список	114

1. ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

1.1. Элементы зонной теории строения твердых тел [1, 2, 5, 8]

При сближении атомов до расстояния нескольких долей нанометра (1 нм равен 10^{-9} м), между ними появляются силы взаимодействия. Вначале эти силы являются силами притяжения, поэтому атомы могут соединяться с выделением энергии, образуя жидкости и твёрдые тела. В твёрдых телах атомы преимущественно располагаются упорядоченно. Такие конфигурации обладают более низкой энергией и поэтому более устойчивы, чем при хаотическом расположении атомов. Внешне упорядочение проявляется в виде различных кристаллических форм, отражающих регулярность внутреннего расположения атомов в твердом теле. Итак, кристаллы – это твердые тела, обладающие упорядоченной трехмерной периодической атомной структурой. Геометрические места расположения атомов называются узлами кристаллической решетки. Существование кристаллической решетки объясняется тем, что равновесие сил притяжения и отталкивания между атомами, соответствующее минимуму потенциальной энергии, достигается при условии трехмерной периодичности. Физические, химические и другие свойства кристаллов определяются особенностями образующих кристаллическую решетку атомов и молекул, силами химических связей и их взаимным расположением в решетке. Химическая связь осуществляется посредством электронов, находящихся на внешних, не полностью занятых электронных оболочках. Эти электроны называют валентными.

Зонная теория твердого тела – это теория валентных электронов, движущихся в периодическом потенциальном поле, кристаллической решетки. Зонная теория является основой современных представлений о механизмах различных физических в том числе электрических, явлений, происходящих в твердом кристаллическом веществе при воздействии на него электромагнитного поля.

Если имеется система из N одинаковых атомов, достаточно удаленных друг от друга (например, газообразное вещество), то взаимодействие между атомами практически отсутствует и энергетические уровни электронов остаются без изменений. При конденсации газообразного вещества в жидкость, а затем при образовании кристаллической решетки твердого тела все имеющиеся у атомов данного типа электронные уровни (как заполненные электронами, так и незаполненные) несколько смещаются вследствие действия соседних атомов друг на друга. В частности, притяжение электронов одного атома ядром соседнего снижает высоту потенциального барьера, разделяющего электроны в уединенных атомах. Благодаря перекрытию оболочек, электроны могут без изменения энергии посредством обмена переходить от одного атома к другому, т. е. перемещаться по кристаллу. Обменное взаимодействие имеет чисто квантовую природу и является следствием неразличимости электронов. В этом случае уже нельзя говорить о принадлежности того или иного электрона определенному атому – каждый валентный электрон принадлежит всем атомам кристаллической решетки одновременно. Иными словами, при перекрытии электронных оболочек происходит обобществление электронов.

Вследствие обменного взаимодействия дискретные энергетические уровни изолированного атома расщепляются в энергетические зоны, как это показано для неметаллического твердого тела на рисунке 1.1. Разрешенные энергетические зоны разделены запрещенными интервалами энергии. Это основное положение

зонной теории твёрдых тел, которая была создана в 1930 году [Ф. Блохом](#) и [Л. Бриллюэном](#).

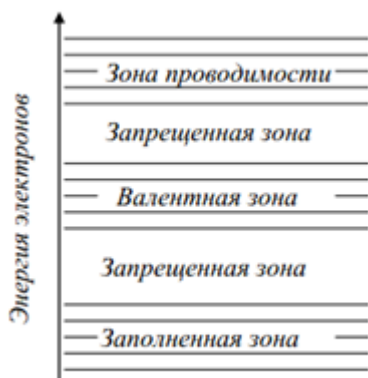


Рис.1.1. Зонная энергетическая диаграмма твердого тела

Каждая зона состоит из множества энергетических уровней. Очевидно, их количество определяется числом атомов, составляющих твердое тело. Это значит, что в кристалле конечных размеров расстояние между уровнями обратно пропорционально числу атомов. В кристалле объемом в 1 см^3 содержится $10^{22} - 10^{23}$ атомов. Отсюда можно сделать вывод, что уровни в зоне отстоят друг от друга по энергии на $10^{-22} - 10^{-23}$ эВ, т. е. энергетическая зона характеризуется практически непрерывным спектром. Достаточно ничтожно малого энергетического воздействия, чтобы вызвать переход электронов с одного уровня на другой, если там имеются свободные состояния.

В соответствии с принципом [Паули](#) на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, причем с противоположным направлением спинового магнитного момента. Поэтому число электронных состояний в зоне оказывается конечным и равным числу соответствующих атомных состояний. Конечным оказывается и число электронов, заполняющих данную энергетическую зону, что играет важную роль в формировании энергетического спектра кристалла.

Подобно энергетическим уровням в изолированных атомах энергетические зоны могут быть полностью заполненными, частично заполненными и свободными. Внутренние оболочки в изолированных атомах заполнены, поэтому соответствующие им зоны также оказываются заполненными. Самую верхнюю из заполненных электронами зон называют валентной. Эта зона соответствует энергетическим уровням электронов внешней оболочки в изолированных атомах. Ближайшую к ней свободную, незаполненную электронами зону называют зоной проводимости. Взаимное положение этих двух зон определяет большинство электрических процессов, происходящих в твердом теле.

1.2. Металлы, диэлектрики и полупроводники в зонной теории [1, 2, 5, 8]

Согласно зонной теории, электроны валентной зоны имеют практически одинаковую свободу движения во всех твердых телах независимо от того, являются ли они металлами или диэлектриками. Движение осуществляется путем туннельного перехода электронов от атома к атому. Для объяснения различий в электрических свойствах материалов надо принять во внимание различную реакцию на внешнее электрическое поле электронов заполненной и незаполненной зон. Внешнее электрическое поле стремится нарушить симметрию в распределении электронов по

скоростям, ускоряя электроны, движущиеся в направлении действующих электрических сил, и замедляя частицы с противоположно направленным импульсом. Однако подобное ускорение и замедление связано с изменением энергии электронов, что должно сопровождаться переходом их в новые квантовые состояния. Очевидно, такие переходы могут осуществляться лишь в том случае, если в энергетической зоне имеются свободные уровни. В типичных случаях добавочная энергия, приобретаемая электронами на длине свободного пробега под действием электрического поля, составляет $10^{-3} - 10^{-4}$ эВ, т. е. намного превосходит расстояние между подуровнями в зоне.

Характер энергетического спектра у металлических проводников, полупроводников и диэлектриков существенно различен. В металлических проводниках валентная зона заполнена не полностью или перекрывается с зоной проводимости. В полупроводниках и диэлектриках зона проводимости и валентная зона разделены некоторым энергетическим зазором, называемым запрещенной зоной. Формально к полупроводникам относят вещества, у которых запрещенная зона меньше 3 эВ.

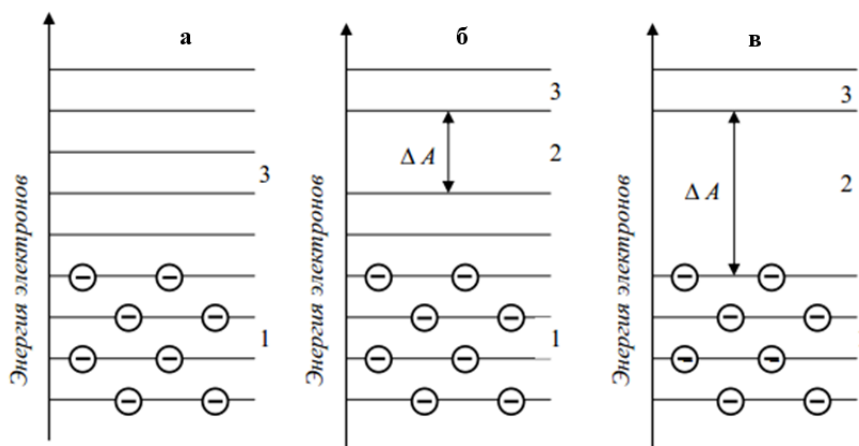


Рис. 1.2. [Зонные диаграммы](#) проводника (а), полупроводника (б) и диэлектрика (в) 1–валентная зона; 2–запрещённая зона; 3– свободная зона (зона проводимости)

Вещества с более широкой запрещенной зоной относят к диэлектрикам. У реальных диэлектриков ширина запрещенной зоны может достигать 10 эВ. Различие в положении энергетических зон у диэлектриков, полупроводников и металлических проводников показано на рисунке 1.2. В случае (а) зона свободных уровней 3 вплотную примыкает к валентной зоне 1 или перекрывает её. Поэтому достаточно сообщить электронам, находящимся на верхних уровнях, совсем небольшую добавочную энергию порядка $10^{-23} - 10^{-22}$ эВ (расстояние между уровнями в зоне), для того чтобы перевести их на более высокие уровни. Средняя энергия теплового движения атома ($\sim kT$) составляет при 300К величину порядка 0,06эВ. Следовательно, при температурах, отличных от абсолютного нуля, часть электронов перейдёт на более высокие уровни. Поэтому электроны могут ускоряться электрическим полем и приобретать дополнительную скорость в направлении, противоположном направлению поля. Таким образом, кристалл с подобной схемой энергетических уровней будет представлять собою металл. Независимо от заполнения валентной зоны тело будет проводником, т.к. выше занятых электронами

уровней имеются близкие по значению энергии свободные уровни. Твердое тело будет проводником и в случае (б), когда разрешенные области разделены зоной 2, характеризуемой энергетическим барьером ΔA , но валентная зона не заполнена до конца.

Обе диаграммы относятся к металлам. Их хорошая электропроводность определяется большим количеством свободных энергетических уровней. В металлах, где зона не полностью укомплектована электронами, даже слабое поле способно сообщить электронам достаточный импульс, чтобы вызвать их переход на близлежащие свободные уровни. По этой причине металлы являются хорошими проводниками электрического тока. Под действием электрического поля электроны металлов получают дополнительную энергию и могут переходить на свободные уровни, чем и обеспечивается их направленное движение вдоль линий напряженности электрического поля, т. е. электрический ток.

Плотность электрического тока \vec{j} в проводнике прямо пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} (закон Ома):

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (1.1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление. Удельное электрическое сопротивление металлов и сплавов меняется в пределах 0,016...1,2 мкОм·м (таблица 1.1). С изменением температуры металлов их удельное электрическое сопротивление увеличивается либо уменьшается в соответствии с уравнением:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t).$$

(1.2)

Здесь ρ и ρ_0 – соответственно удельные сопротивления металла при температуре t и 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления.

Таблица 1.1

Электрические свойства некоторых металлов при 20°C

Металл	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Температурный коэффициент сопротивления, $^\circ\text{C}^{-1}$
Висмут	1,2	0.0045
Железо	0,098	0.0065
Алюминий	0,029	0.0046
Медь	0,018	0.0043
Серебро	0,016	0.0043

В отличие от металлов у диэлектриков валентная зона заполнена до конца и отделена от зоны проводимости запрещенной зоной энергий шириной более 2 эВ (рисунке 1.2, в). При обычных температурах лишь незначительное количество электронов может преодолеть запрещенную зону и перейти в зону проводимости, поэтому удельное электрическое сопротивление диэлектриков, равное $10^9 \dots 10^{17}$ Ом·м, значительно больше, чем у самых «плохих» проводников.

Воздействие на диэлектрик электрического поля приводит либо к ориентации вдоль линий напряженности полярных молекул, которые можно рассматривать как электрические диполи, либо к упругому смещению вдоль линий напряженности разноименно заряженных «частей» неполярных молекул с

образованием тех же ориентированных по полю диэлектрических диполей (рисунке 1.3). Такое упорядоченное смещение связанных зарядов под действием внешнего электрического поля называется поляризацией диэлектрика.

Нетрудно заметить, что собственное внутреннее поле E_n системы диполей направлено противоположно внешнему полю.

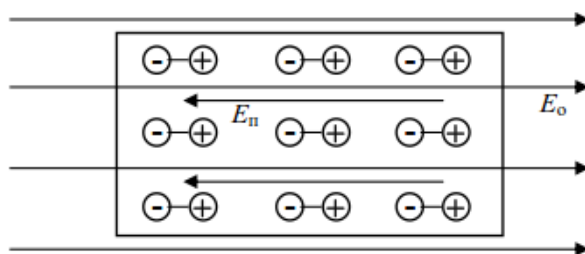


Рис.1.3. Диэлектрики в электрическом поле [5]

Таким образом напряженность E_0 внешнего поля уменьшается на величину напряженности E_n поля поляризационных зарядов: $E = E_0 - E_n$. Величина, показывающая во сколько раз напряжённость внешнего поля больше напряжённости E поля в диэлектрике, называется относительной диэлектрической проницаемостью диэлектрика: $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$ (см. таблица 1.2).

Таблица 1.2

Электрические свойства диэлектриков при 20°C

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Парафин	2 – 2,2	10^{13} - 10^{14}
Стекло	5,5 - 10	10^9 - 10^{13}
Фарфор	5,0 – 7,5	10^{12} - 10^{13}
Полиэтилен	2,2 – 2,3	10^{15}
Янтарь	2,–8	10^{17}

Наряду с проводниками и диэлектриками, существуют вещества, при воздействии на которые электрического поля, имеет место как протекание в них электрического тока, так и их поляризация. Их можно рассматривать как «несовершенные» диэлектрики. Такие вещества, электрическое сопротивление которых велико по сравнению с металлами ($\rho = 10^{-3} - 10^6$ Ом·м при 20 °C), но все же значительно меньше сопротивления «хороших» диэлектриков (таблица 3) образуют класс полупроводников. К полупроводникам относятся элементы IV группы таблицы Менделеева и многие химические соединения.

Свойства полупроводников объясняются особенностями их зонной структуры.

Таблица 1.3

Электрические свойства полупроводников при 20°C

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Германий	16	0,43
Кремний	11,7	$2,6 \cdot 10^3$
Теллур	25	10^{-3}
Селен	6	$2 \cdot 10^3$
Углерод (алмаз)	11	1,5

Качественно зонная диаграмма полупроводника не отличается от диаграммы диэлектриков (рисунок 1.2, в). Валентная зона у полупроводников заполнена до конца и отделена от зоны проводимости запрещенной зоной шириной

0,3...3 эВ. При температуре выше абсолютного нуля этот энергетический барьер (меньший, чем в случае диэлектриков), может быть преодолен существенным числом электронов. Освободившиеся от электронов места на энергетических уровнях валентной зоны, называемые дырками, так же как свободные электроны обеспечивают проводимость полупроводников. Эта проводимость называется собственной. В этом случае число электронов равно числу дырок. Зависимость электросопротивления полупроводника имеет вид:

$$\rho = [en(\mu_+ + \mu_-)]^{-1},$$

$$R = R_0 \exp(\Delta E / 2kT). \quad (1.3)$$

Здесь μ_+ и μ_- – подвижность дырок и электронов соответственно, n – концентрации электронов и дырок (одинаковые в собственном полупроводнике), e – электрический заряд электрона, ΔE – энергия активации, равная ширине запрещенной зоны ΔA , k – постоянная Больцмана, T – температура по шкале Кельвина.

В полупроводниках как и в диэлектриках при температуре 0 К все электроны находятся в валентной зоне, а зона проводимости абсолютно свободна. Электроны полностью заполненной зоны не могут принимать участия в создании электрического тока. Для появления электропроводности необходимо часть электронов перевести из валентной зоны в зону проводимости. Энергии электрического поля недостаточно для осуществления такого перехода, требуется более сильное энергетическое воздействие, например нагревание твердого тела.

Средняя кинетическая энергия тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке приблизительно равна $(3/2)kT$. При комнатной температуре эта величина составляет приблизительно 0,04 эВ, что в общем случае существенно меньше ширины запрещенной зоны. Однако следует иметь в виду, что тепловая энергия неравномерно распределяется между частицами. В каждый момент времени имеется небольшое число атомов, у которых амплитуда и энергия тепловых колебаний значительно превышают среднее значение. В процессе тепловых колебаний атомы взаимодействуют не только друг с другом, но и с электронами, передавая им часть тепловой энергии. Именно за счет таких тепловых флуктуаций некоторые из электронов могут перейти из валентной зоны в зону проводимости. Очевидно, чем выше температура и меньше запрещенная зона, тем выше интенсивность межзонных

переходов. У диэлектриков запрещенная зона может быть настолько велика, что электронная электропроводность не играет определенной роли.

При наличии дырок электроны валентной зоны могут совершать эстафетные переходы с уровня на уровень. Во внешнем электрическом поле дырка движется противоположно движению электрона, т. е. ведет себя как некоторый положительный заряд с отрицательной эффективной массой. Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т. е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в веществе при любой температуре наступает динамическое равновесие т. е. количество электронов, переходящих в свободную зону, становится равным количеству электронов, возвращающихся обратно в нормальное состояние. С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением температуры до абсолютного нуля – убывает вплоть до нуля. Таким образом различие же между полупроводниками и диэлектриками – исчезает по мере приближения температуры к абсолютному нулю.

Энергию, необходимую для перевода электрона в свободное состояние или для образования дырки, может дать не только тепловое движение, но и другие источники энергии, например поглощенная материалом энергия света, энергия потока электронов и ядерных частиц, энергия электрических и магнитных полей, механическая энергия т. д. Увеличение же числа свободных электронов или дырок под воздействием какого-либо вида энергии также способствует повышению электропроводности полупроводника.

Примеси и точечные дефекты, нарушающие строгую периодичность структуры, создают особые энергетические уровни, которые располагаются в запрещенной зоне идеального кристалла. Если примесные атомы или дефекты расположены достаточно далеко друг от друга, то взаимодействие между ними отсутствует, а соответствующие им энергетические уровни оказываются дискретными. Поскольку туннельные переходы электронов между удаленными примесными атомами практически невозможны, то дополнительные электронные состояния локализованы в определенном месте решетки, т. е. на дефекте структуры. При достаточно высокой концентрации примесных атомов расстояния между ними сравнимы с размерами атомов, благодаря чему возможно перекрытие электронных оболочек ближайших атомов примеси. В этом случае дискретные энергетические уровни примесей расщепляются в энергетическую зону примесных состояний, способную обеспечить проводимость, если не все уровни в этой зоне заполнены электронами. В этой связи электронная (n -типа) и дырочная (p -типа) проводимости могут быть значительно изменены введением в его кристаллическую решетку атомов других химических элементов (порядка 0,01%). Проводимость такого типа называется примесной. При введении атомов примеси в запрещенной зоне появляются локальные энергетические состояния.

Если атом примеси имеет валентность большую, чем атомы полупроводника (например, примесь атомов мышьяка As в германий Ge), то один из электронов примеси, слабо связанных с ядром, уже при малых энергиях возбуждения может стать свободным. В этом случае электрический ток формируется, в основном, движением таких, слабо связанных электронов, а [проводимость полупроводника \(\$n\$ -тип\) называется донорной](#). Если в кристаллическую решетку полупроводника ввести атомы примеси с меньшей валентностью (например, примесь атомов бора B в кремний Si), то атом примеси захватывает один из электронов у атома

полупроводника – возникает “дырка”. Электропроводность в этом случае будет дырочной (p - тип), а примесь – акцепторной. Уровни атомов с донорной или акцепторной примесью называются соответственно донорными или акцепторными примесными уровнями. Примесные донорные уровни располагаются в запрещенной зоне на расстоянии нескольких десятых или сотых долей электронвольта (эВ) от нижнего края зоны проводимости, а для акцепторной примеси – вблизи от верхней границы валентной зоны. При температуре $T=0$ донорные уровни полностью заполнены электронами, а акцепторные – свободны (т. е. заполнены дырками). С повышением температуры электроны с донорных уровней переходят в зону проводимости, а дырки – в валентную зону, что приводит к значительному росту концентрации носителей электрического тока и, следовательно, к увеличению электропроводности полупроводника и уменьшению его сопротивления. Влияние этого фактора превалирует над уменьшением с ростом температуры длины свободного пробега электронов. Поэтому в полупроводниках с ростом температуры резко возрастает электрическая проводимость. С повышением температуры все существеннее становится вклад в электропроводность носителей заряда, связанных с собственной проводимостью. При высоких температурах начинает преобладать собственная проводимость. Такое же влияние на электрическую проводимость полупроводников оказывают и другие энергетические воздействия: механическая деформация, оптическое и ионизирующее излучения.

Таким образом, электрические свойства всех твердых тел определяют теоретически с единой точки зрения – энергия возбуждения носителей заряда или энергия активации электропроводности равна нулю у металлов и непрерывно возрастает в ряду полупроводников, условно переходящих при увеличении этой энергии в ряд диэлектриков; хорошо проводящие металлы и хорошо изолирующие диэлектрики представляют собой крайние члены того непрерывного ряда, в котором можно расположить твердые тела по этому признаку. Разделение твердых тел на полупроводники и диэлектрики поэтому носит в значительной мере условный характер. По мере того, как в качестве полупроводников начинают использоваться материалы со все более широкой запрещенной зоной, деление тел на полупроводники и диэлектрики постепенно утрачивает свой изначальный смысл.

1.3. Контрольные вопросы

1. Почему при образовании твердого тела энергетические уровни атомов расщепляются в энергетические зоны?
2. От чего зависит ширина разрешенной зоны и число уровней в ней?
3. На какие группы делятся вещества по своим электрическим свойствам?
4. В чем разница энергетических зонных диаграмм проводника, диэлектрика и полупроводника?
5. В чем различие между электронами проводимости и свободными электронами?
6. Каково влияние температуры на электрическую проводимость проводника и полупроводника?
7. Что происходит при помещении диэлектрика в электрическое поле?

1.4. Тестовые задания [8-12]

1. Какими частицами создается электрический ток в полупроводниках?

Варианты ответов: а) только ионами; б) только электронами; в) любыми заряженными частицами; г) дырками; д) электронами и дырками.

2. Собственная проводимость полупроводников – это...

Варианты ответов: а) проводимость, обусловленная разрывом ковалентных связей в чистом полупроводнике при повышении его температуры;

б) взаимодействие соседних атомов, обусловленное обращением электронов вокруг пары атомов; в) преобладающая проводимость p -типа или n -типа, получаемая в полупроводниках добавлением определенных примесей;

г) примеси, благодаря добавлению которых возникает недостаток электронов для образования ковалентных связей между атомами полупроводника и атомами примеси.

3. Каким типом проводимости обладают полупроводники с акцепторной примесью?

Варианты ответов:

а) в основном дырочной;

б) в основном электронной;

в) электронной и дырочной.

4. Какие из перечисленных ниже элементов при легировании германиевого полупроводника создают преимущественную электронную проводимость:

Варианты ответов: а) B, Ga, As ; б) In, P, Sb ; в) P, Sb, As ; г) B, In, Ga .

5. В полупроводнике сила тока, создаваемого электронами – $I_э$, и сила тока, создаваемого дырками – $I_д$. Если полупроводник обладает собственной проводимостью, то, какое соотношение токов будет верным?

Варианты ответов: а) $I_э = I_д$; б) $I_э > I_д$; в) $I_э < I_д$.

6. Определите, какая из представленных на рисунке 1.4 диаграмм соответствует проводникам, полупроводникам и диэлектрикам?

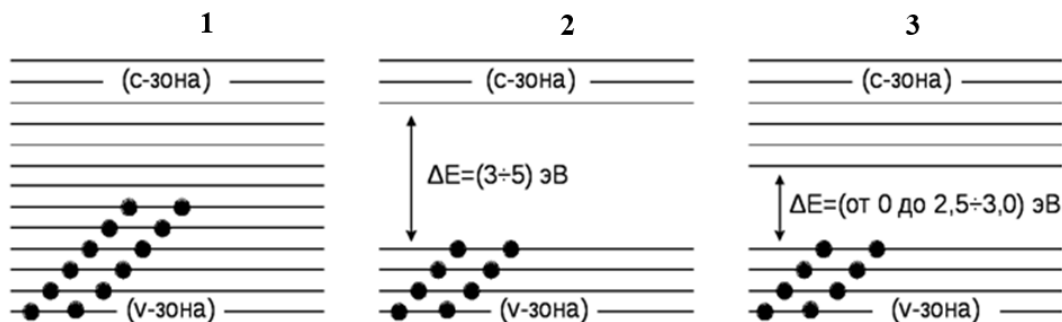


Рис.1.4

Варианты ответов: а) 1–проводник, 2–диэлектрик, 3–полупроводник;

б) 1–полупроводник, 2–проводник, 3– диэлектрик;

в) 1– диэлектрик, 2–проводник, 3–полупроводник;

г) 1– проводник, 2–диэлектрик, 3– проводник;

д) 1– полупроводник, 2– диэлектрик, 3– диэлектрик.

7. Определите, какая из представленных на рисунке 1.5 диаграмм соответствует собственной, донорной и акцепторной проводимостям?

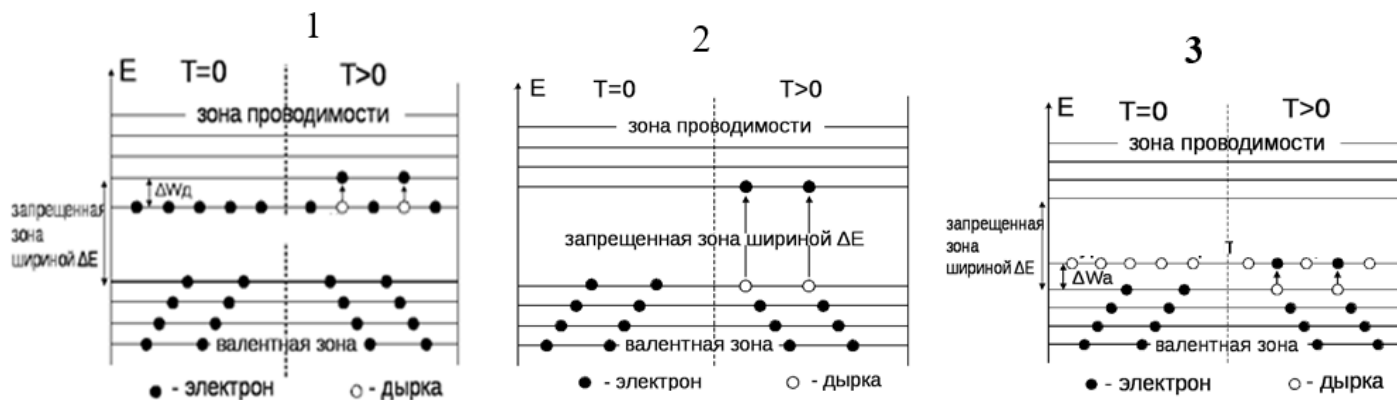


Рис. 1.5

- Варианты ответов:** а) 1–донорная, 2– собственная, 3–акцепторная.
 б) 1–собственная; 2–акцепторная, 3 – донорная;
 в) 1– акцепторная, 2 – собственная, 3 – донорная;
 г) 1–донорная, 2– акцепторная, 3– собственная;
 д) 1– собственная, 2– донорная, 3–донорная.

8. Выберите правильное графическое представление зависимости удельного сопротивления ρ металлов от температуры T (рисунок 1.6).

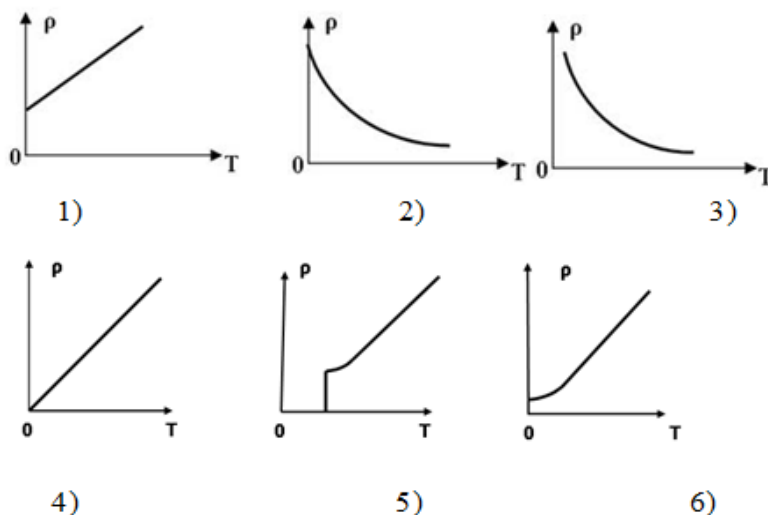


Рис. 1.6

Варианты ответов: а) 5; б) 2; в) 3; г) 4; д) 1; е) 6.

9. Выберите правильное графическое представление зависимости удельного сопротивления ρ полупроводников от температуры T (рисунок 1.6).

Варианты ответов: а) 5; б) 2; в) 3; г) 4; д) 1; е) 6.

10. В полупроводнике с донорной примесью локальный примесный уровень энергии электронов расположен:

- Варианты ответов:** а) в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости;
 б) в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны;
 в) в валентной зоне;
 г) в середине запрещенной зоны;
 д) в зоне проводимости.

11. В полупроводнике с акцепторной примесью локальный примесный уровень энергии электронов расположен:

Варианты ответов: а) в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости;
 б) в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны;
 в) в валентной зоне;
 г) в середине запрещенной зоны; д) в зоне проводимости.

12. Проводник в сверхпроводящем состоянии является:

Варианты ответов: а) парамагнетиком;
 б) ферромагнетиком;
 в) диамагнетик.

2. ВЕЩЕСТВО В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Основными электрическими свойствами материальных тел, проявляющимися при их взаимодействии с электрическим полем являются электрическая проводимость и поляризуемость. Оба свойства определяются наличием или отсутствием в материале свободных носителей электрических зарядов - электронов или ионов, что в свою очередь обусловлено строением электронных оболочек атомов вещества, объединенных в молекулы и кристаллы.

2.1. Проводники в электрическом поле [1, 2, 5]

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение: положительные - в направлении вектора напряженности \vec{E} , отрицательные - в противоположную сторону (рисунок 2.1). У концов проводника будут накапливаться заряды противоположного знака, называемые индуцированными зарядами.

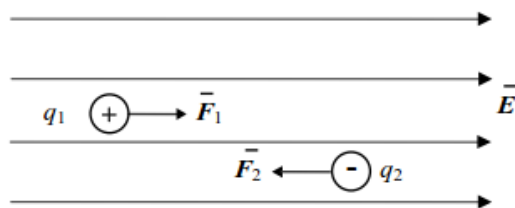


Рис. 2.1. Движение электрических зарядов в проводнике в электрическом поле

Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю, поэтому накопление зарядов у концов проводника будет приводить к ослаблению поля в нем. Это будет продолжаться до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором [электрическое поле внутри проводника](#) обращается в нуль. Это явление используется для создания [электростатической защиты](#). В самом деле, если бы внутри проводника имелось поле, то оно вызвало бы упорядоченное движение зарядов без затраты энергии от внешнего источника, что противоречит закону сохранения энергии. Значит, внутри проводника напряженность

поля равна нулю: $\vec{E} = 0$. Отсутствие поля внутри проводника означает, что потенциал во всех точках внутри проводника постоянен (рисунок 2.2), а поверхность проводника в электрическом поле является эквипотенциальной. Значит, и напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности ($\vec{E} = \vec{E}_n$) т. к. линии напряженности ортогональны эквипотенциальным поверхностям.

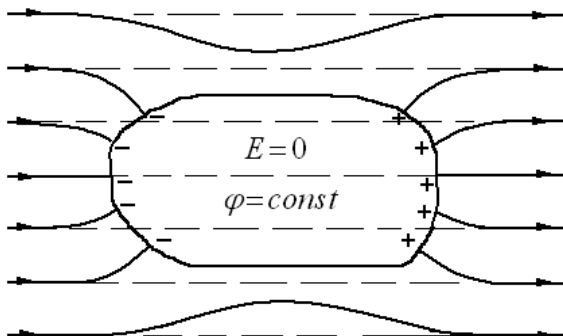


Рис. 2.2. Проводник в электростатическом поле

Сильное электростатическое поле может быть использовано для очистки воздуха от дыма.

2.2. Электрическая ёмкость. Конденсаторы [1, 2, 5]

Если проводнику сообщить избыточный электрический заряд, то этот заряд распределится по поверхности проводника. Действительно, если внутри проводника выделить произвольную замкнутую поверхность S , то поток вектора напряженности электрического поля через эту поверхность должен быть равен нулю. В противном случае внутри проводника будет существовать электрическое поле, что приведет к перемещению зарядов. Следовательно, согласно теореме Гаусса для электростатического поля в вакууме, для выполнения условия $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = 0$ суммарный электрический заряд внутри этой произвольной замкнутой поверхности должен равняться нулю. Таким образом, во всех точках внутри проводника напряженность поля $\vec{E} = 0$, т. е. весь объем проводника эквипотенциален.

При статическом распределении зарядов по проводнику вектор напряженности \vec{E} на его поверхности должен быть направлен по нормали к поверхности ($\vec{E} = \vec{E}_n$), в противном случае под действием касательной к поверхности проводника компоненты напряженности заряды должны были бы перемещаться по проводнику. Поверхность проводника также эквипотенциальна, так как для любой точки поверхности

$$E_\tau = -\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = 0.$$

(2.1)

Напряженность электрического поля вблизи поверхности заряженного проводника можно определить, используя теорему Гаусса. Для этого выделим на поверхности

проводника малую произвольную площадку dS и, считая ее за основание, построим на ней цилиндр с образующей dl (рисунок 2.3). На поверхности проводника вектор \vec{E} направлен по нормали к этой поверхности.

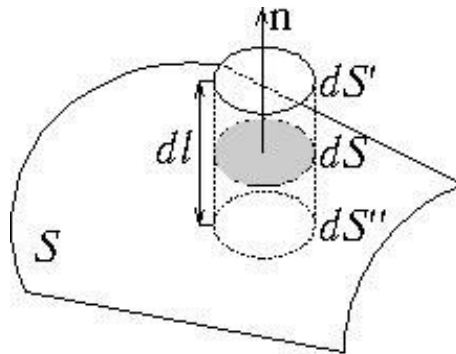


Рис. 2.3. Участок поверхности заряженного проводника [5]

Поэтому поток вектора \vec{E} через боковую поверхность цилиндра из-за малости dl равен нулю. Следовательно, поток вектора \vec{E} через всю поверхность цилиндра равен потоку через его верхнее основание dS' :

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \int_{dS'} E_n dS', \quad (2.2)$$

где E_n - проекция вектора напряженности электрического поля на внешнюю нормаль \vec{n} к площадке dS' .

Внутри цилиндра находится заряд $dq = \sigma dS$, где σ - поверхностная плотность зарядов. По теореме Гаусса $E_n dS = \sigma dS / \epsilon \epsilon_0$ и, следовательно,

$$E_n = \sigma / \epsilon \epsilon_0. \quad (2.3)$$

Рассмотрим уединенный проводник, т. е. проводник, находящийся в однородной изотропной среде вдали от других проводников и заряженных тел. Как было показано, при сообщении такому проводнику избыточного заряда q последний распределяется по поверхности проводника с поверхностной плотностью σ , которая зависит от размеров и формы проводника. Выделим на поверхности проводника малый элемент площади dS , полагая, что заряд этого элемента $dq = \sigma dS$ является точечным. В другой точке поверхности этого же проводника, отстоящей от элемента dS на расстояние r , этот заряд создает электрическое поле, потенциал которого равен:

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dS}{\epsilon r}. \quad (2.4)$$

Здесь ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится проводник. Интегрируя это выражение по всей поверхности проводника S , найдем потенциал, создаваемый в рассматриваемой точке всем проводником:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma dS}{\epsilon r}. \quad (2.5)$$

Будем считать, что $\sigma = k \cdot q$, где k - некоторая функция координат выбранного элемента поверхности dS . Тогда выражение для потенциала проводника примет вид:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon} \oint_S \frac{kdS}{r}. \quad (2.6)$$

В полученном выражении интеграл $\oint_S \frac{kdS}{r}$ зависит от размеров и формы поверхности проводника, а также от расположения точки, для которой определяется потенциал, но не зависит от величины заряда, сообщенного проводнику. Таким образом, потенциал уединенного проводника прямо пропорционален его заряду и отношение заряда q к потенциалу φ для данного проводника есть величина постоянная. Это [отношение называется электрической емкостью проводника](#).

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon}{\oint_S \frac{kdS}{r}}. \quad (2.7)$$

Емкость проводника зависит от геометрических размеров, формы проводника, а также от диэлектрических свойств среды. Если вблизи проводника есть другие проводящие незаряженные тела, то при сообщении проводнику некоторого электрического заряда его потенциал будет меньше, чем потенциал уединенного проводника таких же формы и размеров. Это обусловлено тем, что на поверхностях тел, обращенных к заряженному проводнику, будут индуцироваться электрические заряды противоположного знака. Пусть, например, на некотором расстоянии от заряженной сферы радиуса R расположен незаряженный металлический стержень (рисунок 2.4) так, что его ближний конец находится на расстоянии r от центра шара, а дальний - на расстоянии $(r + l)$.

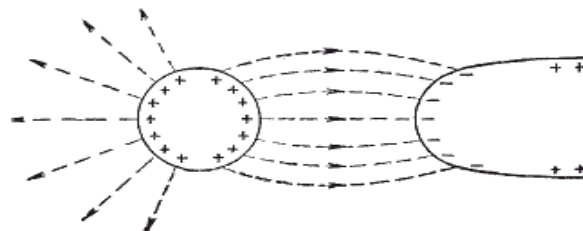


Рис. 2.4. Участок металлического стержня в электрическом поле заряженной сферы [5]

Если сфере сообщить положительный электрический заряд Q , то создаваемое сферой поле будет индуцировать на ближнем конце стержня заряд $-q$, а на дальнем заряд $+q$. Потенциал сферы при этом будет равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{R} - \frac{q}{r} + \frac{q}{r+l} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{R} - \frac{ql}{r(r+l)} \right) < \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}. \quad (2.8)$$

Следовательно, емкость проводника возрастает, если недалеко от него находятся другие проводящие тела. В этом случае принято говорить о взаимной емкости проводников.

Наибольший интерес представляет взаимная емкость системы из двух проводников с равными по величине и противоположными по знаку электрическими зарядами: $|+q| = |-q| = q$. Их взаимная электрическая емкость определяется как отношение заряда к разности потенциалов

$C = q/(\varphi_1 - \varphi_2)$, где $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов между проводниками. Чтобы взаимная емкость проводников не зависела от окружающих тел, нужно, чтобы электрическое поле, созданное зарядами проводников, было сосредоточено только между проводниками. Это достигается тем, что проводникам придают форму либо двух близко расположенных параллельных пластин, либо двух coaxialных цилиндров, либо концентрических сфер и сообщают им равные по абсолютной величине и противоположные по знаку заряды. Такая система проводников называется конденсатором. Проводники, образующие конденсатор, называются обкладками. Абсолютную величину заряда одной из обкладок называют зарядом конденсатора. Емкостью конденсатора называется физическая величина численно равная отношению заряда конденсатора к абсолютной величине разности потенциалов между его обкладками:

$$C = q/U, \text{ где } U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Емкость конденсатора зависит от его формы, размеров, взаимного расположения обкладок, диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика между обкладками (таблица 2.1).

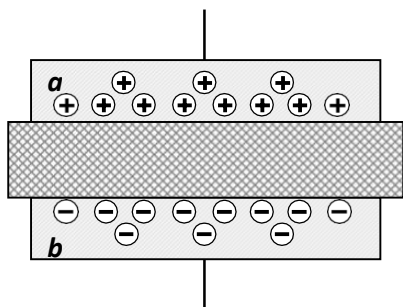


Рис. 2.5. Электрический конденсатор:
 a, b – проводники; c – диэлектрик [5]

В качестве примера рассмотрим плоский конденсатор, который образуется двумя плоскими проводниками (обкладками), разделенными диэлектриком (рисунок 2.5). Проводники заряжают равными и противоположными по знаку зарядами $\pm q$. Вследствие взаимного притяжения разноименных зарядов поверхностная плотность зарядов будет выше на обращенных друг к другу частях поверхностей проводников, чем на других частях. Между проводниками будет существовать разность потенциалов $U = \varphi_a - \varphi_b$. Основной характеристикой конденсаторов является величина электрической ёмкости:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (2.9)$$

Физический смысл ёмкости конденсатора может быть проиллюстрирован следующим примером. Предположим, что заряд ёмкости осуществляется от источника постоянного напряжения U . Значение накапливаемого при этом электрического заряда пропорционально ёмкости конденсатора: $q = C \cdot U$.

Таким образом, чем больше ёмкость конденсатора, тем больший заряд можно в нем накопить от одного и того же источника. Другими словами, чем больше ёмкость конденсатора, тем меньшую работу требуется затратить для заряда конденсатора до фиксированного значения.

Зависимости электроёмкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его электродов широко используются в технике для конструирования преобразователей (датчиков) при измерении ряда механических величин. Например, угловое перемещение объекта α может зафиксировано по измерению площади перекрытия пластин конденсатора, механически связанного с объектом

(рисунок 2.6, а). Изменение емкости можно зафиксировать различными способами (например, измеряя импеданс конденсатора), но в любом случае конденсатор необходимо включить в электрическую цепь.

Таблица 2.1

Ёмкость конденсаторов простейшей формы [5]

Тип конденсатора	Конструктивные особенности	Функция преобразования
Плоскопараллельный с однослойным диэлектриком		$C = \frac{\varepsilon S}{\delta},$ где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь перекрытия пластин; δ – расстояние между пластинами
Плоскопараллельный с многослойным диэлектриком		$C = \frac{S}{\delta_1 / \varepsilon_1 + \delta_2 / \varepsilon_2 + \delta_3 / \varepsilon_3},$ где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – диэлектрические проницаемости отдельных слоев; S – площадь перекрытия пластин; δ – толщина отдельных слоев
Двухпроводная линия		$C = \frac{\pi \varepsilon l}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - r^2}}{r}},$ где ε – диэлектрическая проницаемость среды; l – длина линии; $2a$ – расстояние между проводниками; r – радиус проводников
Коаксиальная линия		$C = \frac{2 \pi \varepsilon l}{\ln \frac{R}{r}},$ где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; l – длина линии; R – внутренний радиус проводящей оболочки; r – радиус центральной жилы

Другой схемой, где выходной параметр датчика — электрическая емкость, является преобразователь, содержащий конденсатор с подвижным диэлектриком (рисунок 2.6, б). Линейное перемещение объекта, тем или иным образом связанного с подвижной диэлектрической пластиной, расположенной между

обкладками конденсатора приводит к изменению ёмкости конденсатора, а значит свидетельствует о перемещении объекта. Как видно из рисунка 2.6, б, ёмкость такого конденсатора преобразователя C_0 определяется как ёмкость двух параллельно включенных конденсаторов.

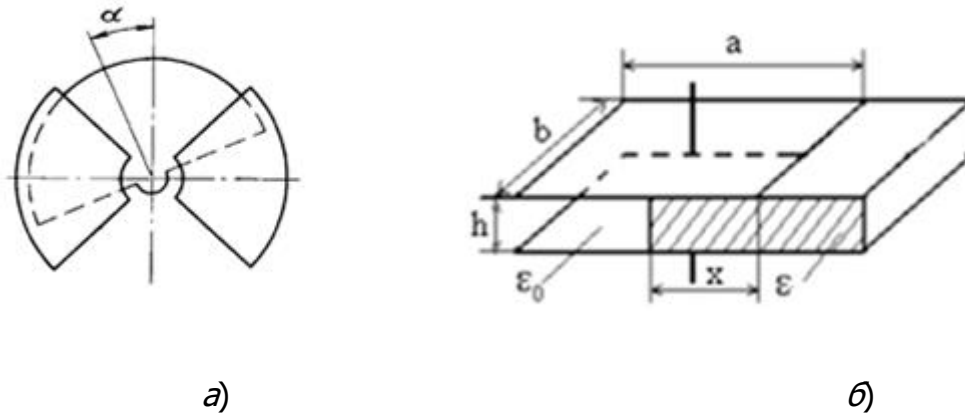


Рис. 2.6. Ёмкостные датчики углового (а) и линейного (б) перемещений

Один из них ёмкостью C_ε образован частью электродов и диэлектрической пластиной, другой ёмкостью C_1 – оставшейся частью электродов с межэлектродным пространством, не заполненным диэлектриком. Если пластинка с относительной диэлектрической проницаемостью ε имеет толщину h , равную расстоянию между электродами, то функция преобразования преобразователя описывается выражением:

$$C_0 = C_1 + C_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 S_1}{h} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_\varepsilon}{h} = \frac{\varepsilon_0}{h} (S_1 + \varepsilon S_\varepsilon) = \frac{\varepsilon_0}{h} [S_0 + (\varepsilon - 1) S_\varepsilon], \quad (2.10)$$

где S_0 – общая площадь электродов; S_ε – часть площади диэлектрической пластины, находящаяся между электродами; $S_1 = S_0 - S_\varepsilon$; $S_\varepsilon = bx$. Таким образом рассматриваемый датчик обладает линейной характеристикой $C_0(x)$, а чувствительность (Φ/M) его постоянна и равна:

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\partial C}{\partial S_\varepsilon} \cdot \frac{\partial S_\varepsilon}{\partial x} = (\varepsilon - 1) \cdot b \cdot \frac{\varepsilon_0}{h}$$

Датчик с диэлектриком может быть реализован в других модификациях. Например, в форме двух концентрических цилиндров или двух стержней, погруженных в жидкость и использован для измерения её уровня в резервуарах.

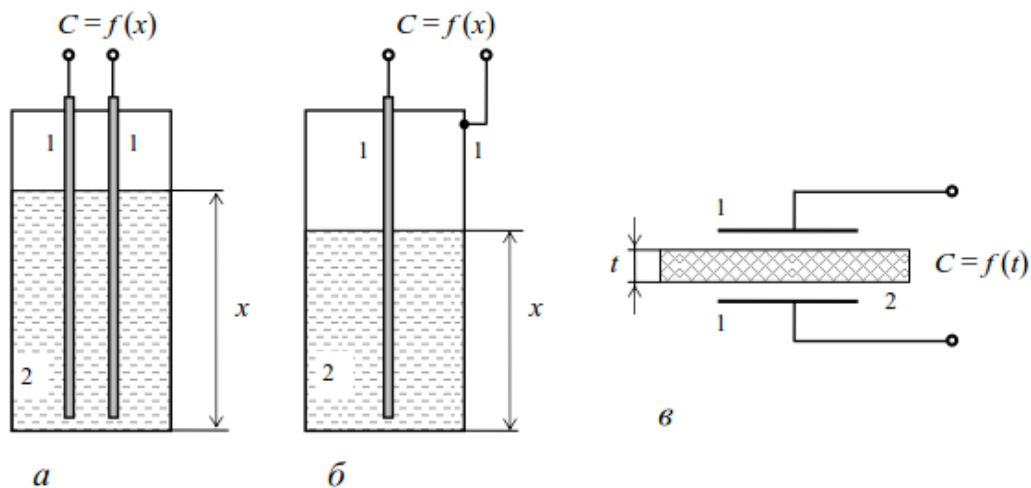


Рис. 2.7. Использование электроёмкостного измерительного преобразования для измерения уровня жидких или сыпучих диэлектрических материалов (*а, б*), измерения толщины листов или лент из диэлектрических материалов (*в*).

Непроводящая жидкость в них играет роль диэлектрика. На рисунке 2.7, *в* показано использование электроёмкостного датчика для измерения толщины листов или лент из диэлектрических материалов.

Ёмкостные датчики находят применение в автоэлектронике для решения разнообразного круга задач – детектирования перемещения, ускорения, наклона, положения, измерения влажности, уровня (Baxter Larry K. Capacitive Sensors: Design and Application. IEEE Press. Dec. 1997.), а также широко применяются в качестве датчиков близости – как зубчатого ротора, так и малых или крупных объектов, например, сканирования препятствий на пути автомобиля (Capacitive proximity sensor for automotive use. US Patent 6 441 623. Опубл. 27.08.2002. АВ Automotive Electronics Ltd.), факта нажатия клавиши (Capacitive proximity sensor. US Patent 6 724 324. Опубл. 20.04.20024. Delphi Technologies, Inc.). Ёмкостная технология использует простые схемы обработки сигнала, при этом регулировка смещения и усиления для большинства типов датчиков не требуется. Производством ёмкостных датчиков автомобильного назначения занимаются известные компании: Analog Devices, Capacitec, Trans-Tek (датчики положения), Texas Instruments (акселерометры, датчики перемещений), Honeywell и Viasala (датчики влажности). На рисунках 2.8 и 2.9 приведены примеры конструкций ёмкостных датчиков, используемых в указанных выше применениях.

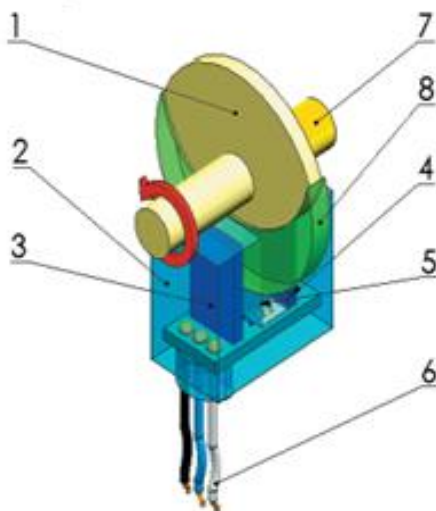


Рис. 2.8. Угловой ёмкостный датчик абсолютного положения – прерыватель (https://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006_4_1):

1 – ротор с материалом, изменяющим ёмкостную связь (из металла или диэлектрика); 2 – корпус датчика; 3, 4 – обкладки плоского конденсатора; 5 – схема питания и обработки сигнала; 6 – выводы; 7 – вращающийся вал; 8 – материал, изменяющий ёмкостную связь

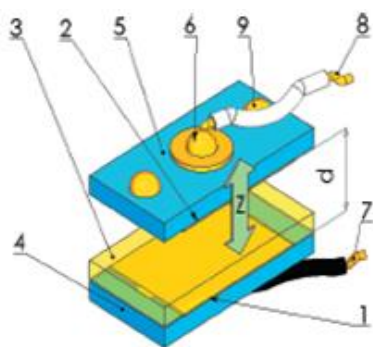


Рис. 2.9. Линейный ёмкостный датчик расстояния d в направлении оси Z (https://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006_4_1):

1 – фиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 – подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 – фиксированный защитный слой диэлектрика; 4 – печатная плата; 5 – изолирующий материал; 6 – пайка обкладки и выводов; 7, 8 – выводы конденсатора; 9 – пайка обкладки.

2.3. Диэлектрики в электрическом поле [1, 2, 7]

2.3.1. Типы диэлектриков и механизмы поляризации

Так как в диэлектриках нет свободных зарядов, то их электрические свойства определяются связанными зарядами.

В зависимости от агрегатного состояния и структуры диэлектриков различают следующие два основных вида поляризации: упругую (электронную, дипольную, ионную) и неупругую (дипольно-релаксационную, ионно-релаксационную, миграционную).

Упругие поляризации не связаны с тепловым движением молекул. К ней относятся следующие виды поляризации:

- а) поляризация упругого электронного смещения;
- б) дипольно-упругая поляризация;
- в) поляризация ионного упругого смещения;

Характерным для этих видов поляризации является то, что заряженные частицы под действием поля смещаются на очень малые расстояния в пределах действия упругих сил, связывающих эти частицы с другими.

Электронная упругая поляризация характерна для неполярных диэлектриков и обусловлена смещением в электрическом поле электронных оболочек атомов относительно их ядер. неполярными называются такие диэлектрики, в молекулах которых «центры симметрии» разноименных зарядов совпадают в отсутствие

внешнего электрического поля. Так, одноатомные молекулы газов (He , Ne , Ar и т.п.) и молекулы, состоящие из двух одинаковых атомов, соединенных друг с другом гомеоплярной связью (H_2 , N_2 , Cl_2 и т.п.), неполярны.

Неполярную молекулу (или атом) можно условно представить в виде положительно заряженной центральной области (ядра), симметрично окруженной отрицательно заряженной электронной оболочкой (рис.2.10, а). Молекула электрически нейтральна, так как алгебраическая сумма ее зарядов равна нулю. Во внешнем электрическом поле центры симметрии положительных и отрицательных зарядов смещаются относительно друг друга (рис.2.10, б). Молекула становится подобной электрическому диполю с плечом l , равным расстоянию между центрами симметрии положительных и отрицательных зарядов, и, следовательно, приобретает дипольный момент \vec{p}_e , называемый индуцированным (наведенным): $\vec{p}_e = q\vec{l}$.

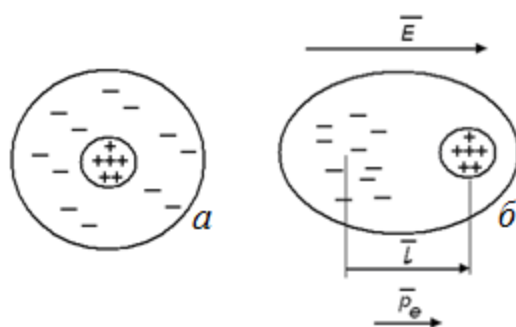


Рис.2.10. Неполярная молекула: а) $E=0$; б) $E \neq 0$.

Такие диполи расположатся «цепочками» вдоль силовых линий поля так, как показано на рисунке 1.4. В результате на боковых гранях диэлектрика, перпендикулярных \vec{E} появляются разноименные заряды, а сам диэлектрик приобретает результирующий электрический момент. Это явление называется поляризацией диэлектрика. В случае неполярного диэлектрика ее называют электронной упругой или деформационной. Электронная поляризация устанавливается очень быстро (за время $\sim 10^{-15}$ с) и также быстро исчезает при снятии поля.

Электрический диполь - система двух одинаковых по величине точечных или распределенных зарядов q , удаленных друг от друга на расстояние l , называемое плечом электрического диполя, (рис. 2.11).

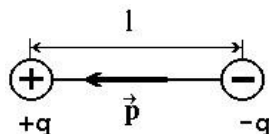


Рис.2.11. Электрический диполь.

Электрический диполь характеризуется дипольным моментом \vec{p} , модуль которого $p = q \cdot l$, направленным как на рис.2.11).

В полярных диэлектриках (H_2O , NH_3 , SO_2 , CO , ...) заряженные частицы, входящие в состав молекул, разделены в пространстве, но связаны между собой электрическими силами. В полярных молекулах центры симметрии положительных и отрицательных

зарядов не совпадают. Таким образом, эти молекулы в отсутствие внешнего электрического поля будут представлять собой электрические диполи с дипольным моментом \vec{p}_0 . Под влиянием электрического поля диполи молекул начинают ориентироваться вдоль его силовых линий (рисунок 2.12) и у диэлектрика возникает отличный от нуля результирующий момент.

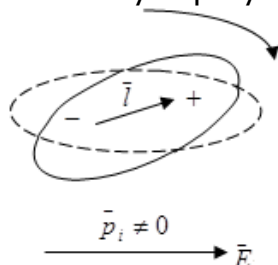


Рис. 2.12. Полярная молекула в электрическом поле

Дипольно-упругая поляризация обычно наблюдается в твердых диэлектриках, в частности, в полярных кристаллах, когда молекулярные диполи более или менее жестко связаны. Вследствие этого исходного упорядочения диполей, в полярном кристалле будет существовать внутреннее электрическое поле. Тогда во внешнем поле из-за упругого отклонения дипольных моментов от равновесной ориентации изменится проекция дипольного момента на направление поля. Это равносильно возникновению дополнительного момента у диэлектрика в направлении поля, т.е. поляризации.

Ионная упругая поляризация наблюдается в ионных кристаллах (*NaCl*, *KCl*, *KBr* и т.п.). Эти кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков. В ионных кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы, а их необходимо рассматривать как систему двух «вдвинутых» одна в другую ионных подрешеток (рис.2.13, а). В электрическом поле подрешетки деформируются. На рис.2.13, б на примере кристаллической решетки *NaCl* показано, как это происходит (на самом деле масштаб упругих перемещений ионов значительно меньше). Поляризация обусловлена упругим смещением разноименных ионов из положения равновесия под действием приложенного электрического поля. При малом смещении иона возникает упругая возвращающая сила, вследствие чего ионы возвращаются в первоначальное положение после окончания действия электрического поля.

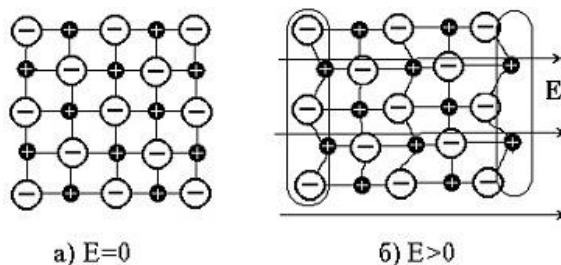


Рис. 2.13. Ионный кристалл без поля (а) и помещённый в электрическое поле (б).

Поляризация сопровождается появлением на противоположных гранях твердотельного диэлектрика тонких (моноатомного размера) заряженных слоев (на рисунке 2.13, б они выделены). Эти заряды являются поляризационными (в целом тело остается электронейтральным). Время установления ионной поляризации составляет 10^{-14} - 10^{-15} с.

В полярных газах и жидкостях взаимодействие молекул не так значительно и дипольные моменты полярных молекул разориентированы за счет теплового движения, поэтому результирующая поляризация при отсутствии внешнего поля равна нулю. Под действием внешнего поля устанавливается некоторая преимущественная ориентация диполей в направлении поля. Поскольку степень ориентации диполей в этом случае сильно зависит от теплового движения молекул, механизм поляризации получил название тепловой дипольной поляризации или дипольно-релаксационной (рисунок 2.14).

При снятии внешнего поля поляризация диэлектрика исчезает, так как тепловое движение разрушает ориентацию диполей. Время установления и разрушения поляризации 10^{-10} с и более.

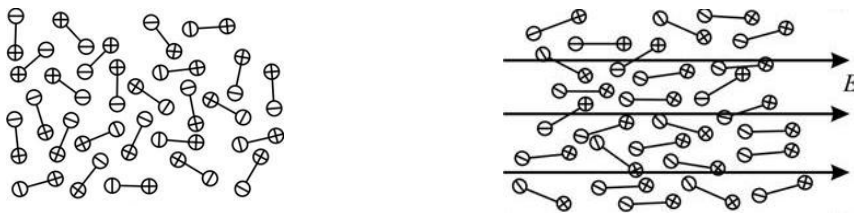


Рисунок 2.14. Расположение дипольных молекул в отсутствие электрического поля (а) и при его воздействии на диэлектрик (б)

С увеличением температуры взаимодействие между диполями ослабляется, что усиливает дипольно-релаксационную поляризацию. Но в то же время возрастает энергия хаотического теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние внешнего электрического поля. Поэтому с ростом температуры, пока ослабление сил межмолекулярного взаимодействия преобладает над возрастанием интенсивности хаотического теплового движения молекул, величина дипольно-релаксационной поляризации растет, а затем, когда преобладает интенсивность теплового движения молекул (тепловая энергия «разбрасывает» диполи), поляризация уменьшается (рисунок 2.15, а).

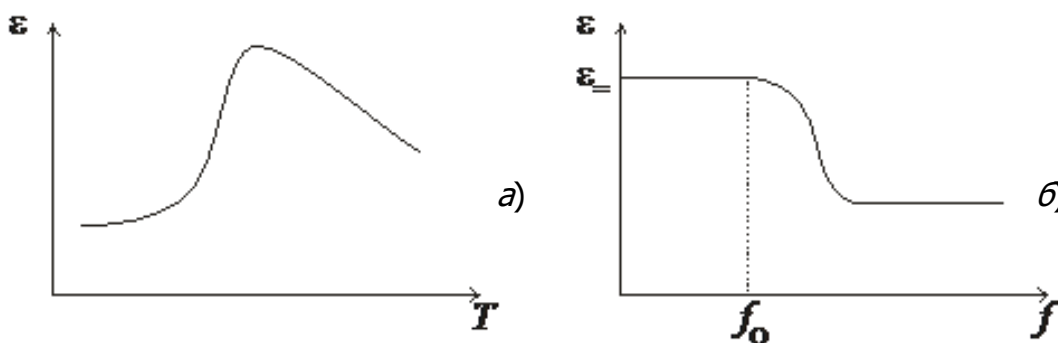


Рис 2.15. Зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика от температуры (а) и частоты (б).

Значительное влияние на дипольно-релаксационную поляризацию имеет частота электрического поля (рисунок. 2.15, б). Пока частота мала диполи успевают следовать за полем и диэлектрическая проницаемость близка к значению, измеренному при постоянном напряжении (ϵ). Когда же частота становится такой большой, что диполи уже не успевают следовать за изменением поля

($f > f_0$), диэлектрическая проницаемость уменьшается, стремясь к значению, обусловленному электронной поляризацией.

Дипольно-релаксационная поляризация проявляется, главным образом, в полярных газах и жидкостях. В твердых, в большинстве своем органических, диэлектриках дипольно-релаксационная поляризация обычно обусловлена не ориентацией самих молекул, а ориентацией имеющихся в них полярных радикалов. Такую поляризацию называют дипольно-радикальной.

Ионно-релаксационная поляризация. Наблюдается в ионных диэлектриках с аморфной структурой (стекла, керамики и т. д.), а также в неорганических кристаллических диэлектриках рыхлого строения (с неплотной упаковкой ионов). Она заключается в смещениях слабосвязанных ионов под действием внешнего электрического поля. Этот вид поляризации связан с потерями энергии. Поляризация заметно усиливается с повышением температуры (рисунок 2.16, а) за счет ослабления сил межйонного взаимодействия и роста числа ионов, перемещаемых в новые положения. При увеличении частоты, величина ϵ снижается за счет инерционности процесса переориентации (рисунок 2.16, б).

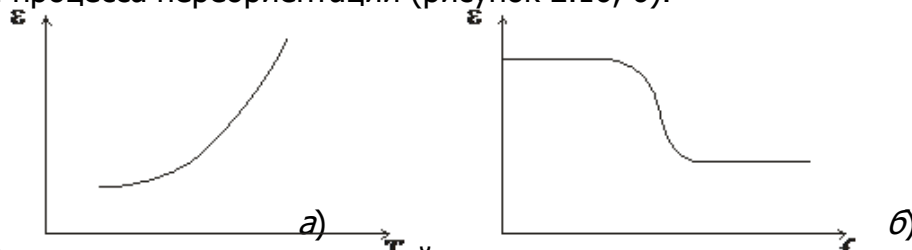


Рис 2.16. Зависимость диэлектрической проницаемости ионного диэлектрика от температуры (а) и частоты (б)

Миграционная поляризация протекает в твердых диэлектриках неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях или наличии примесей за время порядка 10^2 с и более. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в сложных диэлектриках, наличие слоев с различной диэлектрической проницаемостью и проводимостью и т.д. При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, образуя большие поляризованные области (рисунок 2.17). В слоистых материалах на границах раздела слоев и в приэлектродных слоях происходит накопление зарядов медленно движущихся ионов – это тоже эффект межслоевой поляризации.

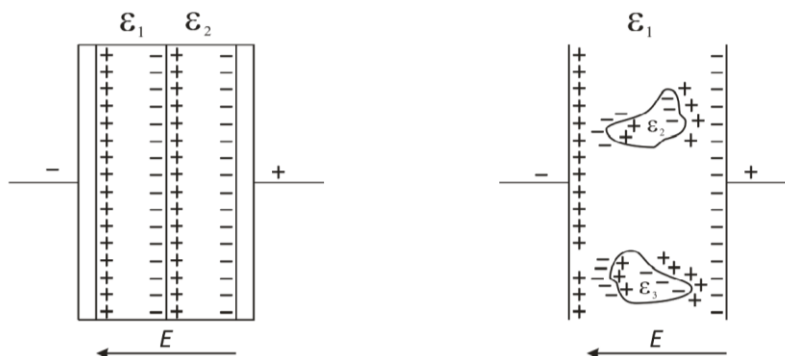


Рис. 2.17. Образование поляризационных зарядов в неоднородных диэлектриках

Отметим, что индуцированный под действием приложенного электрического поля суммарный связанный электрический заряд обуславливается суммой различных видов поляризации, которые могут наблюдаться одновременно у одного и того же диэлектрика.

2.3.2. Поляризованность и диэлектрическая восприимчивость

Количественной мерой поляризации диэлектрика является физическая величина \vec{P} , называемая поляризованностью (вектором поляризации, интенсивностью поляризации). Поляризованность выражает электрический дипольный момент единицы объема диэлектрика и определяется формулой

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{i=1}^N \vec{p}_i, \quad (2.11)$$

где \vec{p}_i – электрический дипольный момент i -й молекулы, N – число молекул в объеме ΔV . Предполагается, что объём ΔV достаточно мал и при этом $N \gg 1$.

В случае однородного диэлектрика величина наведённого электрического дипольного момента p у всех молекул одинакова и тогда

$$\vec{P} = n\vec{p}, \quad (2.12)$$

где n – число молекул в единице объема или концентрация молекул в диэлектрике. Если неполярную молекулу поместить во внешнее электрическое поле, то приобретаемый ею дипольный момент

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E}_л \quad (2.13)$$

где α — поляризуемость молекулы. Величина $\vec{E}_л$ – локальное электрическое поле, действующее на данную молекулу.

С учётом (2.12) получим формулу для поляризованности неполярного диэлектрика в виде:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 n \alpha \vec{E}_л \quad (2.14)$$

Концентрация n молекул и их поляризуемость α определяются природой диэлектрика. Произведение концентрации n молекул и поляризуемости α молекулы дает новую безразмерную физическую величину χ , называемую диэлектрической восприимчивостью диэлектрика

$$\chi = n\alpha \quad (2.15)$$

Она связана с другой макроскопической характеристикой диэлектрика — диэлектрической проницаемостью ε соотношением:

$$\chi = \varepsilon - 1$$

С учетом новой величины χ формула (2.14) для поляризованности неполярного диэлектрика примет следующий вид

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}_л. \quad (2.16)$$

В теории диэлектриков показано, что локальное поле, действующее на заряженную частицу в диэлектрике, будет определяться выражением:

$$\vec{E}_л = \vec{E} + \frac{(\varepsilon - 1)\vec{E}}{3} = \frac{\varepsilon + 2}{3} \vec{E}. \quad (2.17)$$

Из этого выражения следует, что поскольку $\varepsilon \geq 1$, локальное поле всегда будет больше или равно среднего макроскопического поля E в диэлектрике, причем это

отличие будет существенным только для диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью.

Во внешнем электрическом поле полярная молекула, также как и неполярная, приобретает дополнительный дипольный момент, связанный с электронной поляризацией. Таким образом для полярных диэлектриков величина поляризуемости $\alpha = \alpha_e + \alpha_d$. Дипольно-релаксационная поляризуемость может быть определена по формуле:

$$\alpha_d = p_0^2 / 3\epsilon_0 kT, \quad (2.18)$$

где p_0 — собственный дипольный момент молекулы, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

В общем случае, когда в диэлектрике действует несколько механизмов поляризации одновременно, то его диэлектрическая восприимчивость определяется соотношением:

$$\chi = n(\alpha'_e + \alpha'_d + \alpha'_i + \dots + \alpha''_e + \alpha''_d + \alpha''_i + \dots), \quad (2.19)$$

где α_e — электронная поляризованность, α_d — дипольная поляризованность, α_i — ионная поляризованность. Индексы (') относятся к упругим механизмам поляризации, а индексы (") — к неупругим (релаксационным) механизмам.

Релаксационная поляризованность при дипольно-релаксационной поляризации после приложения поля к диэлектрику нарастает во времени до установления значения P_0 согласно выражению

$$P = P_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (2.20)$$

где $P(t)$ — поляризованность в момент времени t .

После снятия внешнего поля поляризованность уменьшается со временем по закону

$$P = P_0 \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]. \quad (2.21)$$

В этих выражениях τ — постоянная времени процесса, называется временем релаксации. Она равна времени, за которое поляризация уменьшается в "е" раз, т. е. приблизительно в 2,7 раза (е-основание натуральных логарифмов)

Время релаксации зависит от свойств диэлектрика и, в частности, от плотности вещества или вязкости полярной жидкости.

По мере увеличения частоты внешнего поля дипольные молекулы могут не успевать ориентироваться за его изменением. В этом случае величины поляризованности и диэлектрической проницаемости снижаются до уровня упругой электронной поляризации. Этому случаю соответствует определенная граничная частота $f_0 = \omega_0/2\pi$, которую можно найти из условия $\omega_0 T = 1$.

При повышении температуры плотность и вязкость диэлектрика снижаются и время релаксации уменьшается:

$$\tau = \tau_0 \exp(Wp / kT) \quad (2.22)$$

где τ_0 — период теплового колебания молекулы; Wp — энергия активации процесса релаксации. Таким образом с повышением частоты максимум в температурной зависимости будет смещаться в область высоких температур, так как большая частота требует меньшего времени релаксации, а меньшее время релаксации может быть получено при более высокой температуре.

С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают и это усиливает поляризацию, а, с другой стороны, постепенно начинает нарастать тепловое

хаотическое движение, которое разрушает поляризацию. В результате на температурной зависимости ε наблюдается максимум, когда время релаксации будет равно полупериоду действующего поля: $\tau = 1/2f_m$, где f_m — частота электрического поля, Гц.

2.3.3. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. Потери энергии в диэлектриках наблюдаются не только при постоянном напряжении, вследствие протекания тока сквозной проводимости, но и при переменном в результате образования активных составляющих поляризационных токов. Диэлектрические потери характеризуют мощностью, рассеиваемой в единице объема диэлектрика, а также тангенсом угла диэлектрических потерь.

Углом диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика без потерь вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция $\operatorname{tg} \delta$.

Для количественного описания процессов поляризации и потерь энергии в диэлектрике, необходимо измерить ряд параметров конденсатора с этим материалом в цепи переменного напряжения, а для проведения необходимых расчётов в этом случае используют эквивалентные схемы замещения, в которых к идеальному конденсатору подключают резистор либо параллельно, либо последовательно. Эти схемы замещения должны быть выбраны так, чтобы выделяющаяся в них активная мощность была равна мощности, которая рассеивается в конденсаторе с исследуемым диэлектриком, а ток опережал бы напряжение на тот же самый фазовый угол.

Последовательная и параллельная схемы представлены на рисунке 2.18. Там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $Z_1 = Z_2 = Z$ равны их активные (r и R) и реактивные (C_s и C_p) составляющие. Это условие будет соблюдаться, если углы сдвига тока относительно напряжения равны и значения активной мощности одинаковы.

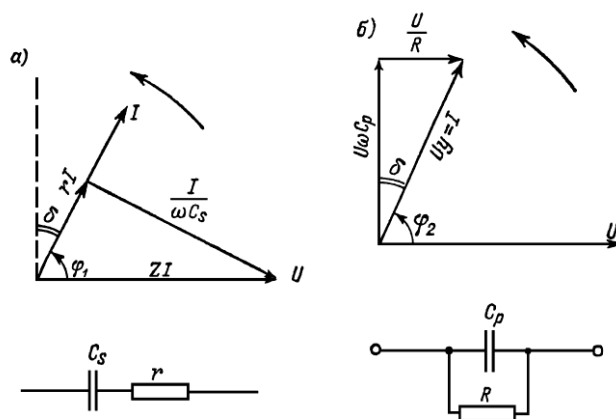


Рис. 2.18 Векторные диаграммы и эквивалентные схемы диэлектрика с потерями: *а* - последовательная, *б* - параллельная

Выразим мощности потерь для последовательной и параллельной схем через емкости C_s (последовательно включенная емкость) и C_p (параллельно включенная емкость) и угол δ .

Для последовательной схемы имеем

$$W = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \delta = \omega C_s r.$$

Для параллельной схемы имеем

$$W = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta, \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R}.$$

Приравнивая полученные выражения для мощностей и $\operatorname{tg} \delta$, находим соотношения между емкостями и сопротивлениями для двух схем замещения:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right). \quad (2.22)$$

Для хороших диэлектриков можно пренебречь значением $\operatorname{tg}^2 \delta$ по сравнению с единицей в формуле (4.6) и считать $C_p = C_s = C$. Выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут одинаковы для обеих схем:

$$W = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (2.23)$$

где U – напряжение, В; ω – угловая частота, с^{-1} ; C – емкость, Ф.

Выражение для удельных диэлектрических потерь, т.е. мощности, рассеиваемой в единице объема диэлектрика, имеет вид:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon f g \delta}{1,8 \cdot 10^{10}} E^2 = \gamma E^2 \quad (2.24)$$

где w – удельные потери, $\text{Вт}/\text{м}^3$; ω – круговая частота, с^{-1} ; E – напряженность электрического поля, В/м, γ – электропроводность диэлектрика.

Определив каким-либо методом при некоторой частоте параметры эквивалентной схемы исследуемого диэлектрика (C_p и R или C_s и r), в общем случае нельзя считать полученные значения емкости и сопротивления присущими данному конденсатору и пользоваться этими данными для расчета угла потерь при другой частоте. Однако такой расчет может быть сделан в том случае, если эквивалентная схема имеет определенное физическое обоснование. Так, если известно для данного диэлектрика, что потери в нем определяются только потерями от сквозной электропроводности в широком диапазоне частот, то угол потерь конденсатора с таким диэлектриком может быть вычислен для любой частоты, лежащей в этом диапазоне, по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C R} \quad (2.25)$$

где C и R – параметры, измеренные при данной частоте.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на три основных вида:

- 1) диэлектрические потери сквозной электропроводности;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные релаксационной поляризацией;
- 3) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Тангенс угла диэлектрических потерь в этом случае может быть вычислен по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \rho}, \quad (2.26)$$

где f – частота поля, Гц;

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты поля, $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается с увеличением частоты по гиперболическому закону.

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону:

$$P_T = A \exp(-b/T), \quad (2.27)$$

где A, b – постоянные, характеризующие диэлектрик.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках с дипольной структурой и в диэлектриках с ионной структурой с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери вызываются нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля. Это приводит к рассеянию энергии и нагреву диэлектрика. Диэлектрические потери этого типа зависят от частоты внешнего поля и температуры.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты для релаксационных поляризаций можно наиболее просто объяснить, рассматривая полярные жидкости, в которых дипольные молекулы могут сравнительно легко поворачиваться друг относительно друга, преодолевая силы вязкого трения. Увеличение $\operatorname{tg} \delta$ происходит до тех пор, пока время релаксации дипольных молекул $\tau \ll 1/2f$.

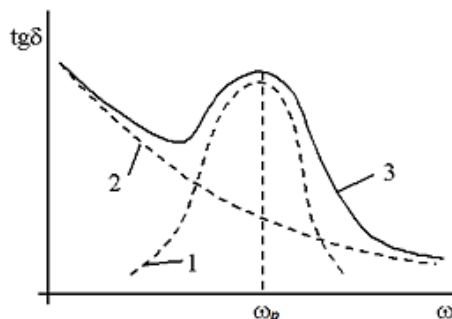


Рис 2.19 Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ релаксационных диэлектриков от частоты

Если пренебречь потерями сквозной проводимости, то на частоте ω_p (рис. 2.19) будет наблюдаться максимум (кривая 1). Условие максимума $\omega_p \cdot \tau = 1$, где τ – время релаксации. Наоборот, когда с ростом частоты диполям не хватает времени для ориентации, т. е. $1/2f \ll \tau$, то $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается. Если в диэлектрике заметны потери сквозной проводимости, то они, в соответствии с выражением $\operatorname{tg} \delta = 1/R\omega C_s$, уменьшаются с ростом частоты (кривая 2). В этом случае суммарная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ (T) имеет вид кривой 3.

Как $\operatorname{tg} \delta$ полярных диэлектриков изменяется с ростом температуры показано на рисунке 2.20 (кривая 3). Если пренебречь потерями сквозной проводимости, то, как и на зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от частоты, на кривой $\operatorname{tg} \delta(T)$ для полярных диэлектриков образуется максимум (рисунок 2.20, кривая 1). Снижение вязкости полярных жидкостей при нагревании способствует более легкой ориентации диполей в электрическом поле, что приводит к росту $\operatorname{tg} \delta$. При дальнейшем

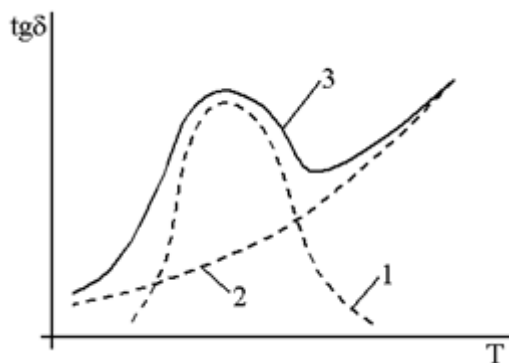


Рис. 2.20. Зависимость $tg \delta$ релаксационных диэлектриков от температуры

увеличении температуры нарастает тепловое хаотическое движение молекул, снижающее степень ориентации диполей, что приводит к уменьшению $tg \delta$ при достаточно высоких температурах. Потери сквозной проводимости при этом растут (кривая 2), и в результате суммируются с релаксационными потерями. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике и т.п.

Диэлектрические потери в газах. Как известно, все газы отличаются весьма малой электропроводностью, и угол диэлектрических потерь в связи с этим будет ничтожно мал, особенно при высоких частотах. Величина тангенса угла диэлектрических потерь может быть вычислена по формуле (2.26). При высоких напряжённостях и неоднородном поле, молекулы газа могут ионизироваться, вследствие чего в газе возникают потери на ионизацию.

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках. В неполярных жидкостях диэлектрические потери обусловлены только электропроводностью, если жидкость не содержит примесей с дипольными молекулами.

Удельная проводимость нейтральных чистых жидкостей, как было указано ранее, чрезвычайно мала, благодаря чему малы и диэлектрические потери.

Полярные жидкости в зависимости от условий (температура, частота) могут обладать заметными потерями, связанными с дипольно-релаксационной поляризацией, помимо потерь, обусловленных электропроводностью.

У жидких диэлектриков с полярными молекулами заметно проявляется зависимость диэлектрических потерь от вязкости. Удельная проводимость таких жидкостей при комнатной температуре составляет от 10^{-10} до 10^{-11} См·м⁻¹. Диэлектрические потери, наблюдаемые в полярных вязких жидкостях при переменном напряжении, значительно превосходят потери, обусловленные электропроводностью. Такие потери называют дипольно-релаксационными потерями.

Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии на трение с выделением тепла. Если вязкость жидкости достаточно велика, молекулы не успевают следовать за изменением поля, и дипольная поляризация практически исчезает, диэлектрические потери при этом будут малы. Дипольные потери будут

также малы, если вязкость жидкости мала и ориентация молекул происходит без трения. При средней вязкости дипольные потери могут быть существенны и при некотором значении вязкости имеют максимум.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках необходимо рассматривать в связи с их структурой. Твердые вещества обладают разнообразным составом и строением, в них возможны все виды диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери в диэлектриках молекулярной структуры зависят от вида молекул. В случае неполярных молекул в веществах, не имеющих примесей, диэлектрические потери ничтожно малы. К таким диэлектрикам относятся сера, парафин, неполярные полимеры (полиэтилен, политетрафторэтилен, полистирол и др.). Указанные вещества в связи с их весьма малыми потерями находят применение в качестве высокочастотных диэлектриков.

Диэлектрики молекулярной структуры с полярными молекулами представляют собой главным образом органические вещества, широко используемые в технике. К ним принадлежат материалы на основе целлюлозы, полярные полимеры, каучуки и ряд других материалов. Все они из-за присущей им дипольно-релаксационной поляризации обладают большими потерями.

Диэлектрические потери твердых веществ ионной структуры связаны с особенностями упаковки ионов в решетке. В веществах кристаллической структуры с плотной упаковкой ионов при отсутствии примесей, искажающих решетку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в таких веществах появляются лишь потери от сквозной электропроводности. Примером соединений такого рода является каменная соль, чистые кристаллы которой обладают ничтожными потерями; малейшие примеси, искажающие решетку, резко (на 2-3 порядка) увеличивают диэлектрические потери.

Главным фактором, определяющим диэлектрические потери в неорганических стеклах, является то или иное сочетание входящих в стекло оксидов. Например, введение тяжелых оксидов уменьшает тангенс угла диэлектрических потерь щелочных стекол.

К твердым веществам с неоднородной структурой, широко используемым в качестве диэлектриков, принадлежат многофазные материалы. К неоднородным диэлектрикам относится, прежде всего, электротехническая керамика. В составе керамики различают кристаллическую фазу, стекловидную и газовую (газы в закрытых порах). Диэлектрические потери в керамике зависят от характера кристаллической и стекловидной фаз и количественного соотношения между ними. Газовая фаза в керамике вызывает повышение диэлектрических потерь при высоких напряженностях поля вследствие развития ионизации.

2.3.4. Сегнетоэлектрики

В некоторых диэлектриках существует спонтанная (самопроизвольная) поляризованность даже в отсутствие внешнего электрического поля. Первоначально эти свойства были обнаружены в кристаллах сегнетовой соли, и поэтому все подобные диэлектрики называли сегнетоэлектриками. Детальное исследование диэлектрических свойств сегнетовой соли, представляющей собой двойную натрий-калиевую соль винной кислоты $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, впервые было проведено в 1930–1934 годах [И. В. Курчатовым](#) и [П. П. Кобеко](#). Ими были установлены все основные свойства сегнетоэлектриков:

1. В то время как у обычных диэлектриков диэлектрическая проницаемость ϵ составляет несколько единиц, или нескольких десятков (например, у воды $\epsilon = 81$),

диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков достигает огромного значения – до 10^4 .

2. При изменениях напряженности поля E поляризованность P оказывается не пропорциональной ей. Следовательно, диэлектрическая проницаемость ϵ ($\epsilon = 1 + \chi$) оказывается зависящей от напряженности поля E .

3. При изменениях напряженности E значения поляризованности P определяются не только значением напряженности поля в данный момент, но и предшествующими состояниями поляризации. Это явление называют диэлектрическим гистерезисом (от греч. «гистерезис» - запаздывание). При циклических изменениях напряженности поля зависимость P от E следует изображенной на рисунке (2.21) кривой, называемой петлей гистерезиса. При первоначальном включении поля поляризованность P растет с напряженностью E в соответствии с ветвью 1 кривой. Уменьшение P происходит по ветви 2. При обращении напряженности E в нуль вещество сохраняет значение поляризованности $P_{ост}$, называемое остаточной поляризованностью. Таким образом, сегнетоэлектрик остается поляризованным в отсутствие внешнего электрического поля. Только под действием противоположно направленного поля напряженности E_c поляризованность становится равной нулю. Это значение напряженности называют коэрцитивной силой (от лат. *coercitio* - удерживание). При дальнейшем изменении напряженности E получается ветвь 3 петли гистерезиса и т. д.

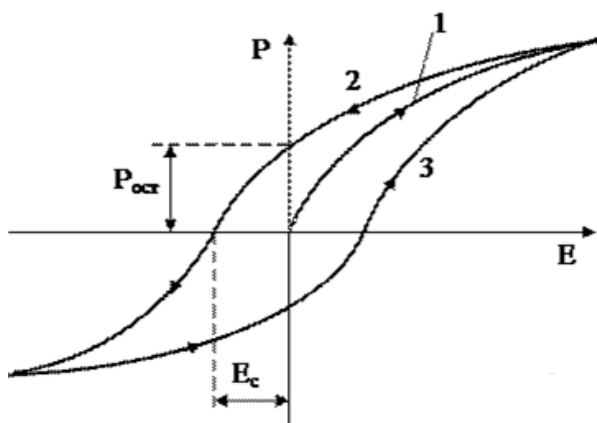


Рис. 2.21. Кривая диэлектрического гистерезиса сегнетоэлектрика

4. Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика имеется температура, при которой вещество утрачивает необычные свойства и превращается в обычный диэлектрик. Эта температура называется точкой **Кюри**. Как правило, сегнетоэлектрики имеют только одну точку Кюри. В некоторых случаях, как, например, для сегнетовой соли, существуют две температуры Кюри ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и сегнетоэлектрические свойства наблюдаются только при температурах, лежащих между обеими точками.

Особые электрические свойства объясняются доменной структурой сегнетоэлектриков, т.е. наличием в них областей спонтанной (самопроизвольной) поляризованности. В пределах каждой области (домена) дипольные моменты параллельны друг другу, однако направления поляризации разных доменов

различны, так что результирующий момент всего кристалла может быть равен нулю. При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой как бы мозаику из доменов – областей с различными направлениями поляризованности, имеющими размеры порядка 10^{-4} до 10^{-1} см. Это схематически показано на рисунке 2.22, где стрелки и знаки \odot , \oplus указывают направление вектора \vec{P} . Так как в смежных доменах эти направления различны, то в целом дипольный момент диэлектрика равен нулю. При внесении сегнетоэлектрика во внешнее поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю, а возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля. Поэтому сегнетоэлектрики имеют аномально большие значения диэлектрической проницаемости (для сегнетовой соли, например, $\epsilon_{\max} \approx 10^4$). Под действием внешнего электрического поля поляризованности отдельных доменов стремятся расположиться вдоль направления внешнего поля, и поляризованность кристалла становится отличной от нуля.

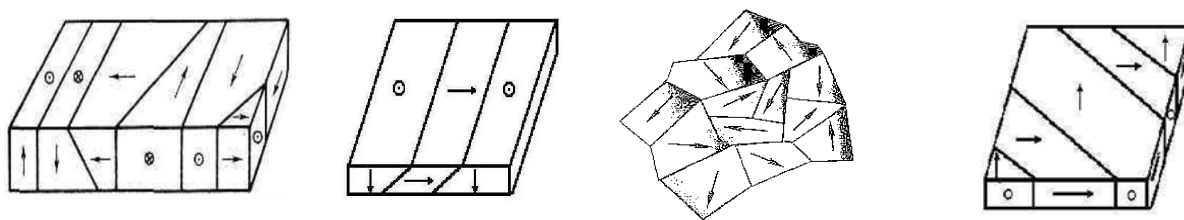


Рис. 2.22. Распределение поляризованной \vec{P} в доменной структуре сегнетоэлектрика

Интенсивному изучению свойств и возможностей применения сегнетоэлектриков послужило открытие академиком [Б. М. Вулом](#) аномальных электрических свойств у титаната бария. Этому способствовали химическая устойчивость и высокая механическая прочность титаната бария при изготовлении в виде керамики, а также сохранение сегнетоэлектрических свойств в сравнительно широком температурном интервале. В настоящее время известно более сотни сегнетоэлектриков в виде керамики и монокристаллов, не считая их твердых растворов.

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать:

- 1) изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью;
- 2) использование материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых электронных устройств;
- 3) использование кристаллов сегнетоэлектриков для модуляции и преобразования лазерного излучения;
- 4) изготовление пьезоэлектрических и пироэлектрических преобразователей;
- 5) использование сегнетоэлементов в счетно-вычислительной технике.

Сегнетоэлектрический кристалл идеально подходит для реализации устройств цифровой (дискретной) памяти. Он имеет два устойчивых состояния и является

очень стабильным во времени. При этом требуется очень мало времени и энергии для изменения его состояния. На этом принципе основано устройство базовых ячеек памяти FRAM (Ferroelectric Random Access Memory), которые создаются размещением сверхтонкой пленки сегнетоэлектрического материала в кристаллическом виде между двумя плоскими металлическими электродами, образующими конденсатор. Этот тип памяти, принцип работы которого основывается на эффекте гистерезиса в сегнетоэлектрике. При приложении к ячейке электрического поля она меняет свою поляризацию, переходя на другой участок петли гистерезиса. За счет этого можно получить два хорошо различимых по энергии состояния, а это достаточно для создания памяти на основе такой ячейки.

Фирма Ramtron International Corporation выпускает обладающий уникальными свойствами ассортимент энергонезависимых FRAM-приборов на основе усовершенствованного сегнетоэлектрического технологического процесса. Номенклатура производимых приборов состоит пока в основном из различных приборов памяти. С переходом в 2003-2004 гг. на новую 0,13 мкм технологию производства становятся реально достижимы объемы FRAM до 16 Мбит и более на одном кристалле.



Подобные приборы уже разрабатываются Ramtron как непосредственная замена FLASH в таких приложениях, как цифровые камеры и сотовые телефоны. Недавно анонсированный прибор FM24C256-SE — 256 Кбит энергонезависимое ОЗУ со стандартным 2-

проводным интерфейсом I2C и pin-to-pin совместимо с промышленным стандартом 24C256 EEPROM. Чтение и запись выполняются со скоростью шины до 1 МГц. FM24C256-SE работает от 5-вольтового источника электропитания и потребляет 200 микроампер в режиме чтения или записи при частоте шины 100 кГц. FM24C256-SE гарантирует 10 лет хранения данных и поставляется в корпусах 8-pin EIAJ SOP для промышленного температурного диапазона от -40 °C до +85 °C.

2.4. Пьезоэлектрический эффект [1, 2, 5]

Сущность прямого пьезоэлектрического эффекта заключается в образовании электрических зарядов на поверхности некоторых диэлектриков под действием механической деформации. Это явление наблюдается в природных кристаллах (например, в кварце SiO_2), в поляризованных керамических материалах (например, в титанате бария $BaTiO_3$) и в некоторых полимерах (например, в поливинилфториде - $[CH_2-CF_2]$). Материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами, называются пьезоэлектриками.

Пьезоэффект является обратимым физическим явлением. Обратный пьезоэффект заключается в возникновении в пьезоэлектриках механического напряжения или деформации под действием электрической поляризации. Физическая природа пьезоэффекта может быть объяснена на примере наиболее известного пьезоэлектрического кристалла — кварца. На рисунке 2.23а показана форма элементарной ячейки кристаллической структуры кварца.

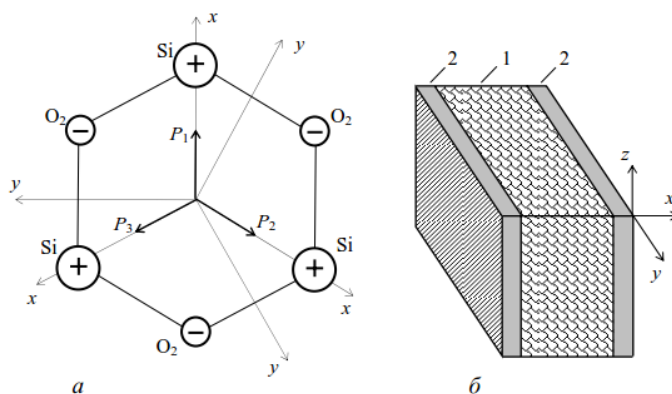


Рис. 2.23. Элементарная ячейка кристаллической структуры кварца (а) и пьезоэлемент на основе кварца (б): 1 – кристалл; 2 – электроды

Ячейка представляет собой три положительных иона кремния Si^+ и три отрицательных иона кислорода O_2^- , расположенных в вершинах правильного шестиугольника. В ячейке можно выделить три направления, проходящие через центр и соединяющие два разноимённых иона. Эти три полярные направления называются электрическими осями или осями Ox . Каждая из пар упомянутых выше разноимённых зарядов образует электрический диполь, характеризуемый соответствующим дипольным моментом $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$. В недеформированном состоянии все дипольные моменты равны по модулю и направлены под углами 120° друг к другу. Сумма всех трех дипольных моментов $\vec{P}_\Sigma = \sum \vec{P}_i$ равна нулю. Поэтому ячейка кварца в недеформированном состоянии является электрически нейтральной.

В элементарной ячейке кварца кроме трех электрических осей Ox выделяют также ортогональные им три механические оси Oy (рис. 2.23, а) и ортогональную осям Ox и Oy оптическую ось Oz . На рис. 2.23, б схематично показана структура пьезоэлектрического преобразователя (пьезоэлемента), представляющего собой кристалл 1 в форме прямоугольного параллелепипеда, грани которого параллельны осям Ox, Oy , и Oz . Противоположные грани кристалла имеют электроды 2 для накопления электрического заряда. В недеформированном состоянии пьезоэлемент в целом, как и образующие его отдельные элементарные ячейки, является электрически нейтральным. Электрические поля всех его положительных и отрицательных ионов уравниваются друг друга проявлением чего является отсутствие зарядов на электродах пьезоэлемента.

Если к пьезоэлементу приложить механическое усилие в направлении оси x , то в результате деформации элементарных ячеек их нейтральность нарушается. При этом, как показано на рис. 2.24, направление вектора суммы дипольных моментов \vec{P}_Σ может, как совпадать по направлению с вектором \vec{P}_1 при деформации сжатия, так и быть ему противоположно при деформации растяжения.

Образование отличной от нуля равнодействующей всех дипольных моментов обуславливает возникновение на электродах пьезоэлемента поляризационных зарядов, имеющих при различных направлениях деформации различные знаки (рис.2.24). Значение поляризационного заряда q связано со значением действующей силы \vec{F} прямо пропорциональной зависимостью:

$$q = d_{ij} F, \quad (2.28)$$

где d_{ij} – коэффициент, называемый пьезоэлектрическим модулем.

Таким образом, при деформации пьезоэлемента по электрической оси Ox поляризационные заряды возникают на тех же гранях, на которые действует сила, вызывающая деформацию. Такой пьезоэффект получил название продольного. Используя описанный выше подход можно показать, что при деформации пьезоэлемента по механической оси Oy , поляризационные заряды возникают на поперечных гранях. Такой пьезоэффект получил название поперечного.

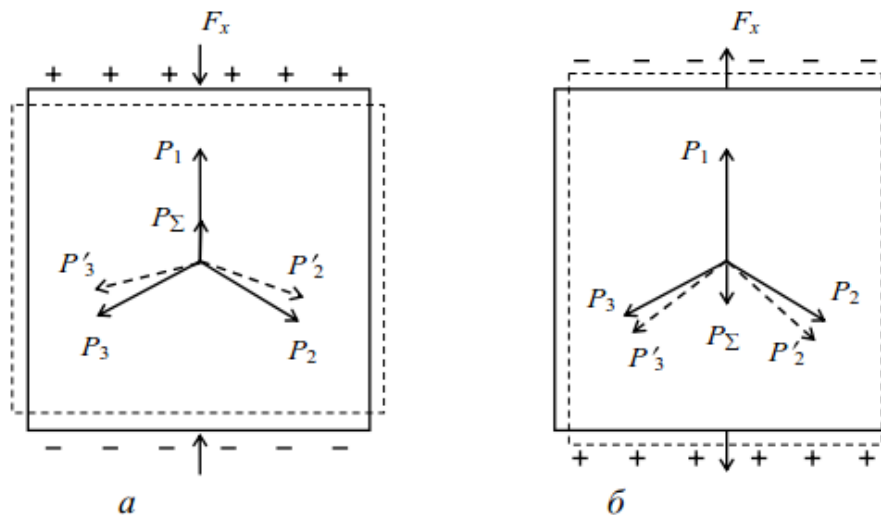


Рис. 2.24. Деформация сжатия (а) и растяжения (б) пьезоэлемента на основе кварца вдоль электрической оси

Поляризационные заряды, несмотря на иное направление действия силы, возникают в этом случае на тех же гранях, что и в случае продольного пьезоэффекта, однако знаки зарядов, соответствующие усилиям сжатия и растяжения, изменяются на противоположные. При деформации пьезоэлемента по оптической оси, а также при деформации всестороннего равномерного сжатия пьезоэффект не наблюдается. В общем случае возникновение поляризационных зарядов в результате деформации пьезоэлемента, показанной на рисунке 2.24, возможно на любой из трех пар граней $i = 1, 2, 3$). При этом можно выделить шесть вариантов силового воздействия: сжатия – растяжения по оси Ox ($j = 1$), по оси Oy ($j = 2$) и по оси Oz ($j = 3$) и, кроме того, сдвиговые в плоскости xOy ($j = 4$), в плоскости xOz ($j = 5$) и в плоскости yOz ($j = 6$). Пьезоэффект от каждого из этих воздействий характеризуется своим значением пьезоэлектрического модуля. Тогда электрический заряд на i -той паре граней пьезоэлемента находится суммированием результатов всех силовых воздействий:

$$q_i = \sum_{j=1}^6 d_{ij} F_j. \quad (2.29)$$

Значения пьезоэлектрических модулей d_{ij} (10^{-12} Кл/Н) у кварца следующие: $d_{21} = -d_{11} = 2,31$; $d_{25} = -d_{14} = 0,67$; $d_{26} = 4,62$. Величины остальных пьезомодулей равны нулю.

Поскольку кристалл с электродами на рисунке 2.23, б представляет собой конденсатор, обладающий некоторой емкостью C , то напряжение, возникающее в результате пьезоэффекта на обкладках конденсатора будет связано с поляризационным зарядом известным соотношением:

$$U_i = \frac{q_{ij}}{c}. \quad (2.30)$$

Обратный пьезоэффект объясняется, как и прямой, строением элементарной ячейки кристалла кварца. В отсутствие внешнего электрического поля имеет место равновесие всех сил взаимодействия электрических зарядов (рис.2.23, а). При воздействии внешнего электрического поля, создаваемого разностью потенциалов на электродах, это равновесие нарушается, и ячейка под действием неуравновешенных сил деформируется. Новое равновесие сил, действующих на заряды, складывается уже в деформированном состоянии кристалла. Возникающая при этом деформирующая сила связана с величиной электрического заряда на паре граней тем же соотношением, что и при прямом пьезоэффекте. В общем случае, при наличии зарядов на всех трех парах граней пьезоэлемента, результирующая деформирующая сила, действующая в направлении \vec{j} , описывается выражением:

$$F_j = \sum_{i=1}^3 \frac{q_i}{d_{ij}}. \quad (2.31)$$

Значения пьезомодулей для прямого и обратного пьезоэффектов одинаковы. Основными достоинствами кварца с точки зрения использования для измерительных целей являются стойкость к воздействиям температуры и влажности, механическая прочность. Кварц имеет незначительный коэффициент расширения, его пьезомодули слабо зависят от температуры.

В качестве пьезоэлектрического материала используют также искусственно поляризованную керамику, изготавливаемую на основе титаната бария и титаната-цирконата свинца. Пьезоэлектрические свойства пьезокерамика приобретает после поляризации в сильном электрическом поле в процессе медленного нагрева и охлаждения. Достоинством пьезокерамики является высокий коэффициент преобразования (из-за больших значений пьезомодулей), недостатком – нелинейность коэффициента преобразования (зависимость его значения от значения преобразуемой величины).

Весьма перспективными пьезоэлектрическими материалами являются также пьезоэлектрические пленки – поликристаллические полимеры, представляющий собой слоистую структуру с аморфными зонами. Пьезоэлектрические пленки обладают уникальными свойствами: широким частотным диапазоном ($10^{-3} \dots 10^9$ Гц), большим динамическим диапазоном, высокой упругой податливостью и механической прочностью, высоким выходным напряжением, высокой электрической прочностью.

Область применения пьезоэлектрического эффекта в измерительной технике весьма обширна. Преобразователи, использующие прямой пьезоэффект, применяются для преобразования в электрический сигнал силы, давления, ускорения, а использующие обратный пьезоэффект, применяются в качестве источников акустических волн, обратных преобразователей в приборах уравнивания. Преобразователи – пьезорезонаторы, имеющие максимальный коэффициент преобразования энергии на резонансной частоте и резко уменьшающийся на других частотах, применяются в качестве узкополосных фильтров электрических сигналов.

В автомобиле пьезоэлектрические датчики применяются в ультразвуковых системах защиты стекол дверей от несанкционированного вскрытия, в системе

предотвращения от соударений автомобиля с препятствием, но главное использование — в качестве детонационного датчика в электронной системе автоматического управления двигателем (ЭСАУ-Д). Пьезоэлектрический преобразователь детонационного датчика (ДД) выполняется в виде шайбы, которая посредством стяжного болта и инерционной массы прижимается к полированной площадке на блоке цилиндров (рис. 2.25, а). Стандартная форма сигнала детонационного датчика показана на рис. 2.25 б. В электронном блоке такой сигнал сначала фильтруется, а затем амплитуда огибающей функции сравнивается с допустимым уровнем для сигнала детонации. При превышении заданного уровня авторегулятор зажигания корректирует угол опережения зажигания соответствующим образом.

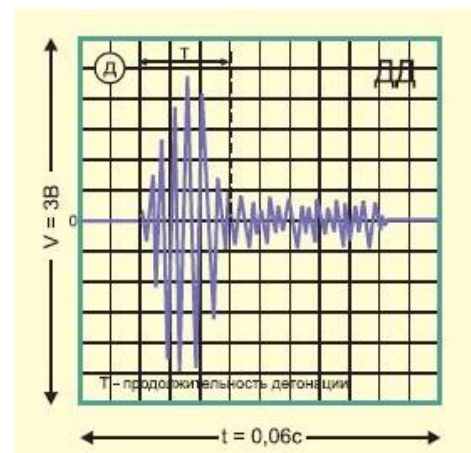
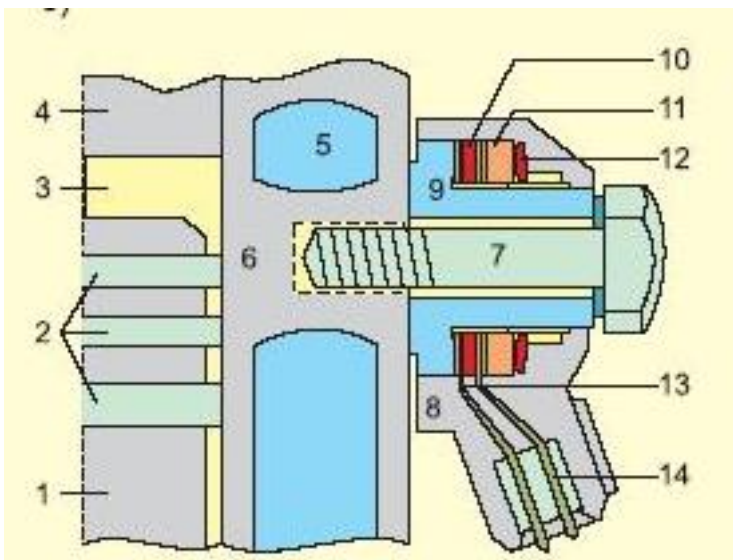

а
б

Рис. 2.25 Конструкция датчика детонации (**а**) и сигнал датчика (**б**): 1 – поршень ДВС; 2 – поршневые кольца; 3 – камера сгорания; 4 – головка блока; 5 – охлаждение блока; 6 – блок цилиндров; 7 – натяжной болт; 8 – корпус датчика; 9 – прижимная втулка; 10 – пьезоэлемент датчика; 11 – гравитационная (инерционная масса); 12 – упругая шайба; 13 – контактные кольца; 14 – электрические контакты

2.5. Пирозэлектрики [1, 2, 5]

Родственным пьезоэлектрическому по физической природе является пирозэлектрический эффект, сущность которого заключается в деполяризации диэлектрика вследствие нагревания. Подобно описанным выше пьезоэлектрикам структуру пирозэлектриков можно рассматривать как совокупность упорядоченно расположенных электрических диполей, т. е. диэлектрик должен обладать спонтанной поляризацией и она должна изменяться при изменении температуры. Уравнение пирозэффекта записывают в виде:

$$\Delta P_s = \rho_n \cdot \Delta T. \quad (2.32)$$

где $\rho_n(T)$ – пирозэлектрический коэффициент, зависящий от температуры. Нагревание пирозэлектрика приводит к нарушению первоначальной ориентации отдельных диполей, поэтому сумма проекций дипольных моментов на направление спонтанной поляризации P_s уменьшается, что и приводит к появлению

поляризационных зарядов. Уменьшение поляризации при повышении температуры представляет собой первичный пирозэффект, численно характеризуемый коэффициентом ρ_{π}' . Одновременно происходит тепловое расширение образца, вследствие чего концентрация диполей в единице объема уменьшается. Вызванное этим дополнительное уменьшение спонтанной поляризации называют вторичным пирозэффектом, выражаемым коэффициентом ρ_{π}'' . В результате

$$\rho_{\pi} = \rho_{\pi}' + \rho_{\pi}'' \quad (2.33)$$

На рис. 2.26 схематично показана структура пирозэлектрического преобразователя, представляющего собой прямоугольный параллелепипед 1 из пирозэлектрического материала, противоположные грани которого имеют электроды 2 для сбора индуцированных теплом электрических зарядов. Электрод, который подвергается воздействию теплового потока 3, покрыт теплопоглощающим слоем 4.

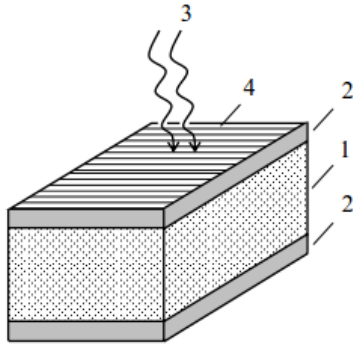


Рис. 2.26. Пирозэлектрический преобразователь: 1 – пирозэлектрический материал; 2 – электроды; 3 – тепловой поток; 4 – теплопоглощающий слой.

Возникающая в результате проявления пирозэффекта разность потенциалов U между электродами связана с изменением температуры кристалла ΔT выражением:

$$U = \frac{\rho_{\pi}}{\varepsilon} \Delta T \quad (2.34)$$

где: ρ_{π} – пирозэлектрический коэффициент; h – толщина кристалла; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала.

Ярко выраженными пирозэлектриками являются кристаллы турмалина и сегнетовой соли, цирконат–титанат свинца, триглицинсульфат, танталат лития. Поскольку за счет поглощения падающей на пирозэлектрический образец электромагнитной энергии происходит изменение его температуры, преобразующееся в электрический отклик, пирозэффект можно [использовать для регистрации электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от гамма-излучения до сантиметровых волн.](#)

2.6. Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая емкость? Какие факторы влияют на величину емкости конденсатора?
2. От чего зависит активная составляющая комплексного сопротивления конденсатора?
3. В чем состоит различие между свободными и связанными зарядами?
4. Чем отличается полярная молекула от неполярной молекулы? Как названные молекулы ведут себя во внешнем электрическом поле?
5. Что понимают под поляризацией диэлектрика? Какие виды поляризации существуют?
6. Что понимают под поляризационными зарядами?

7. В чем состоит физический смысл поляризованности диэлектрика?
8. Какова зависимость диэлектрической восприимчивости вещества от температуры?
9. Для решения каких измерительных задач может быть использовано электроёмкостное измерительное преобразование?
10. Какова сущность прямого и обратного пьезоэффектов?
11. Для чего применяются пьезоэлектрики?
12. Какова сущность пьезоэлектрического эффекта?

2.7. Тестовые задания [7]

1. Теорема Остроградского-Гаусса для электрического поля в вакууме гласит: «Поток вектора напряженности электрического поля через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности.....». Укажите правильную математическую форму записи этой теоремы:

Варианты ответов: **б)**

а) $\oint_S E_n dS = \sum_i q_i$; б) $\oint_S E_n dS = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0}$; в) $\oint_S E dS = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0}$.

2. Дана система точечных зарядов в вакууме и замкнутые поверхности S_1 , S_2 и S_3 , рисунок 2.27. Поток вектора напряженности электрического поля равен нулю через:

- Варианты ответов:** а) поверхность S_2 ;
 б) поверхности S_2 и S_3 ; в) поверхность S_1 ;
 г) поверхность S_3 .

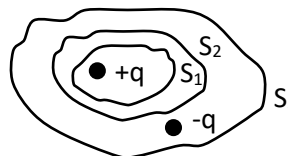


Рис. 2.27.

3. Появление электрических зарядов разных знаков на противоположных сторонах проводника, помещённого во внешнее электрическое поле, называют явлением ...

- Варианты ответов:** а) электролитическая диссоциация;
 б) электромагнитная индукция; в) электризация через влияние;
 г) электронная проводимость, г) электростатическая индукция.

4. Условие равновесия зарядов в проводнике:

Варианты ответов а) $E = E_0 + E' \neq 0$; **б) $E = E_0 + E' = 0$** ; в) $E = E_0 + E' = const$,

где E – вектор напряженности результирующего поля в объеме проводника;

E_0 – вектор напряженности внешнего электрического поля; E' – вектор напряженности "собственного" электрического поля.

5. Электрическая емкость (электроёмкость) проводника зависит от:

Варианты ответов: а) формы поверхности, линейных размеров, расположения относительно других проводников, среды, окружающей проводник, от его заряда и потенциала;

б) формы поверхности, линейных размеров, расположения относительно других проводников, среды, окружающей проводник, и не зависит от его заряда и потенциала;

в) формы поверхности, линейных размеров, среды, окружающей проводник, и не зависит от его заряда и потенциала, расположения относительно других проводников.

6. Электрическая емкость (электроёмкость) проводника:

1) прямо пропорциональна заряду проводника $C \sim q$;

2) обратно пропорциональна потенциалу проводника $C \sim 1/\varphi$;

3) не зависит от заряда проводника и его потенциала.

Варианты ответов: а) 1, 2, 3; б) 1, 2; в) не 1, не 2, не 3;
г) только 3; д) 1,3.

7. На рисунке 2.28 представлена схема соединения конденсаторов $C_1=1$ мкФ, $C_2=1$ мкФ, $C_3=2$ мкФ. Емкость такого соединения:

Варианты ответов: а) $C > 1$ мкФ; б) $C > 2$ мкФ; в) $C=1$ мкФ;

г) $C < 1$ мкФ; д) $C < 2$ мкФ.

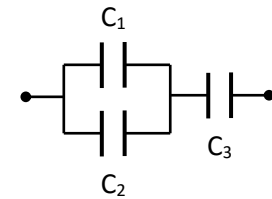


Рис. 2.28.

8. Ток и напряжение на идеальном конденсаторе сдвинуты по фазе :

Варианты ответов: а) $\frac{\pi}{2}$; б) $-\frac{\pi}{2}$; в) 0; г) π .

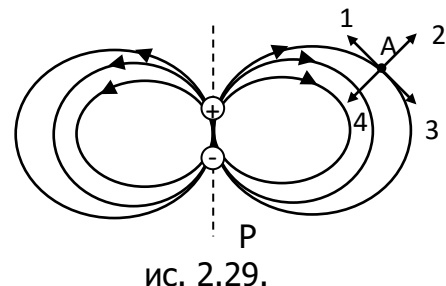
9. Электрический дипольный момент \mathbf{p} (характеристика диполя) это:

Варианты ответов:

- а) вектор, направленный от отрицательного к положительному заряду $p=ql$;
- б) вектор, направленный от положительного к отрицательному заряду $p=ql$;
- в) вектор, направленный перпендикулярно плоскости, в которой находятся положительный и отрицательный заряды $p=ql$.

10. На рисунке 2.29 представлены силовые линии электрического поля диполя. Вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} в точке А ориентирован в направлении:

Варианты ответов: а) 3; б) 1; в) 2; г) 4.



ис. 2.29.

11. Поляризация диэлектрика:

- а) процесс появления связанных зарядов в диэлектриках во внешнем электрическом поле;
- б) процесс перераспределения связанных зарядов в диэлектриках во внешнем электрическом поле;
- в) диэлектрик приобретает отличный от нуля электрический дипольный момент.

12. На рисунке 2.30 изображен электрический диполь в однородном электрическом поле. Как будет направлен вращающий момент, действующий на диполь в данном случае?:

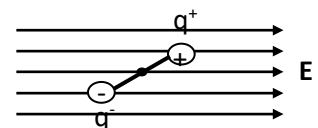


Рис. 2.30

- Варианты ответов:** а) по направлению поля;
б) против направления поля;
в) перпендикулярно направлению поля к нам;
г) перпендикулярно направлению поля от нас.

13. На рисунке 2.31 изображен электрический диполь в неоднородном электрическом поле. Сила, действующая на диполь, в данном случае ориентирована в направлении:

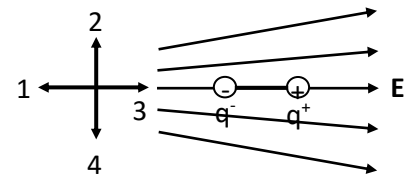


Рис. 2.31.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.

14. Напряженность электрического поля внутри диэлектрика всегда:

Варианты ответов: а) больше, чем в вакууме в ϵ раз; б) не зависит от ϵ ;
в) меньше, чем в вакууме в ϵ раз.

15. На рисунке 2.32 представлены графики, отражающие характер зависимости поляризованности P диэлектрика от напряженности поля E . Укажите зависимость, соответствующую полярным и неполярным диэлектрикам:

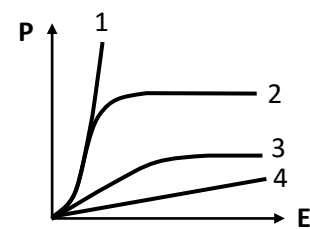


Рис. 2.32.

Варианты ответов: а) 2-4; б) 3-4; в) 1-4; г) 3-2.

16. На рисунке 2.32 представлены графики, отражающие характер зависимости поляризованности P диэлектрика от напряженности поля E . Укажите зависимость, соответствующую сегнетоэлектрикам:

Варианты ответов: а) 2; б) 4; в) 1; г) 3.

17. Относительная диэлектрическая проницаемость среды зависит от:

Варианты ответов: а) давления, температуры и других внешних факторов;

б) структуры и химического состава вещества и других внешних факторов;

в) структуры и химического состава вещества, а также от давления, температуры и других внешних факторов.

18. Чувствительность емкостного преобразователя на базе плоского конденсатора зависит от относительной диэлектрической проницаемости ϵ и расстояния между пластинами δ :

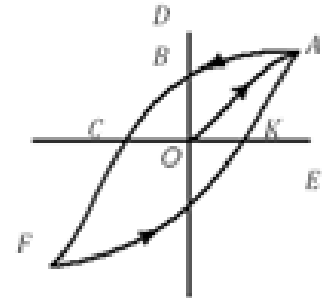
Варианты ответов: а) увеличивается с увеличением относительной диэлектрической проницаемости ϵ и с уменьшением расстояния между пластинами δ ;

б) увеличивается с увеличением относительной диэлектрической проницаемости ϵ и с увеличением расстояния между пластинами δ ; в) уменьшается с увеличением относительной диэлектрической проницаемости ϵ и с уменьшением расстояния между пластинами δ ; г) не зависит от относительной диэлектрической проницаемости ϵ и от расстояния между пластинами δ .

19. В некоторых кристаллах при деформации сжатия на противоположных поверхностях возникают разноименные поляризационные заряды. Как называют этот эффект (явление)?

Варианты ответов: а) пьезоэффект; б) скин-эффект; в) эффект Баркгаузена; г) электронный эффект; д) спонтанная поляризация.

20. Укажите на рисунке 2.33 точки на кривой гистерезиса, в которых происходит переполяризация диэлектрика:
Рис. 2.33



Варианты ответов: а) B, C; б) C, K; в) A, O; г) F, A; д) таких точек нет.

21. В однородное электростатическое поле напряженностью $E_0 = 700$ В/м перпендикулярно полю помещается бесконечная плоскопараллельная стеклянная пластина ($\epsilon = 7$). Определите напряженность электростатического поля внутри пластины. Электрическая постоянная равна $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м.

Варианты ответов: а) 720 В/м; б) 600 В/м; в) 160 В/м; г) 200 В/м;
д) 350 В/м.

22. Пирозлектрики – это вещества, у которых:

Варианты ответов:

- а) уменьшается поляризация при повышении температуры;
- б) возникает поляризация при механической деформации;
- в) увеличивается поляризация при повышении давления;
- г) степень поляризации не зависит от температуры.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВЕЩЕСТВЕ

3.1. Электрическое сопротивление проводников [1, 2, 5]

Пусть постоянный электрический ток силой I протекает по участку 1–2 однородного цилиндрического металлического проводника с постоянной площадью поперечного сечения S (рис.3.1).

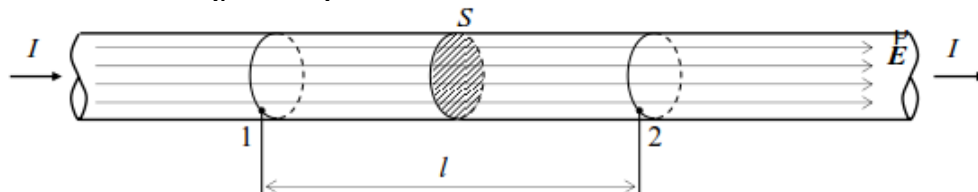


Рис. 3.1. Протекание постоянного электрического тока по бесконечно длинному проводнику постоянного сечения

В этом случае плотность электрического тока по сечению проводника постоянна, линии напряженности электрического поля, обеспечивающего протекание тока, параллельны образующей цилиндрической поверхности, а эквипотенциальные поверхности представляют собой плоские параллельные

фигуры, перпендикулярные поверхности проводника. Согласно закону Ома разность потенциалов между двумя точками 1 и 2 на поверхности проводника пропорционально силе тока:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{1,2} = RI, \quad (3.1)$$

где R – электрическое сопротивление участка проводника. В рассматриваемом случае

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.2)$$

где l – длина участка, S – площадь поперечного сечения, ρ – удельное электрическое сопротивление, характеризующее свойства материала проводника.

Сопротивление металлов электрическому току связано с процессом рассеяния электронов проводимости в результате их столкновений с локальными неподвижными центрами – примесями, дефектами, а также с тепловыми колебаниями решетки – фононами. Другим фактором, влияющим на электросопротивление, является концентрация в металле свободных электронов, определяемая количеством свободных уровней энергии в зоне проводимости. Последнее объясняет тот факт, что одновалентные металлы (медь, серебро, золото, щелочные металлы) имеют наиболее высокую электропроводность (таб.1.1). Математическим выражением указанных факторов является обратно пропорциональная зависимость удельного электрического сопротивления от средней длины свободного пробега электронов и их эффективной плотности. Концентрация электронов проводимости у большинства металлов мало зависит от изменения температуры, но с ростом температуры усиливается рассеяние электронов фононами. Поэтому для всех металлов температурный коэффициент сопротивления α , характеризующий относительное изменение сопротивления с ростом температуры на 1°C , имеет положительный знак (терморезистивный эффект). Значение α в широком диапазоне средних температур можно считать постоянным.

3.2. Терморезистивный эффект [1, 2, 5, 8]

Терморезистивный эффект основан на зависимости электрического сопротивления проводников и полупроводников от температуры.

Как было показано в разделе 3.1, электрическое сопротивление металлов при нагревании увеличивается, а полупроводников – уменьшается. В узком температурном диапазоне зависимость удельного электрического сопротивления проводников от температуры близка к линейной:

$$\rho_T = \rho_0 \alpha (T - T_0), \quad (3.3)$$

где ρ_T – удельное электрическое сопротивление проводника при температуре T ; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление проводника при температуре T_0 ; α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

Однако в широком диапазоне температур зависимость удельного электрического сопротивления от температуры носит нелинейный характер. На рисунке 3.2 показана зависимость $\rho(t)$ вольфрама для диапазона температур $0 \dots 3600^\circ\text{C}$. Аппроксимация этой зависимости линейной функцией дает в указанном интервале температур относительную погрешность, достигающую 10%. Поэтому

для измерительных преобразований, требующих высокой точности, используется аппроксимация температурной зависимости удельного электрического сопротивления полиномом третьего порядка вида:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T - T_0)^3] \quad (3.4)$$

где a , b , c – коэффициенты, определяемые химическим составом материала.

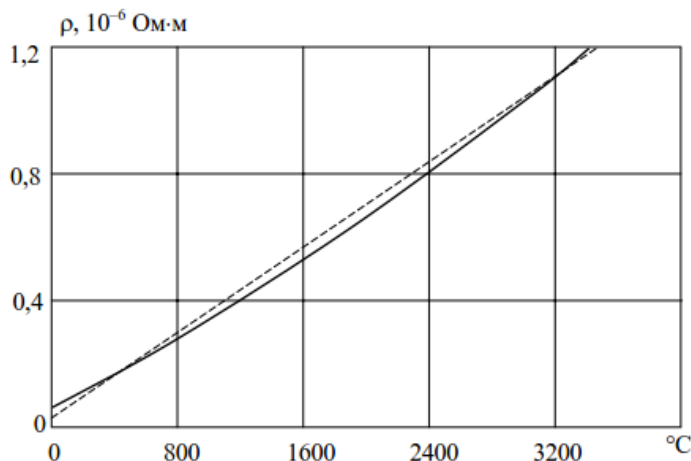


Рис.3.2. Зависимость удельного электросопротивления вольфрама от температуры (сплошная линия) и её аппроксимация линейной функцией (пунктирная линия)

Наибольшее распространение в настоящее время получили полупроводниковые терморезисторы (термисторы), у которых наблюдается резкое уменьшение сопротивления при увеличении температуры. Среди материалов, используемых для терморезисторов этого типа широко применяются оксидные полупроводники, такие как Mn_3O_4 , Co_3O_4 , CuO , CoO , NiO . Состав терморезистора ранее указывали в названии его типа. Наиболее распространёнными являются терморезисторы ММТ ($mCuO \cdot nMn_3O_4$) и КМТ ($mCoO \cdot nMn_3O_4$). Согласно новой системе обозначения, терморезисторы обозначаются буквами СТ (сопротивление термочувствительное). Цифра, следующая за обозначением, указывает вид материала, из которого изготовлен терморезистор (1 – кобальто-марганцевый, 2 – медно-марганцевый, 3 – медно-кобальто-марганцевый оксидные полупроводники), а цифра, стоящая после дефиса, обозначает номер конструктивного типа терморезистора. Температурная зависимость сопротивления полупроводниковых терморезисторов достаточно хорошо описывается формулой $R_T = Ae^{B/T}$, где T – абсолютная температура; A и B – постоянные. ТКС полупроводниковых терморезисторов отрицателен и уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры: $\alpha_T = B/T^2$. При 20°C α_T составляет 0,02—0,08 K⁻¹.

Конструктивное оформление термисторов может быть самым разнообразным. Одни из них представляют собой пластины и диски из оксидных полупроводниковых материалов (медно-марганцевые типа ММТ и кобальто-марганцевые типа КМТ), с нанесёнными серебряными электродами, другие — покрыты эмалью и имеют припаянные контактные выводы (рисунок 3.3). Термисторы ММТ-4 и КМТ-4 дополнительно заключены в металлический тонкостенный корпус и герметизированы. Малоинерционные термисторы (СТЗ-19, СТЗ-18, СТЗ-25) изготавливаются в

виде керамических бусинок диаметром 0,3...0,5 мм, спечённых вместе с проводочными выводами.



Рис.3.3. Полупроводниковые терморезисторы

Термисторы широко применяются в устройствах для измерения и регулирования температуры. По сравнению с металлическими терморезисторами термисторы имеют значительно более широкий диапазон номинального электрического сопротивления (от 1 до 10 МОм) и диапазон измерения температуры: термисторы СТ7-1 могут применяться для измерения температуры в пределах от -100 до $+196^{\circ}\text{C}$, а СТ12-1 — от $+600$ до $+1000^{\circ}\text{C}$. Помимо использования в качестве первичных температурных преобразователей, их применяют для измерения скорости потока газов и жидкостей в расходомерах, относительной влажности и др. Термисторы также широко используются в устройствах температурной компенсации и температурной стабилизации приборов.

В автоэлектронике применяется несколько основных типов датчиков температуры, в основе конструкции которых лежат полупроводниковые терморезисторы:

1. Датчики температуры в системе охлаждения ДВС. Их функция заключается в измерении температуры охлаждающей жидкости. Эти датчики устанавливаются в малом круге циркуляции охлаждающей жидкости и передают данные в ЭБУ. Диапазон измеряемых температур колеблется от

-40°C до $+130^{\circ}\text{C}$.

2. Датчики температуры входящего воздуха. Устанавливаются на впускном тракте. Эти датчики измеряют температуру поступающего в двигатель воздуха, эти данные, в сочетании с данными, поступающими с датчика расхода воздуха, позволяют ЭБУ более точно рассчитывать массу поступившего в двигатель воздуха. Диапазон измеряемых температур колеблется от -40°C до $+120^{\circ}\text{C}$.

3. Датчики наружной температуры. Функция этих датчиков аналогична функции датчиков температуры входящего воздуха.

На рисунке 3.4 показано устройство автомобильного датчика температуры охлаждающей жидкости ТМ 106.

Датчик ТМ 106 входит в состав автомобильного термометра для измерения температуры охлаждающей жидкости и представляет собой латунный корпус 1 (рис. 3.4а), внутренняя поверхность которого изолирована втулкой. К плоскому дну баллона токоведущей пружиной 2 прижат терморезистор 1, выполненный в виде таблетки. Торцевые поверхности таблетки покрыты тонким слоем серебра, так как являются контактами. Другим концом пружина 3 соединяется с выводом датчика 4. Сопротивление терморезистора уменьшается при увеличении температуры среды, в

которой расположен датчик как показано на рисунке 3.4б. Это приводит к возрастанию тока, проходящего через измерительный прибор.

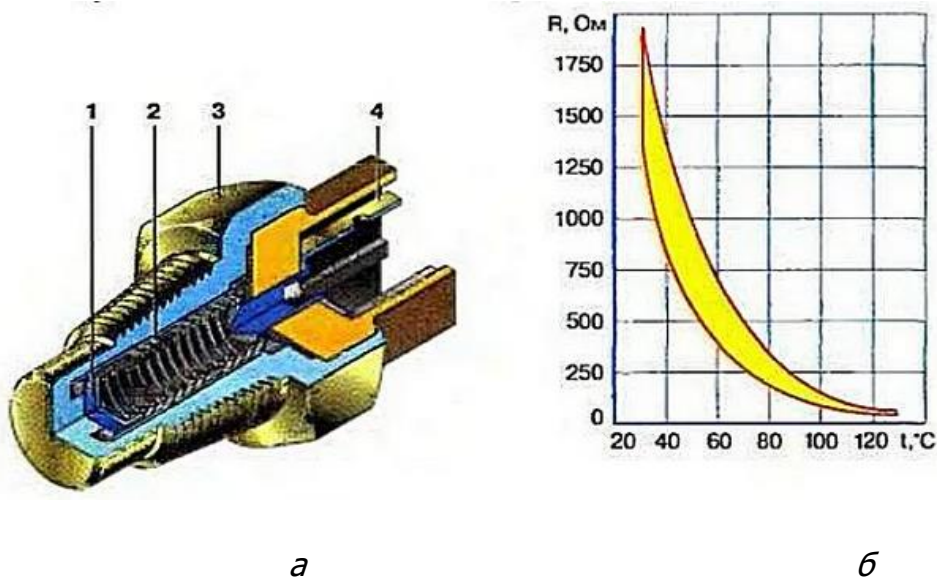


Рис. 3.4. Датчик температуры ТМ 106 охлаждающей жидкости: устройство (а); зависимость электросопротивления от температуры (б): 1 – полупроводниковый терморезистор; 2 – токоведущая пружина; 3 – корпус; 4 - вывод

3.3. Тензорезистивный эффект [1, 2, 5]

Тензорезистивный эффект заключается в изменении активного электрического сопротивления проводника или полупроводника при их механической деформации. Характеристикой тензоэффекта проводника является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления R к относительному изменению длины проводника l :

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}. \quad (3.5)$$

В качестве примера рассмотрим деформацию растяжения проводящего стержня квадратного сечения (рисунок 3.5).

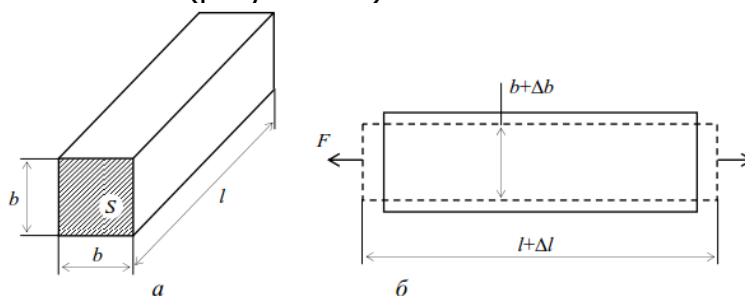


Рис.3.5. Деформация растяжения проводника [5]. Электрическое сопротивление такого стержня длиной l , с площадью поперечного сечения S и удельным электрическим сопротивлением материала ρ определяется выражением (3.2).

Изменение сопротивления в результате деформации находится дифференцированием выражения для R . Для стержня квадратного сечения:

$$\Delta R = R \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta b}{b} \right]. \quad (3.6)$$

В диапазоне упругих деформаций изменение поперечного размера стержня связано с изменением его продольного размера (рис.3.3, б) соотношением: $\frac{\Delta b}{b} = -\frac{\Delta l}{l\mu}$,

где μ – коэффициент [Пуассона](#), связывающий продольные и поперечные деформации. В результате подстановки получаем:

$$\Delta R = R \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) \right]. \quad (3.7)$$

Электрические свойства вещества металлов практически не зависят от приложенного к ним механического напряжения. В этом случае

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \ll \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu); \Delta R \approx \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu); k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} (1 + 2\mu). \quad (3.8)$$

Для металлов $\mu = 0,2 - 0,4$, поэтому значение коэффициента относительной тензочувствительности k составляет 1,48..1,8.

Основная область применения [тензорезисторов](#) – преобразование в электрический сигнал сил, механических напряжений, деформаций (линейных и крутильных). Измеряемое механическое воздействие может прикладываться непосредственно к тензопреобразователю, выполняющему в этом случае одновременно роль упругого элемента. В другом варианте тензорезистор наклеивается на поверхность деформируемого упругого элемента, например на испытываемый элемент конструкции (рисунок 3.6). В этом случае можно условно считать, что преобразование механического воздействия (силы, момента) в электрический сигнал происходит в два этапа. Первый этап – промежуточное преобразование механического воздействия в деформацию упругого элемента с закрепленным на его поверхности тензопреобразователем. Второй этап – преобразование деформации последнего в электрический сигнал (изменение активного сопротивления).

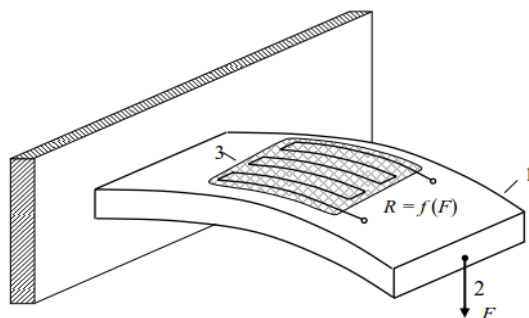


Рис. 3.6. Тензорезистор 3 закреплённый на упругом элементе 1; 2 – внешняя сила,

В автоэлектронике тензорезистивный преобразователь используется в качестве датчика абсолютного давления (MAP sensor) в электронной системе автоматического управления двигателем (ЭСАУ-Д). Под воздействием внешнего усилия в тензодатчике изменяется его внутреннее омическое сопротивление. Конструктивно тензодатчик представляет собой полупроводниковую структуру, чувствительным элементом в которой является тонкая (около 0,2 мм) силиконовая пластина (рисунок

3.7). На этой пластине технологически сформированы четыре резистивных зоны (омические сопротивления), которые соединены между собой по мостовой схеме. В одну диагональ моста подается стабилизированное напряжение 5 В, а с другой диагонали снимается напряжение, являющееся линейной функцией от абсолютного давления (разрежения) над силиконовой пластиной. Для того, чтобы тензодатчик имел требуемую характеристику преобразования, между пластиной и стеклянной подложкой создается герметизированная вакуумная полость. Остаточное давление в полости не превышает 0,1 бар. Линейные размеры чувствительного элемента тензодатчика не превышают 2...3 мм. Если тензодатчик предназначен для работы с цифровой ЭСАУ-Д, то его аналоговый сигнал преобразуется в форму, показанную на рис. 2и. Такой датчик обычно устанавливается непосредственно в электронном блоке ЭСАУ-Д и соединяется с впускным коллектором при помощи тонкого вакуумного шланга.

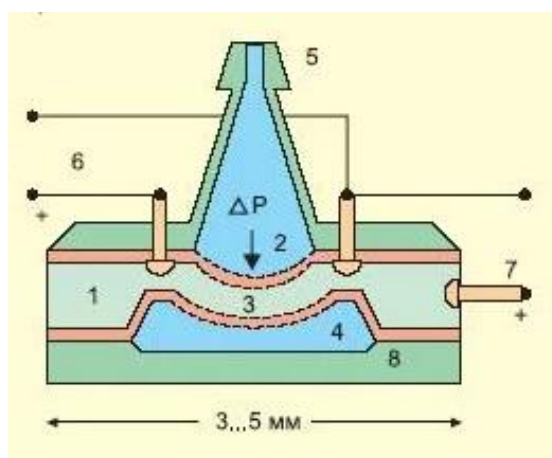


Рис. 3.7. Устройство датчика МАП абсолютного давления (разрежения): 1 – силиконовый полупроводниковый резистивный мост; 2 – вакуумная камера; 3 – силиконовая пластина – диафрагма; 4 – вакуумная герметичная полость; 5 – корпус датчика со штуцером; 6 – входные клеммы; 7 – выходные клеммы; 8 – подложка из тугоплавкого стекла

3.4. Контактные явления в металлах [1, 2, 5, 8]

3.4.1. Работа выхода электронов из металла

Как показывает опыт, свободные электроны при обычных температурах практически не покидают металл, несмотря на то, что имеют очень высокую скорость. Это означает, что в поверхностном слое металла существует электрическое поле, препятствующее вылету электронов из металла. Чтобы покинуть металл, электрон должен совершить работу по преодолению сил отталкивания. Эту работу называют работой выхода электронов из металла. Рассмотрим процесс образования этого поля. Вылетая из металла, электрон индуцирует в нем положительный заряд и поэтому, будет притягиваться к нему. Под действием силы притяжения электрон возвращается обратно. При постоянной температуре металла наступает динамическое равновесие и над проводником будет находиться тонкий слой свободных электронов (электронное облако). Этот слой и положительный заряд в металле создают электрическое поле, подобное полю конденсатора. Толщина этого слоя порядка $10^{-10} \dots 10^{-9}$ м, он не создает электрического поля в пространстве, но

препятствует выходу электронов из металла. Разность потенциалов, возникающая в поверхностном слое металла, получила название поверхностного скачка потенциала $\Delta\varphi$ (рисунок 3.8). В среде, окружающей металл, электрического поля нет и поэтому можно считать, что потенциал среды φ_0 равен нулю, а, следовательно, внутри металла потенциал положителен и равен

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 = \varphi. \quad (3.9)$$



Рис. 3.8. Поверхность металла при $T > 0 \text{ K}$

Потенциальная энергия свободного электрона в металле

$W = -e\Delta\varphi = -e\varphi < 0$. Другими словами, электрон находится в потенциальной яме глубиной $e \cdot \Delta\varphi$, равной работе выхода A электрона из металла (рис. 3.9, а). Работа выхода электронов из металла зависит от его химической природы и чистоты поверхности.

3.4.2. Контакт двух металлов. Контактная разность потенциалов.

Рассмотрим контакт двух металлов 1 и 2, различных по химическому составу. Так как работа выхода электронов из металлов различна, то при соединении металлов между ними будет происходить обмен электронами.

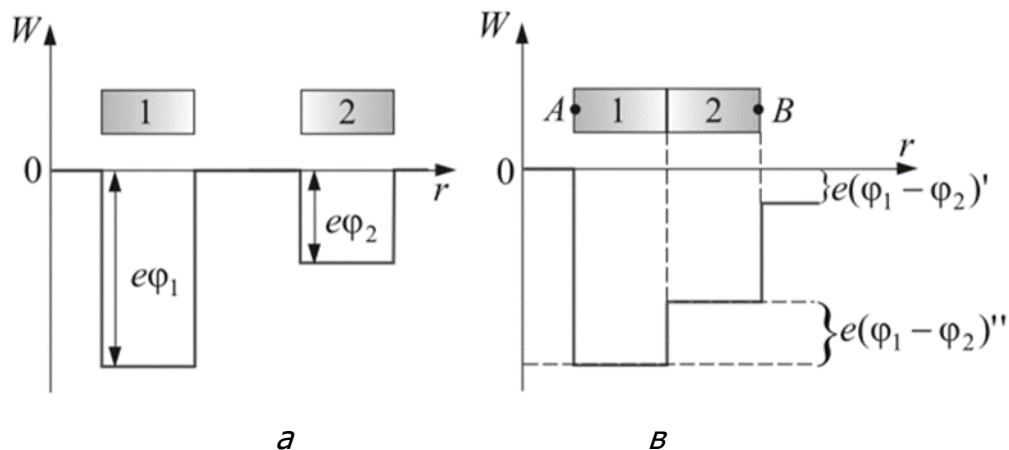


Рис. 3.9. Контакт двух металлов

Число электронов, переходящих из одного металла в другой и обратно, зависит от величины работы выхода электрона для каждого из металлов. Пусть $A_1 > A_2$, тогда большее число электронов будет переходить из металла 2 с меньшей работой выхода в металл 1 с большей работой выхода. Так как потоки электронов в обе стороны контакта не равны, то металл 1 зарядится отрицательно, а металл 2 – положительно, и на границе двух металлов возникнет разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)'$, препятствующая дальнейшему преимущественному переходу электронов из металла 2 в металл 1, которую называют внешней контактной разностью потенциалов:

$$(\varphi_1 - \varphi_2)' = -\frac{A_1 - A_2}{e}. \quad (3.10)$$

Величина $(\varphi_1 - \varphi_2)'$ зависит от строения металлов и состояния их поверхности.

Рассмотрим теперь возникновение внутренней контактной разности потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)''$. Допустим, что концентрация свободных электронов для металлов 1 и 2 равна соответственно n_1 и n_2 , причём $n_1 > n_2$. Тогда потоки свободных электронов в обоих металлах будут не одинаковы и по этой причине. Поток электронов из металла 1 будет больше их потока в обратном направлении, и металл 2 будет заряжаться положительно, а металл 1 – отрицательно. В результате этого между металлами возникнет разность потенциалов и появится электрическое поле, которое вызовет дополнительное (дрейфовое или переносное) движение электронов в обратном направлении. При некоторой разности потенциалов между металлами установится динамическое равновесие, и потенциалы металлов уже не будут меняться. Эта разность потенциалов и является внутренней контактной разностью потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)''$ обоих металлов.

Классическая электронная теория позволяет найти величину $(\varphi_1 - \varphi_2)''$. Применяя для электронного газа в металле классическое распределение [Больцмана](#), можно написать $n_2 = n_1 e^{\frac{e(\varphi_1 - \varphi_2)''}{kT}}$. Прологарифмировав это выражение, получим:

$$(\varphi_1 - \varphi_2)'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.11)$$

Таким образом, при тесном соприкосновении двух металлов, между ними устанавливается контактная разность потенциалов

$$\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)' + (\varphi_1 - \varphi_2)'' = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.12)$$

Мы получили выражение, которое показывает, что контактная разность потенциалов зависит только от температуры и химического состава металлов (первый закон [Вольта](#)).

Если металлы *Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Au, Pt, Pd* привести в контакт в указанной последовательности, каждый предыдущий при соприкосновении с одним из последующих металлов зарядится положительно (ряд Вольта).

Рассмотрим теперь последовательное соединение трёх разнородных металлов, которые, тем самым, образуют два контакта: 1 – 2 и 2 – 3. Для них:

$$\Delta\varphi_{12} = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \text{ и } \Delta\varphi_{23} = -\frac{A_2 - A_3}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_3}. \quad (3.13)$$

Суммируя эти выражения можно получить:

$$\Delta\varphi_{13} = -\frac{A_1 - A_3}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_3}. \quad (3.14)$$

Таким образом, контактная разность потенциалов не зависит от промежуточных проводников и равна контактной разности потенциалов, возникающей при соединении крайних проводников (второй закон Вольта).

3.4.3. Термоэлектрические явления

Явление [Зеебека](#). Рассмотрим замкнутую цепь, составленную из двух разнородных металлов 1 и 2 (термопару) и электроизмерительного прибора (рисунок 3.7). Если места соединения металлов (контакты, спаи) находятся при одинаковой

температуре, то в них возникнут равные по величине, но противоположные по знаку контактные разности потенциалов и их сумма будет равна нулю. Не то будет, если температура T_1 контакта a ($T_1 = T_x$) и температура T_2 контакта b ($T_2 = T_r$) не одинаковы ($T_r > T_x$). В этом случае $\Delta\varphi_b > \Delta\varphi_a$. В результате между спаями возникнет разность потенциалов, которая называется термоэлектродвижущей силой (термо ЭДС) ε_t и в цепи появится электрический ток. Это явление называется явлением Зеебека. Для термо-ЭДС получим:

$$\varepsilon_t = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} (T_2 - T_1) = \alpha(T_2 - T_1) \quad (3.15)$$

где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$ называется удельной термо-ЭДС. Величина α зависит от материала проводников и постоянна в широком диапазоне разности температур.

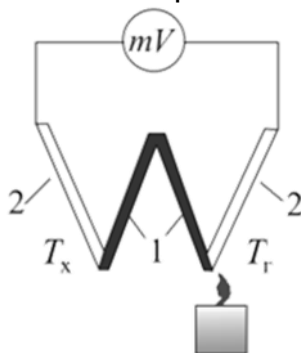


Рис. 3.10. Устройство термопары

В таблице 3.1 приведены значения удельной термо-ЭДС α для некоторых металлов по отношению к свинцу.

Таблица 3.1

Значения α для ряда металлов по отношению к Pb

Материал	α , мкВ/К	Материал	α , мкВ/К
Сурьма	+43	Олово	+0,2
Железо	+15	Алюминий	+0,4
Вольфрам	+3,6	Платина	+4,4
Медь	+3,2	Натрий	+6,5
Цинк	+3,1	Никель	+20,8
Золото	+2,9	Константан	+38
Свинец	0,0	Висмут	+68,0

Явление Зеебека используется при измерении температуры и преобразовании тепловой энергии в электрическую.

Термоэлектрические термометры применяют, например, для измерения температуры газов в цилиндрах дизеля на тепловозах. Называют их термоэлектрическими дизельными комплектами. Большинство тепловозов, находящихся в эксплуатации, оборудовано термоэлектрическими дизельными комплектами типа ТКД-50М. В комплект ТКД-50М входят: милливольтметр типа МКД-50М со шкалой 0... 600°C; переключатель на 11 точек измерения, встроенный в общий корпус с милливольтметром; хромель-копелевые термопары типа ТХК-400М. Погрешность показаний комплекта не превышает $\pm 2,5\%$ от верхнего предела

показаний при температуре окружающего воздуха $+20 \pm 5^\circ\text{C}$.



Рис. 3.11. Термоэлектрический дизельный комплект ТКД-50М.

Явление Пельтье. Термоэлектрическое измерительное преобразование является обратимым. Если в цепи, состоящей из двух разнородных проводников пропускать электрический ток, то в зависимости от направления тока один из контактов будет нагреваться, другой охлаждаться. Это явление получило название явления Пельтье. В отличие от джоулевой теплоты, которая пропорциональна квадрату силы тока, теплота Пельтье пропорциональна первой степени силы тока и меняет знак при изменении направления тока.

Если пропускать ток в направлении термотока (при условии $T_2 > T_1$), то согласно опыту Пельтье спай b , который при явлении Зеебека находился при более высокой температуре, будет теперь охлаждаться, а спай a – нагреваться. При изменении направления тока – наоборот.

Объяснить явление Пельтье можно следующим образом. Благодаря контактным разностям потенциала в спае a и b создаются электрические поля. Направление движения электронов при заданном направлении тока в спае a совпадает с напряженностью поля, а в спае b – противоположно полю. Следовательно, в спае b электрическое поле тормозит электроны, а в спае a – ускоряет. В результате этого в спае b электроны отбирают энергию у ионов металла, а в спае a – отдают энергию ионам металла.

Количество выделяемой либо поглощаемой теплоты $Q_{\text{П}}$ за время t прямо пропорционально силе протекающего тока I :

$$Q_{\text{П}} = \Pi I t, \quad (3.16)$$

где Π – коэффициент Пельтье.

Явление Томсона. При прохождении тока по неравномерно нагретому однородному проводнику происходит дополнительное выделение (поглощение) теплоты, аналогичной теплоте Пельтье. Это связано с тем, что в более нагретой части проводника электроны имеют большую среднюю энергию, чем в менее нагретой, и, двигаясь в направлении убывания температуры, они отдают часть своей энергии решетке, в результате чего происходит выделение теплоты Томсона. Если же электроны движутся в сторону возрастания температуры, то они, наоборот, пополняют свою энергию за счет энергии решетки, в результате чего происходит поглощение теплоты Томсона.

3.5. Гальваномагнитные явления [1, 2, 5, 8]

Гальваномагнитные явления возникают в результате действия магнитного поля на электрические (гальванические) свойства проводников и полупроводников, по которым протекает электрический ток. Наибольшее значение имеют поперечные гальваномагнитные явления, когда силовые линии магнитного поля перпендикулярны направлению электрического тока. К ним относятся эффект [Холла](#) и эффект [Гаусса](#) (магниторезистивный эффект).

3.5.1. Эффект Холла

Эффект Холла называется возникновение в твердом проводнике с током, помещенным в поперечное магнитное поле, электрического поля, перпендикулярного направлениям тока и магнитного поля. Эффект Холла объясняется взаимодействием с магнитным полем движущихся носителей заряда (в металлах - электронов). На рисунке 3.12 показана пластинка, по которой протекает электрический ток силой I . Пластинка находится в поперечном магнитном поле с индукцией B . В магнитном поле на движущиеся со скоростью V электроны действует сила [Лоренца](#) F_1 , направление которой перпендикулярно направлениям векторов скорости электрона и индукции магнитного поля. Модуль силы Лоренца.

$$F_1 = eVB, \quad (3.17)$$

где e – элементарный заряд.

Действие [силы Лоренца](#) со стороны магнитного поля приводит к отклонению движущихся электронов от прямолинейной траектории, параллельной продольной оси пластинки, в сторону одной из боковых граней (для случая, показанного на рисунок 3.8 – в сторону ближней грани). В результате на этой боковой грани происходит накопление отрицательных зарядов и в результате чего возникает электрическое поле (поле Холла). Со стороны возникшего электрического поля на электроны будет действовать сила F_2 , направление которой противоположно направлению силы F_1 .

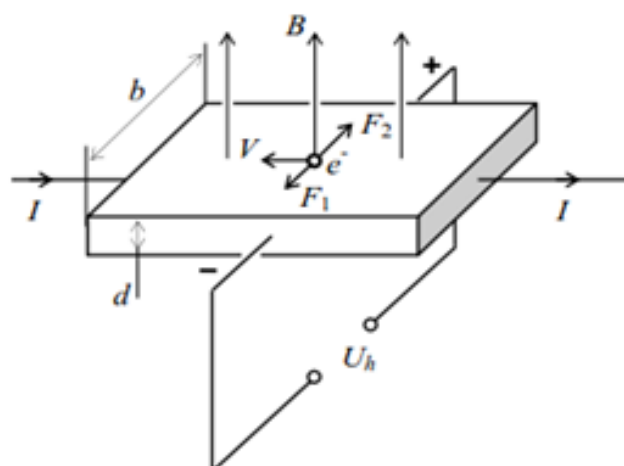


Рис. 3.12. Пластинка с током в поперечном магнитном поле

Будем считать поле Холла в пределах пластинки однородным. Модуль силы, действующей на электрон со стороны электрического поля:

$$F_2 = eE_h, \quad (3.18)$$

где E_h – напряженность электрического поля Холла.

Таким образом, на движущиеся электроны действуют две силы в противоположных направлениях. Процесс отклонения электронов и накопления зарядов на боковых гранях будет продолжаться до тех пор, пока действие электрического поля Холла на заряды не уравнивает действия силы Лоренца. Условие равновесия будет иметь вид:

$$E_h = VB. \quad (3.19)$$

Скорость движения электронов может быть выражена через силу тока. Сила тока – заряд, проходящий через сечение проводника в единицу времени, может быть найдена как произведение площади поперечного сечения проводника и суммарного заряда всех электронов, пересекающих в единицу времени это сечение. Поскольку первый сомножитель равен произведению ширины пластинки b и ее высоты d , а второй – произведению заряда электрона e , объемной концентрации электронов n и их скорости V , то соотношение, связывающее силу тока и скорость электрона, имеет вид:

$$I = enbdV. \quad (3.20)$$

Тогда разность потенциалов противоположных боковых граней U_h (эдс Холла) может быть определена следующим образом:

$$U_h = E_h b; \quad V = Bb \frac{IBb}{enbd} \frac{R_h}{d} = IB, \quad (3.21)$$

где $R_h = \frac{1}{en}$ – коэффициент Холла, зависящий от природы вещества пластинки.

Основное применение преобразователей Холла – измерение постоянных и переменных магнитных полей. Магнитная чувствительность в зависимости от материала и режима работы преобразователя составляет 0,05...1 В/Тл.

Датчик на эффекте Холла широко используется в современных системах автоматического управления ДВС для определения частоты вращения и положения коленчатого и распределительных валов.

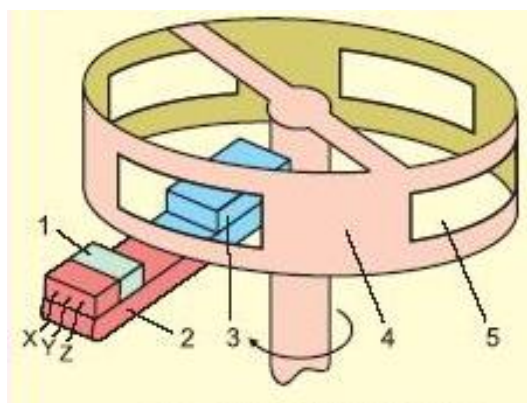


Рис. 3.13. Датчик Холла в системах управления ДВС

Конструктивно элемент Холла 1 в виде бруска помещают в зазоре магнитопровода с полюсами 2 и 3. Как показано на рисунке 3.13 элемент будет находиться в поперечном постоянном магнитном поле и на боковых гранях бруска появится электродвижущая сила. Если магнитные силовые линии поля в зазоре перекрыть

магнитонепроницаемым экраном 4, который часто называют магнитным аттенуатором, ЭДС Холла исчезнет. Таким образом, если аттенуатор 4, который выполнен в виде полого цилиндра с магнитопрозрачными окнами 5, станет вращаться, то выходной сигнал такого датчика будет представлять собой последовательность прямоугольных импульсов со стабильными амплитудой и формой, которые не зависят от скорости переключения датчика. Частота следования импульсов и их длительность определяются частотой вращения магнитного аттенуатора и числом окон на нем. Число окон на аттенуаторе равно числу цилиндров ДВС. Окно для первого цилиндра шире остальных, благодаря чему может быть зафиксирована точка начала отсчета.

Таким образом, с помощью датчика Холла и электронной схемы обработки его выходного сигнала могут быть определены три главных входных параметра для системы зажигания: частота вращения коленвала ДВС, его положение относительно верхней мертвой точки для любого цилиндра в любой момент времени, а также положение точки начала отсчета. Безынерционность датчика и стабильность параметров сигнала позволяют реализовать управление углом опережения зажигания в каждом такте, т. е. для каждого цилиндра в отдельности. (Itay-krylov.ru/ch_datchik_el_sist.html). [Кроме того, датчики Холла используются в цифровой электронике и электроизмерительных приборах.](#)

3.5.2. Магниторезистивный эффект

Магниторезистивный эффект заключается в изменении электрического сопротивления проводников под действием внешнего магнитного поля.

Причина магниторезистивного эффекта, как и в случае эффекта Холла, заключается в искривлении траекторий носителей заряда под действием магнитного поля. Относительное изменение удельного электрического сопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ в магнитном поле с индукцией $B=1$ Тл для большинства металлов составляет порядка 10^{-4} . Значительно сильнее магниторезистивный эффект выражен в полупроводниках, для которых при $B=1$ Тл изменение удельного электрического сопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ составляет $10^{-2} \dots 10$.

Весьма значительна зависимость степени проявления магниторезистивного эффекта от формы магниторезистора. Если магниторезистор представляет собой пластинку длиной l и шириной b , то в зависимости от соотношения между l и b относительное изменение электросопротивления при одном и том же значении индукции магнитного поля будет различным (рисунок 3.14).

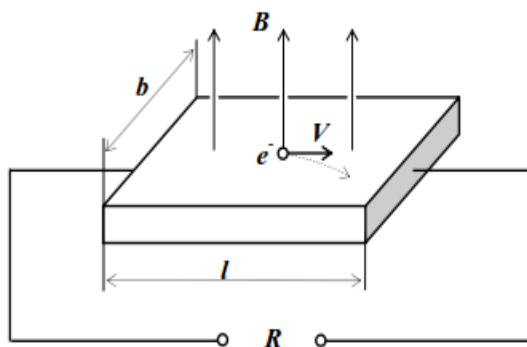


Рис. 3.14. Электропроводящая пластинка в поперечном магнитном поле

Максимальное значение относительного изменения удельного электрического сопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ соответствует отношению $l/b \rightarrow 0$ (короткий и широкий магниторезистор). С увеличением отношения l/b (длинный и узкий магниторезистор) величина $\Delta\rho/\rho_0$ уменьшается. Такая зависимость магнитной чувствительности от формы магниторезистора обусловлена тем, что при относительно малом поперечном размере магниторезистора ограничено и поперечное смещение носителей заряда под действием магнитного поля. Зависимость удельного электрического сопротивления магниторезистора от индукции поперечного магнитного поля описывается выражением:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{K_1 B_2}{1 + K_2 B^2} \quad (3.22)$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от формы магниторезистора;

K_2 — коэффициент, зависящий от материала магниторезистора.

Основная область использования [магниторезисторов](#) — измерение магнитных полей. Если применение преобразователей Холла более эффективно для области слабых полей, то в области сильных магнитных полей целесообразно использование магниторезисторов. Магниторезистивные элементы в составе датчиков скорости используются для измерения частоты вращения колес автомобиля с целью управления его активными системами безопасности (антиблокировочной, антипробуксовочной, курсовой устойчивости и пр.).

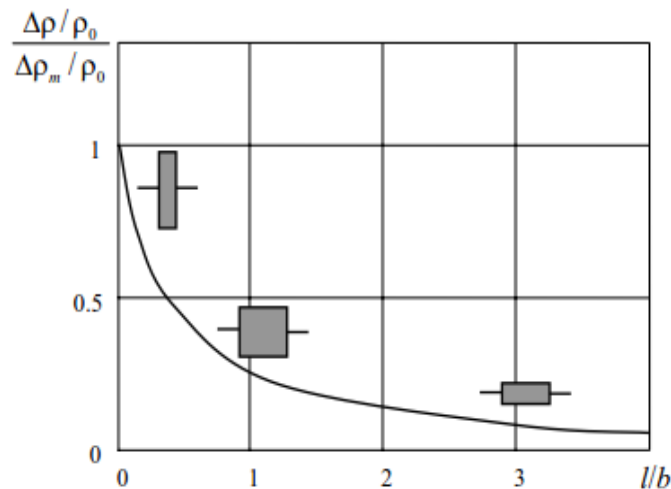


Рис. 3.15. Зависимость изменения электрического сопротивления магниторезистора от соотношения его продольного и поперечного размеров

В основе работы датчика лежит анизотропный магниторезистивный (АМР) эффект, проявляющийся в изменении величины электрического сопротивления ферромагнитных проводников при их повороте относительно силовых линий магнитного поля. Внешнее магнитное поле поворачивает вектор намагниченности пленки M на угол θ . Величина угла зависит от направления и величины поля. При этом электросопротивление пленки изменяется по закону: $R = R_0 + R^* \cos^2 \theta$, где R^* — постоянная, имеющая размерность сопротивления.

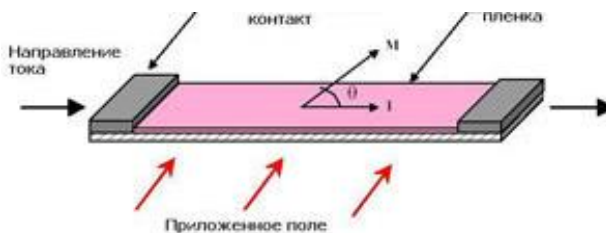


Рис. 3.16. Анизотропный магниторезистивный эффект

Данный эффект реализуется с помощью простого по конструкции датчика— его основной является пластинка (плёнка) пермаллоя (сплава $NiFe$) с нанесенными на неё металлическими контактами, помещенная в микросхему с о встроенной электронной измерительной и преобразовательной схемой. Микросхема помещается напротив задающего диска— закрепленного на ступице колеса кольца из диэлектрического материала (пластика) со сформированными намагниченными точками. В покое магнитное поле в датчике постоянно, поэтому и сопротивление пластин со временем не изменяется. При вращении колеса напротив датчика проходят намагниченные точки задающего диска, вследствие чего периодически изменяется направление магнитных силовых линий и, как следствие, электросопротивления пластин (рисунок 3.17).

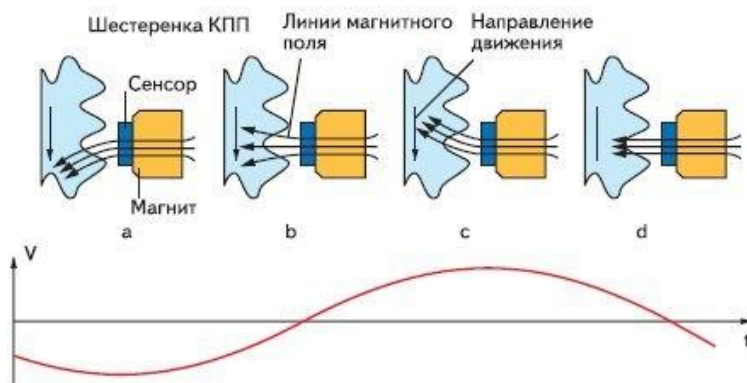


Рис.3.17. Принцип работы датчика скорости системы ABS

Так формируется сигнал, который измеряется электронной схемой и преобразуется в необходимый для работы электронного блока управления вид.

Основным преимуществом датчиков данного типа является возможность изменения не только частоты, но и направления вращения колеса— это обеспечивается неравномерным изменением поля при прохождении рядом с датчиком намагниченных точек задающего диска. Эти датчики являются эффективными и надежными, они начинают работать практически сразу при начале движения и обеспечивают высокую точность измерений (http://www.gamma.spb.ru/pictures/articles/doc_36.pdf).

3.6. Электропроводность растворов электролитов [1, 2, 5, 6]

Основным растворителем химических веществ является вода. Дистиллированная вода обладает низкой электропроводностью, поскольку в ее

молекуле H_2O связь между составляющими ее ионами H^+ и OH^- очень сильная, процесс диссоциации протекает слабо и количество свободных ионов (носителей зарядов) ограничено. Значительно более высокой электрической проводимостью обладают водные растворы солей, кислот и оснований. Причиной этого являются диэлектрические свойства воды. Являясь веществом с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 81$) вода, поляризуясь в электрическом поле ионов растворенного в воде вещества, ослабляет силы электрического взаимодействия между этими ионами (раздел 2.1). Последнее приводит к интенсивной диссоциации молекул растворенного вещества на свободные ионы (носители зарядов). Вещества, растворяющиеся в воде с образованием положительных и отрицательных свободных ионов, называются электролитами – проводниками второго рода.

Удельная электрическая проводимость раствора γ зависит от его концентрации и пропорциональна химической активности раствора:

$$\gamma = \lambda f c = \lambda a, \quad (3.23)$$

где f – коэффициент активности; c – молярная концентрация раствора (г–моль/л); a – химическая активность раствора; λ – эквивалентная электропроводность, соответствующая единичному значению химической активности раствора. Коэффициент активности f , равный единице при очень слабых концентрациях раствора, уменьшается по мере повышения концентрации. Таким образом, удельная электрическая проводимость раствора является некоторой сложной функцией его концентрации.

На рисунке 3.18 показаны зависимости удельной электрической проводимости γ от концентрации c для различных растворов. Анализ этих зависимостей показывает, что для слабо концентрированных растворов ($c < 2,5$ г–моль/л) характерна практически линейная зависимость γ (c) поскольку для таких растворов $f \rightarrow 1$. Для растворов средней концентрации ($c = 3 \dots 8$ г–моль/л) наблюдается малая зависимость γ от c . В этом диапазоне изменения концентрации увеличение значения концентрации c компенсируется уменьшением коэффициента активности f . Для концентрированных растворов характерно уменьшение γ при увеличении c поскольку для таких растворов $f \rightarrow 0$. Сильно концентрированные растворы обладают такой же низкой электрической проводимостью, как и дистиллированная вода. Рассмотренные зависимости могут быть использованы для получения информации о составе и концентрации раствора.

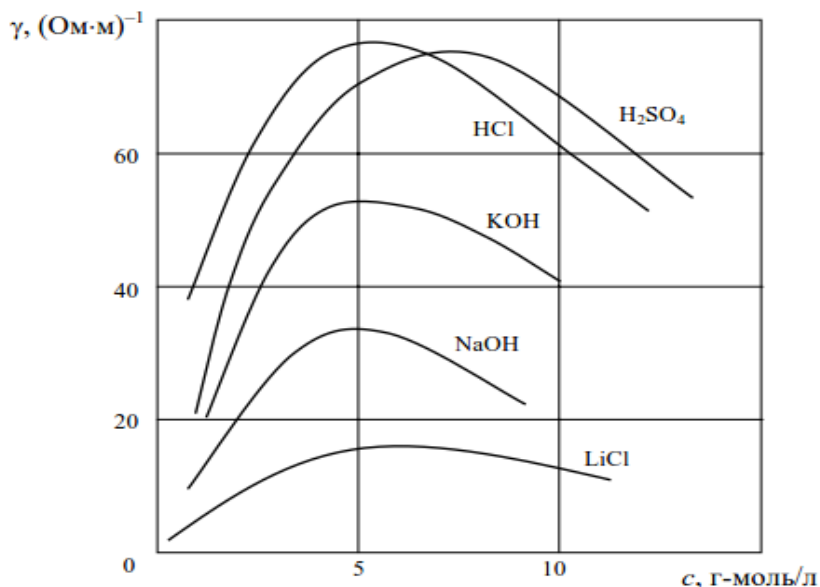


Рис. 3.18. Зависимость удельной электрической проводимости растворов от концентрации растворов

Путем измерения удельной электрической проводимости при известном составе раствора может быть определена его концентрация, а при известной концентрации – состав раствора. Поскольку подвижность ионов сильно зависит от температуры раствора, то и [электропроводность раствора также зависит от температуры](#).

Для слабо концентрированных растворов температурная зависимость удельного электрического сопротивления описывается выражением:

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(T - T_0)]^{-1}$$

(3.24)

где ρ и ρ_0 – удельные электрические сопротивления раствора при температурах соответственно T и T_0 ; β – температурный коэффициент сопротивления.

В малом температурном диапазоне можно считать, что значение β постоянно и определяется только составом раствора. При комнатной температуре примерные значения β равны: $0,016 \text{ K}^{-1}$ для кислот;

$0,019 \text{ K}^{-1}$ для оснований и $0,024 \text{ K}^{-1}$ для солей.

Между двумя электродами, опущенными в раствор электролита, вследствие физико–химических процессов возникает разность потенциалов. На этом основан принцип действия гальванических элементов. Возникновение разности потенциалов между металлическим электродом и раствором при малой концентрации раствора обусловлено частичным растворением материала электрода и переходом в раствор положительных ионов металла. В этом случае электрод, потерявший положительные заряды будет иметь относительно раствора отрицательный потенциал. При больших концентрациях раствора, наоборот, положительные ионы могут выделяться на электроде, заряжая его положительно относительно раствора. Потенциал электрода относительно раствора, в который он опущен, называется электродным потенциалом.

Поскольку прямое измерение потенциала электрода относительно раствора невозможно, измеряют разность потенциалов между двумя электродами. В качестве

электрода сравнения, потенциал которого условно принимается как нулевой, используется водородный электрод. Этот электрод выполняется из платины, на поверхности которой адсорбирован газообразный водород.

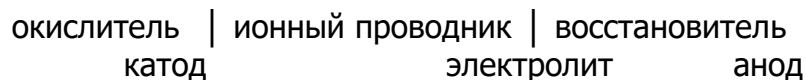
Значения электродных потенциалов, измеренные относительно водородного электрода при нормальной температуре (18⁰С) и нормальной концентрации (1г-моль/л) электролита называют нормальными потенциалами электрода. Их значения лежат в диапазоне ± 3 В: – 2,92 В для калия; – 0,76 В для цинка; + 0,34 В для меди.

3.7. Химические источники тока [1, 2, 5, 6]

Химический источник тока – это устройство, в котором химическая энергия непосредственно превращается в электрическую энергию. Устройство для этого преобразования может называться также «гальваническим элементом» или «электрохимической ячейкой».

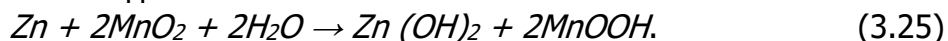
Основой работы химического источника тока является химическая реакция взаимодействия окислителя и восстановителя. В процессе взаимодействия окислитель, восстанавливаясь, присоединяет электроны, а восстановитель, окисляясь, отдает электроны. Чтобы энергия этой реакции не выделялась в виде тепла, а превращалась в электрическую энергию, процессы окисления и восстановления должны быть пространственно разделены. Электрохимическим методом можно также обратное преобразовать электрическую энергию в химическую и таким образом накапливать, (аккумулировать) электрическую энергию в химической форме. Перезаряжаемую электрохимическую ячейку многократного действия называют также «аккумулятор».

Простейшая электрохимическая ячейка состоит из двух электродов, разделенных проводником второго рода, т.е. ионным проводником или электролитом. Электролит необходим для предотвращения непосредственного перехода электронов от восстановителя к окислителю:



Электродом называют проводник первого рода, находящийся в контакте с ионным проводником. На границе между этими проводниками возникает скачок потенциала, называемый электродным потенциалом. Электрод, на котором протекает окисление восстановителя, называют анодом, электрод, на котором протекает восстановление окислителя – катодом. Совокупность окислителя, восстановителя и ионного проводника называется электрохимической системой. По принципу работы химического источника тока подразделяют на первичные, вторичные и топливные элементы.

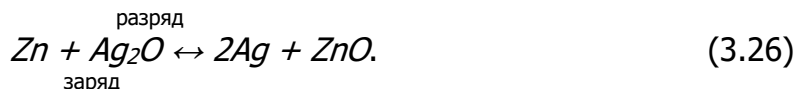
Первичные химические источники тока (гальванические элементы) – одноразовые, содержат активные вещества в электродах, а после полного расходования активных веществ источники становятся неработоспособными и требуют замены. Самыми распространенными являются гальванические элементы цинк–диоксидмарганцевой электрохимической системы, в которой токообразующая химическая реакция имеет вид:



При этом электроны переносятся через внешнюю цепь от анода к катоду, гидроксид-ионы движутся в растворе от катода, где они образуются, к аноду, где они расходуются, но суммарная их концентрация не меняется. Цинк окисляется – переходит из состояния со степенью окисления 0 в степень окисления +2, а

марганец восстанавливается – переходит из четырехвалентного в трехвалентное состояние.

Вторичные химические источники тока (аккумуляторы) после разряда, т.е. после израсходования активных масс могут быть приведены в рабочее состояние пропусканием электрического тока через элемент в обратном направлении. Если в рассмотренном выше примере заменить диоксид марганца (который при определенных условиях тоже может обратимо работать в водном растворе) на оксид серебра Ag_2O , мы получим цинк-серебряный аккумулятор, т.к. пара Ag_2O/Ag способна к обратимому окислению–восстановлению в водном щелочном растворе. Токообразующая реакция здесь имеет вид:



По определению реакции окисления называют анодными реакциями, реакции восстановления – катодными реакциями. Поэтому при разряде химического источника тока анодом является отрицательный электрод «-», а катодом положительный электрод «+». Однако при заряде аккумулятора анод и катод меняются местами. Таким образом, термины «анод» и «катод» относятся не к полярности электродов, а к направлению тока. Основным типом первичных химических источников тока являются в настоящее время щелочные элементы $Zn-MnO_2$. Конструктивно элементы $Zn-MnO_2$ чаще всего выпускаются в двух вариантах: «цилиндрическом» и «дисковом» (называемом также монетной или пуговичной конструкцией). На рисунке 3.19 показан разрез цилиндрического набивного элемента $Zn-MnO_2$.

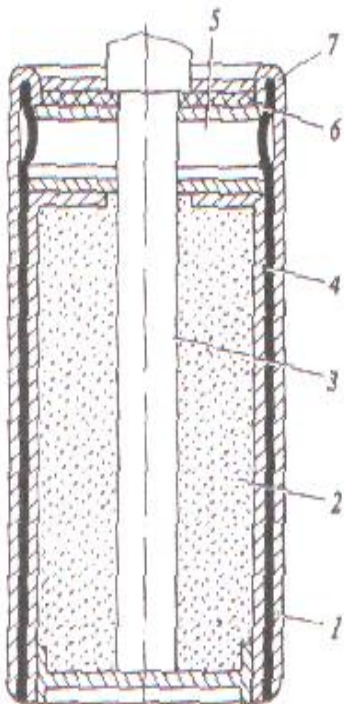


Рис. 3.19. Разрез цилиндрического набивного элемента $Zn-MnO_2$.

- 1 – отрицательный электрод (Zn);
- 2 – положительный электрод – брикет из спрессованной активной массы (MnO_2 + углерод), увлажненный электролитом ($NH_4Cl + ZnCl_2 + H_2O$ + загуститель (крахмал), в центре которого расположен токоотвод;
- 3 – угольный стержень;
- 4 – бумажный сепаратор с электролитной пастой;
- 5 – газовая камера для сбора газов, выделяющихся при разряде и саморазряде;
- 6 – изоляционная прокладка,
- 7 – полимерный или картонный футляр.

Для цилиндрических и дисковых (пуговичных) элементов используется также обозначение, состоящее из 4 или 5 цифр, например: типоразмер 1225 означает $\varnothing 12$ мм, $h = 2.5$ мм, типоразмер 18650 – $\varnothing 18$ мм, $h = 65.0$ мм.

Таблица 3.2

Обозначение типоразмеров цилиндрических–химических источников тока [6]

Ø, мм	Высота, мм	Объем, см ³	МЭК*	США	Россия
10.5	3		R08	O	
10.5	44.5		R03	AAA	
14.5	50.5	8.34	R6	AA	316
26.2	50		R14	C	343
34.2	61.5	56.5	R20	D	373

*МЭК – международная электротехническая комиссия.

Характеристики $Zn - MnO_2$ элементы имеют следующие характеристик.

Для $Zn - MnO_2$ элементов характерна сильная зависимость разрядной емкости от тока (рисунке 3.20). Поэтому понятиями «номинальная емкость» и «номинальный ток» пользуются редко. Промышленное производство первичных литиевых источников тока началось после 1970 года только после разработки неводных растворов электролитов, хотя источники кратковременного действия с водным электролитом были созданы ранее.

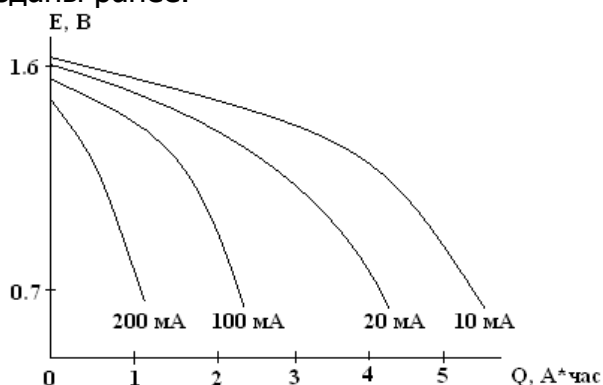
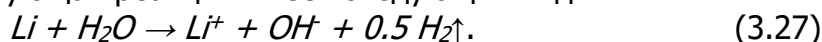


Рис. 3.20. Разрядные кривые элемента 373 при комнатной температуре

Электрохимическая система литий–вода может быть представлена в виде:

(–) $Li / LiOH / H_2O (Me), (+)$, где Me – инертный катод, не участвующий в токообразующей реакции. Его изготавливают из недорогих металлов (железо, сталь, никель). Суммарная токообразующая реакция имеет следующий вид:



Электролитом является щелочной раствор гидроксида лития, который образуется сам за счет реакции лития с водой. Такие химические источники тока изготавливают в резервном исполнении, т.е. без электролита. В неактивном состоянии источник может храниться длительное время (более 10 лет) и приводится в действие заполнением морской водой. Генерация электроэнергии протекает параллельно с прямой химической реакцией лития с водой, но эта реакция в концентрированной щелочи протекает довольно медленно, так что потери лития за счет саморастворения невелики. В результате источник Li/H_2O может работать несколько часов, обеспечивая очень высокие плотности тока (до 0.5 A/cm^2) и очень большую удельную энергию (до $3000 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$).

В качестве примера электрохимической системы с неводным электролитом рассмотрим систему Li/SO_2 . Это – электрохимическая система с жидким катодом–электролитом. Здесь, как и в системе Li/H_2O , в одном веществе (жидком диоксиде серы SO_2) объединены и растворитель, и активное катодное вещество –

окислитель. Электрохимическое восстановление растворителя в этом случае протекает на специальном инертном электроде, в качестве которого обычно используется углерод. Диоксид серы SO_2 находится в ячейке в жидком состоянии под небольшим давлением (3 атм.) Основная токообразующая реакция следующая:



Эта реакция протекает необратимо. Среднее разрядное напряжение в зависимости от скорости разряда и температуры составляет 2.9 – 2.7 В. Разрядные кривые очень плоские (рисунок 3.21).

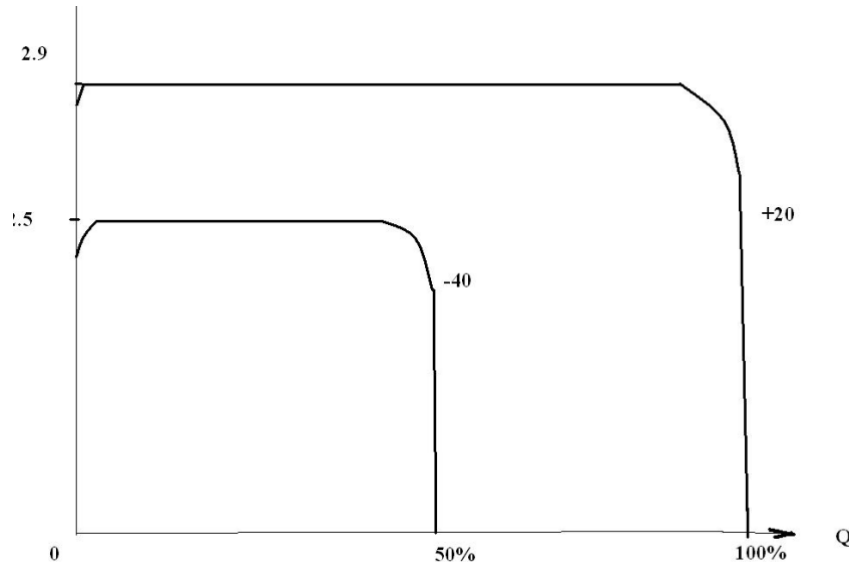
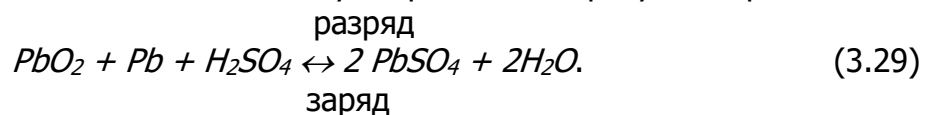


Рис. 3.21. Разрядные характеристики Li/SO_2 -элемента при различной температуре

Наиболее распространенным в настоящее время вторичным химическим источником тока является [свинцовый аккумулятор](#). Он обладает высоким и стабильным напряжением, мало меняющимся с температурой и с токами нагрузки. Ресурс его работы составляет от 100 до 1000 циклов. Суммарная токообразующая реакция:



Типичные зарядные и разрядные кривые СА имеют вид, показанный на рисунке 3.22. Конечное напряжение разряда ниже начального на 0.2 В и составляет 1.8 В для малых токов и 1.2 – 1.5 В для больших. Вторая половина заряда может сопровождаться выделением O_2 на положительном электроде, поэтому отдача по емкости будет меньше 1.

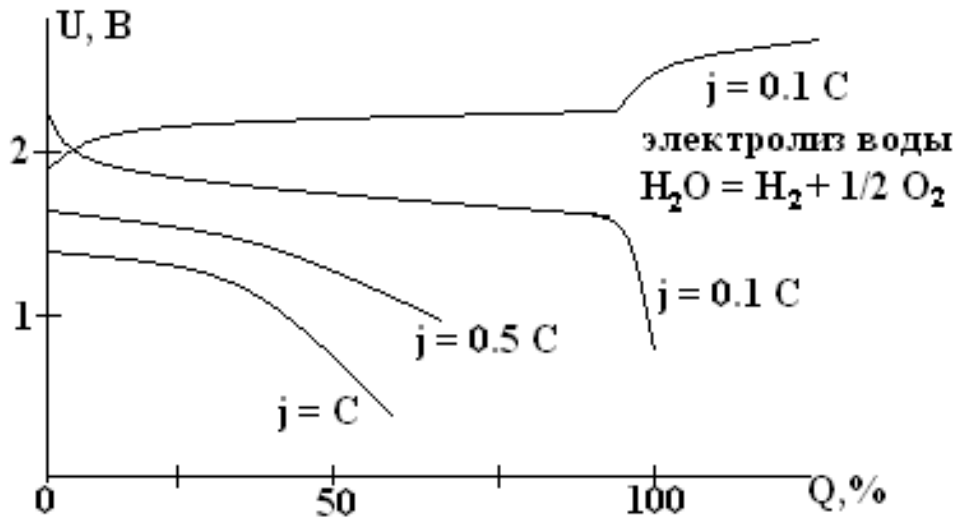


Рис. 3.22. Зарядные и разрядные характеристики свинцового аккумулятора при различной токовой нагрузке

Для достижения полного заряда его продолжают после скачка напряжения до 2.6 – 2.7 В при обильном выделении H_2 и O_2 на обоих электродах. Нормальное состояние свинцового аккумулятора – полностью заряженное. Конструкция – призматический баночный пластиковый моноблок. Моноблок разделен на отдельные ячейки, соединенные последовательно. Аккумулятор, дающий 12 В, состоит из 6 таких ячеек. В каждой находится электродный блок, состоящий из вертикальных положительных и отрицательных пластин, погруженных в электролит. Устройство свинцового аккумулятора представлено на рисунке 3.32.

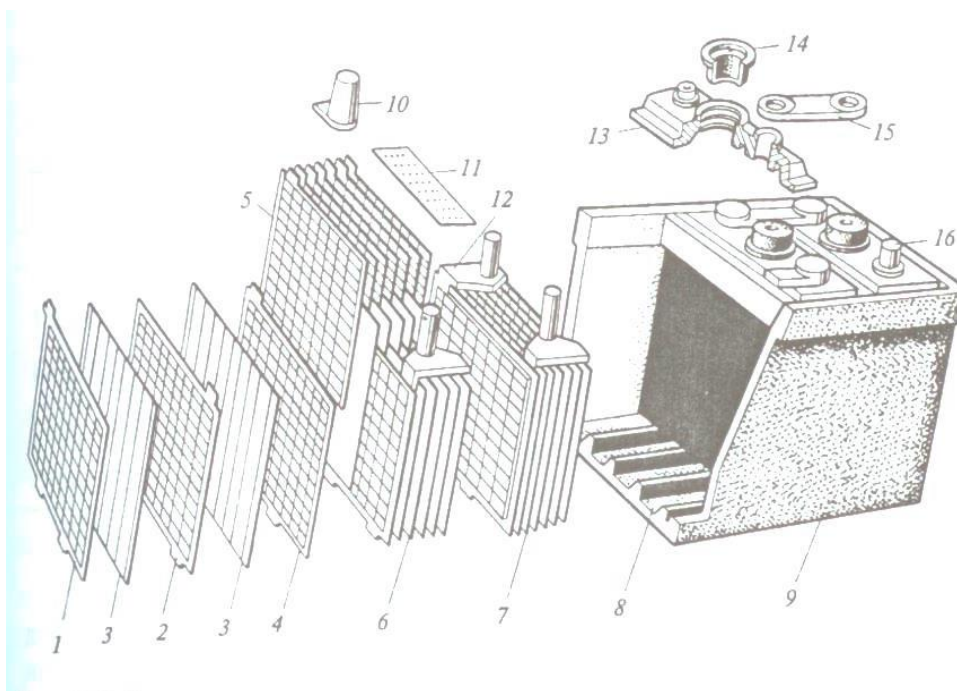
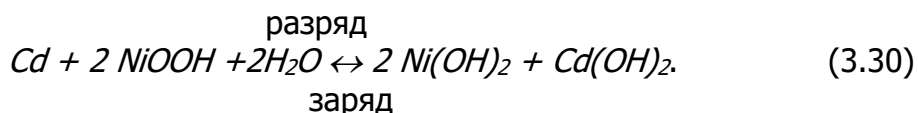


Рис. 3.23. Устройство свинцового аккумулятора: 1 – электрод отрицательный крайний; 2 – электрод положительный; 3 – сепаратор; 4 – электрод положительный; 5 – полублок электродов отрицательных; 6 – полублок электродов положительных; 7 – блок электродов; 8 – опорная призма; 9 – моноблок; 10 – борн; 11 – щиток

предохранительный; 12 – мостик; 13 – крышка аккумулятора; 14 – пробка вентиляционная; 15 – межэлементные соединения; 16 – полюсный вывод

Никель–кадмиевые (НК) и никель–железные (НЖ) аккумуляторы долгое время занимали второе место в мире после СА по распространенности.

Удельная энергия НК и НЖ аккумуляторов практически такая же, как у свинцовых, но они имеют гораздо больший ресурс – до 2000 циклов и могут изготавливаться в полностью герметичном исполнении, не требующем никакого ухода. Суммарную токообразующую реакцию в НК аккумуляторе можно записать в упрощенном виде так:



(На положительном электроде протекают более сложные процессы, так как оксиды никеля существуют в нескольких модификациях, различающихся степенью гидратации, т. е. как $NiO_x \cdot yH_2O$). Для НЖ – реакции аналогичные. На рисунке 3.23 представлены зарядные и разрядные кривые для НК–аккумулятора.

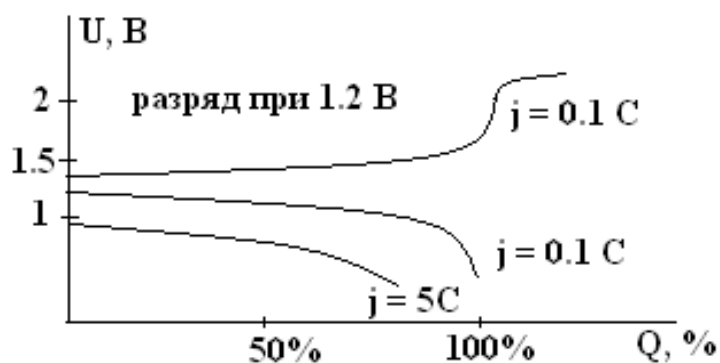
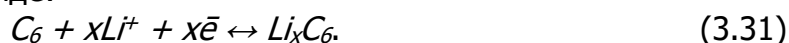


Рис. 3.24. Зарядные разрядные кривые никель-кадмиевого аккумулятора

Создать электрохимическую систему с многократным растворением–осаждением металлического лития до настоящего времени не удалось. Выход из этой ситуации был найден в использовании соединений внедрения для изготовления не только положительного, но и отрицательного электродов. Такой вариант был назван литий–ионным аккумулятором (*Li-ion battery*). В этих аккумуляторах отрицательный электрод изготовлен из углерода, в который ионы лития внедряются при заряде и извлекаются обратно при разряде:



То же происходит и на катоде, так что ионы лития совершают «челночные» перемещения между анодом и катодом. Использование углеродной матрицы сняло проблему катодного осаждения лития.

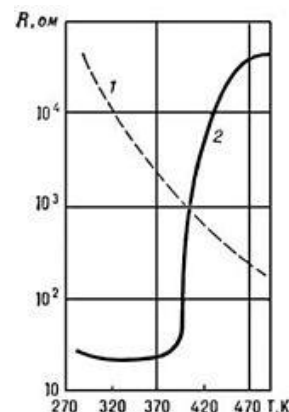
Как правило, литий-ионные аккумуляторы выпускаются в цилиндрическом и призматическом вариантах. Дальнейшее развитие литиевых источников тока, как считается, будет происходить как в направлении разработки сверхтонких конструкций, так и в направлении создания крупных и мощных *Li-ion battery* (например, для автомобильной промышленности).

3.8. Контрольные вопросы

1. Какова зависимость изменения электрического сопротивления проводника от деформации?
2. Для решения каких измерительных задач могут быть использованы тензорезисторы?
3. В чем заключается сущность термоэлектрического эффекта?
4. В чем заключается сущность терморезистивного преобразования температуры в электрический сигнал?
5. В чем заключается физическая сущность понятий: работа выхода из металла, контактная разность потенциалов?
6. В чем суть явлений Зеебека, Пельтье, Томсона?
7. Как объяснить эффект Холла и его использование в электроизмерительных датчиках?
8. Что такое магниторезистивный эффект?
9. Как зависит электропроводность электролитов от температуры?
10. В чем суть физико-химических принципов работы аккумуляторов?
11. Как устроены цинковые, никель-кадмиевые и литий-ионные аккумуляторы?

3.9. Тестовые задания [8, 9]

1. На рисунке 3.25 представлены зависимости сопротивления терморезисторов от температуры, (кривые 1 и 2). Температурный коэффициент сопротивления (ТКС):



- Варианты ответов:**
- а) 1 – ТКС < 0, 2 – ТКС > 0;
 - б) 1 – ТКС > 0, 2 – ТКС < 0;
 - в) 1 – ТКС < 0, 2 – ТКС < 0;
 - г) 1 – ТКС = const, 2 – ТКС = const.

Рис. 3.25.

2. На рисунке 3.26 представлена цепь, состоящая из двух проводников А и В из разных металлов. Места контактов поддерживаются при разной температуре этих металлов. Вольтметр, включенный

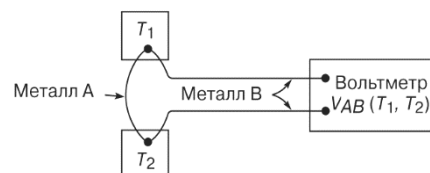


Рис. 3.26

между концами разомкнутой цепи, покажет напряжение, природа которого:

- Варианты ответов:**
- а) – ЭДС индукции; **б) – термо ЭДС;**
 - в) – ЭДС – самоиндукции;
 - г) – ЭДС гальванического элемента.

3. Верны ли следующие утверждения:

- 1) при соединении двух проводников из различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов, которая зависит только от химического состава и температуры;
- 2) разность потенциалов между концами цепи, состоящей из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников. Верными являются утверждения.

Варианты ответов:

- а) только 1; б) только 2; **в)** и 1 и 2; г) ни 1 ни 2.

4. Выберите из ниже приведенных явлений то, которое называется явлением Зеебека.

Варианты ответов:

- а)** явление возникновения тока в замкнутой цепи, составленной из двух разнородных металлов, спаи которых поддерживаются при различной температуре;
- б) явление возникновения разности температур на двух спае разнородных металлов, образующих замкнутую цепь, по которой протекает ток;
- в) явление, сопровождающееся выделением (поглощением) тепла, дополнительного к теплу Джоуля-Ленца, при прохождении тока по однородному проводнику, вдоль которого создан градиент температуры.

5. Изменится ли разность потенциалов двух разнородных металлов, приведенных в контакт, если между этими металлами поместить третий, отличный от двух первых.

Варианты ответов: **а)** не изменится;

б) увеличится;

в) уменьшится;

г) а priori сказать нельзя, все зависит от природы металлов.

6. Каков физический смысл коэффициента пропорциональности в выражении термо – ЭДС

$$\mathcal{E} = \alpha_{AB}(T_1 - T_2)$$

Варианты ответов:

а) численно равен термо ЭДС, возникающей при разности температур спаев $(T_1 - T_2)$;

б) численно равен отношению разности работ выхода электронов из металлов для двух разнородных металлов, составляющих термоду, к величине заряда электрона;

в) численно равен величине термо ЭДС, возникающей при температуре спаев, равной одному градусу Кельвина.

7. Выберите факторы, от которых не зависит контактная разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 :$$

- 1) от химической природы контактирующих металлов;
- 2) от температуры контактирующих металлов;
- 3) от состояния поверхности;
- 4) от площади соприкосновения.

Верными являются: а) 1 и 2; б) 1, 2 и 3; в) 2, 3 и 4; **г) 3 и 4;** д) 1, 2 и 3.

8. Закону (явлению) поставьте в соответствие математическое выражение:

I) Закон Фарадея	1) $\varepsilon = \alpha_{AB}(T_1 - T_2)$
II) Закон Вольта	2) $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} + \frac{A_{12}}{e}$
III) Явление Зеебека	3) $Q = \Pi_{AB} I t$
IV) Явление Пельтье	4) $dQ = \tau I \frac{dT}{dI} dI$
V) Явление Томсона	5) $m = \frac{1}{F_A} \frac{A}{Z} I t$

Варианты ответов:

- а) I- 5; II – 2; III – 1; IV- 3; V-4; б) I- 1; II- 2; III- 3; IV- 4; V- 5;
 в) I- 2; II- 2; III-4; IV-3; V- 5; г) I- 3; II - 2; III-5; IV- 4; V- 1;

9. В замкнутой цепи, составленной из двух металлических проводников 1 и 2 (рисунок 3.27) с температурами спаев T_1 (контакт А) и T_2 (контакт Б) течет ток. При условии, что $T_1 > T_2$ направление тока соответствует:

Варианты ответов:

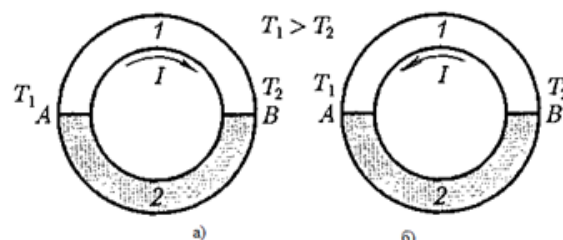


Рис. 3.27

10. В замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных металлических проводников 1 и 2, пропускают ток I' (рисунок 3.28). Направление движения электронов задано стрелками. При условии, что $T_1 > T_2$:

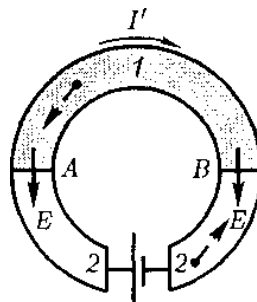


Рис. 3.28.

Варианты ответов:

- а) спай А будет охлаждаться, спай В нагреваться;
- б) спай А будет нагреваться, спай В будет охлаждаться
- в) оба спаия будут при одинаковой температуре.

11. Где используется эффект Зеебека?

- 1) для измерения давления и температуры; 2) для создания термопары;
- 3) для измерения температуры;
- 4) для генерации электрического тока.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 3 и 4; ж) 2 и 3; з) 1 и 3.

12. Внешняя контактная разность потенциалов обусловлена:

- 1) различием работ выхода; 2) разностью уровней Ферми;
- 3) поверхностными явлениями; 4) эффектом Зеебека.

Варианты ответов: а) 1; б) 2;
в) 3; г) 4;
д) 1 и 3; е) 1 и 4.

13. На приведенных ниже рисунках 3.29 показаны взаимные расположения векторов силы Лоренца \vec{F}_L , скорости заряженной частицы \vec{v} и магнитной индукции \vec{B} . Выберите рисунки, соответствующие верному ответу.

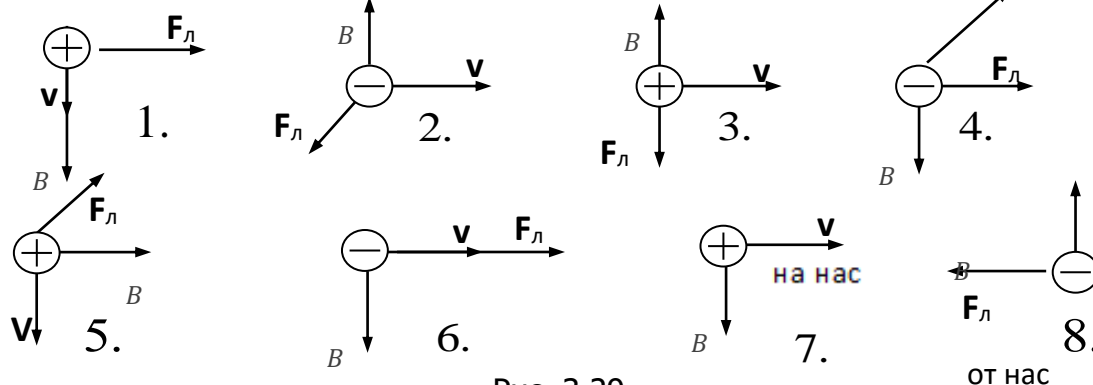


Рис. 3.29

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5; е) 6; ж) 7; з) 8.

14. Холловская разность потенциалов для золотой ленты толщины $l=10^{-4}$ м, по которой течет ток 10 А в магнитное поле 1Тл равна:

Варианты ответов:

а) $U=7,4 \cdot 10^{-6}$ В; б) $U=10^{-10}$ В; в) $U=1,4 \cdot 10^{-6}$ В; г) $U=2,5 \cdot 10^{-6}$ В; д) 0.

15. Полупроводник в виде тонкой пластины шириной 1см и длиной 10 см помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,2 Т. Вектор индукции перпендикулярен плоскости пластины. К концам пластины приложено постоянное напряжение 300 В, постоянная Холла $R_x = 0,1 \text{ м}^3/\text{К}$, удельное сопротивление $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Холловская разность потенциалов U_x на гранях пластины равна:

Варианты ответов: а) 1,2 В; б) 12 В; в) 0,12 В; г) 120 В.

16. Медная пластина размером $1 \cdot 10 \cdot 10$ мм помещена в магнитное поле с магнитной индукцией 1 Т. Холловская разность потенциалов составила 0,036 В. Коэффициент Холла для меди $5,5 \cdot 10^{-11}$ м³/Кл. На пластину подано напряжение 100 В. Удельное сопротивление меди равно:

Варианты ответов: а) $1,53 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; б) $15,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;
в) $10 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; г) $0,53 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;

17. Холловская разность потенциалов равна 303 мВ при напряжении 10 В, поданном на кристалл. Коэффициент Холла составляет $R_x = - 2,7 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл. Удельная проводимость кристалла кремния равна:

Варианты ответов: а) 112 Си/м; б) 16,7 Си/м; в) 1,5 Си/м; г) 25 Си/м.

18. Выберите правильное положения датчика в магнитном поле (рисунок 3.30): а) свободные носители заряда – электроны;

б) свободные носители заряда дырки:

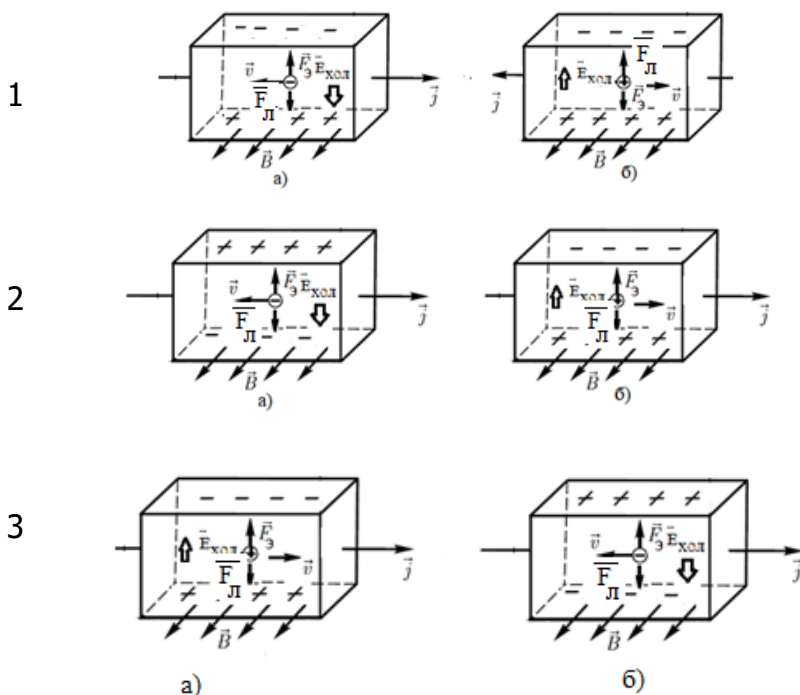


Рис. 3.30.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3.

19. Размер керамики $3 \cdot 15 \cdot 15$ мм. К образцу приложено напряжение 200 В. Магнитная индукция внешнего магнитного поля 1 Т. Холловская разность потенциалов 0,6 В. Коэффициент Холла $1,05 \cdot 10^{-8}$ мЗ/Кл. Электропроводность электропроводящей керамики равна:

Варианты ответов: а) $2,86 \cdot 10^5$ Си; б) $1,86 \cdot 10^4$ Ом м; в) $12,6 \cdot 10^{-1}$ Си;

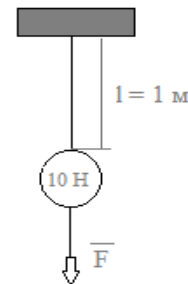
г) $0,86 \cdot 10^2$ Си.

20. Размеры медной пластины $1 \cdot 10 \cdot 10$ мм в нормальных условиях при внешней напряженности магнитного поля $H = 3,2 \cdot 10^6$ А/м, когда тангенциальная напряженность электрического поля составила $E_{\tau} = 100$ В/м. Относительная диэлектрическая проницаемость для меди $4,64 \cdot 10^{14}$. Относительное изменение удельного сопротивления для медной пластины:

Варианты ответов:

а) $\Delta\rho/\rho = 3,6\%$; б) $\Delta\rho/\rho = 100\%$; в) $\Delta\rho/\rho = 36\%$; г) $\Delta\rho/\rho = 15\%$.

21. Проводник длиной $l = 1$ м и диаметром $d = 0,2$ мм, один конец которого закреплен, а к другому подвешен груз весом 10 Н (рисунок 3.31). Материал проводника – сталь (удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; модуль продольной упругости $E = 210$ кН/мм²; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел упругости $\sigma_{\text{п}} = 400$ Н/мм²). Абсолютное и относительное изменения электрического сопротивления проводника:



Варианты ответов: а) $\Delta R = 7,72 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\frac{\Delta R}{R} = 2,425 \cdot 10^{-3}$ Ом;

Рис. 3.31.

б) $\Delta R = 7,72 \cdot 10^{-5}$ Ом; $\frac{\Delta R}{R} = 1,425 \cdot 10^{-3}$ Ом;

в) $\Delta R = 1,32 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\frac{\Delta R}{R} = 12,425 \cdot 10^{-3}$ Ом;

г) $\Delta R = 0$ Ом; $\frac{\Delta R}{R} = 2,425 \cdot 10^{-3}$ Ом.

22. Электролиз – это совокупность электрохимических процессов, происходящих на электродах, погруженных в электролит, при прохождении по нему электрического тока. В результате:

1) на аноде происходит электрохимическое окисление – отрицательно заряженные ионы становятся нейтральными атомами и выделяются из раствора, а на катоде – восстановительная реакция: положительные ионы получают недостающие

электроны;

2) на аноде происходит восстановительная реакция: положительные ионы получают недостающие электроны, а на катоде происходит электрохимическое окисление – отрицательно заряженные ионы становятся нейтральными атомами и выделяются из раствора;

3) в результате электролиза вещества, входящие в состав электролита, выделяются в свободном виде.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) нет ответов.

4. МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ И ВЕЩЕСТВЕ

4.1. Магнитное поле проводников с током [1, 2, 3, 5]

Магнитное поле проявляется при его воздействии на движущиеся электрически заряженные частицы, вместе с тем и само магнитное поле порождается движением электрических зарядов, например, линейным проводником, или замкнутым контуром, по которым протекает электрический ток.

Вектор магнитной индукции как основная характеристика магнитного поля, определяется силой \vec{F} , с которой магнитное поле действует на заряд q , движущийся в магнитном поле со скоростью

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]. \quad (4.1)$$

Способность электрического тока возбуждать магнитное поле характеризуется вектором магнитного момента \vec{M} . Модуль вектора \vec{M} в простейшем случае равен произведению силы тока на площадь контура, а направление совпадает с нормалью \vec{n} к плоскости контура:

$$\vec{M} = IS\vec{n}. \quad (4.2)$$

Количество магнитных силовых линий, проходящих сквозь поверхность площадью S , называют магнитным потоком:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}. \quad (4.3)$$

Направление вектора элементарной площадки $d\vec{S}$ совпадает с нормалью \vec{n} к этой площадке. Если магнитное поле образовано током, текущим в контуре, то говорят о потоке, сцепленном с данным контуром – это поток через произвольную поверхность S , которая опирается на замкнутый контур.

$$\Phi = LI. \quad (4.4)$$

Величина этого потока пропорциональна силе тока I .

Здесь L – индуктивность контура. Индуктивность контура зависит от его формы и размеров, а также от магнитных свойств среды, окружающей контур. Факторы, влияющие на значение индуктивности можно проиллюстрировать на примерах контуров простейших геометрических форм, находящихся в вакууме или воздухе. Индуктивность двухпроводной линии (рисунок 4.1, а) с высокой степенью приближения описывается выражением:

$$L \approx \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{2a}{r}, \quad (4.5)$$

где l – длина двухпроводной линии, $2a$ – расстояние между центрами проводников, r – радиус проводников.

Двухпроводная линия может быть использована в качестве модели одновиткового контура прямоугольной формы, длина которой многократно превышает ее ширину.

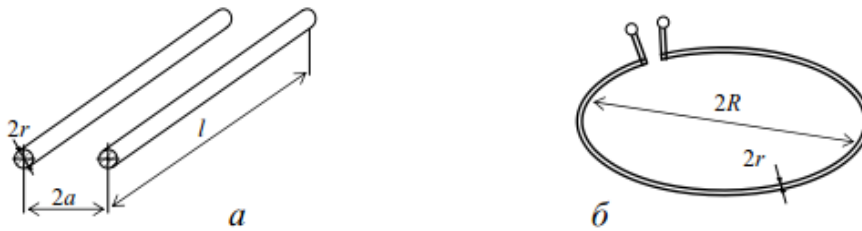


Рис. 4.1. Одновитковые контуры простейших геометрических форм: двухпроводная линия (а); круглый виток (б) [5]

Двухпроводная линия может быть использована в качестве модели одновиткового контура прямоугольной формы, длина которой многократно превышает ее ширину.

Аналогичные выводы вытекают из анализа выражения для определения индуктивности круглого одновиткового контура (рисунок 4.1, б).

$$L \approx \frac{\mu_0 R}{\pi} \ln \frac{2R}{r}, \quad (4.6)$$

где R – радиус контура, r – радиус проводника контура. Для получения больших индуктивностей применяют многовитковые контуры, для которых

$$L = \frac{\psi}{I}, \quad (4.7)$$

где $\psi = LI$ – потокосцепление, т. е. общий магнитный поток, сцепленный со всеми

витками контура: $\psi = \sum_{i=1}^w \Phi_i$, где w – число витков контура, i – номер витка, с

которым сцеплен поток Φ_i .

Если электрическая емкость конденсатора характеризует способность конденсатора накапливать электрический заряд, то индуктивность контура – способность последнего создавать магнитное поле. Чем выше значение индуктивности, тем более сильное магнитное поле создает данный контур при фиксированном значении силы тока I .

На рисунке 4.2 изображено магнитное поле многовиткового контура – плоской катушки, содержащей w одинаковых витков. Если контур имеет жесткую конструкцию и вблизи ее отсутствуют ферромагнитные тела, то индуктивность такого контура постоянна.

Многовитковые контуры, длина которых существенно больше их поперечного размера называются соленоидами.

Физика

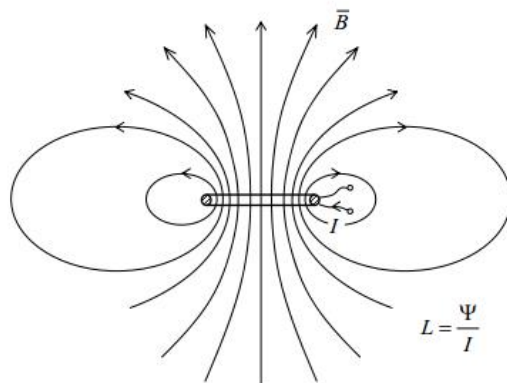


Рис. 4.2. Магнитное поле многовиткового контура током [5]

Индуктивность цилиндрического соленоида определяется выражением:

$$L = \mu_0 w^2 \frac{\pi D_{\text{ср}}^2}{4l} k_l, \quad (4.8)$$

где $D_{\text{ср}}$ – диаметр среднего витка; l – длина соленоида; w – число витков; k_l – множитель, зависящий от соотношения геометрических размеров l и $D_{\text{ср}}$. Для длинных соленоидов $l = 10 D_{\text{ср}}$ множитель $k_l = 1$.

Широкое применение в измерительной технике находят многовитковые контуры (обмотки) с ферромагнитными сердечниками различной конструкции. На рисунке 4.3 показана простейшая магнитная цепь с замкнутым ферромагнитным сердечником постоянного сечения. Особенность такой магнитной цепи заключается в том, что практически весь магнитный поток, создаваемый электрическим током I обмотки, замыкается по магнитопроводу, магнитная проницаемость которого на несколько порядков превышает магнитную проницаемость воздуха. В данном случае магнитными потоками рассеяния можно пренебречь, а магнитное поле в магнитопроводе считать однородным.

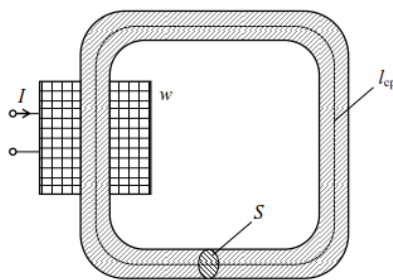


Рис. 4.3. Обмотка с замкнутым ферромагнитным сердечником (магнитопроводом). [5]

Последнее, как правило, справедливо для постоянного электрического тока в обмотке и тока низкой частоты. С учетом принятых допущений магнитный поток Φ в сечении S магнитопровода

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu HS, \quad (4.9)$$

Функциональная связь между силой тока I в обмотке и напряжённостью поля H устанавливается законом полного тока:

$$\oint_L H dl = Hl_{\text{ср}} = Iw, \quad (4.10)$$

где $l_{\text{ср}}$ – длина средней силовой линии; w – число витков обмотки. Тогда выражение для индуктивности обмотки приобретает вид:

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{w\Phi}{I} = w^2 \frac{S\mu_0\mu}{l_{\text{ср}}} = \frac{w^2}{r_M}. \quad (4.11)$$

Величина $r_M = \frac{l_{\text{ср}}}{S\mu_0\mu}$ называется магнитным сопротивлением. Здесь μ – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода, μ_0 – магнитная постоянная. Тогда магнитный поток в сечении магнитопровода

$$\Phi = \frac{Iw}{r_M}. \quad (4.12)$$

Последнее соотношение называют законом магнитной цепи, в котором произведение Iw – магнитодвижущая сила. Зависимость индуктивности обмотки от геометрических и магнитных свойств всех участков магнитной цепи используется, например, для измерения толщины немагнитного покрытия на ферромагнитной пластине, или поперечного размера ферромагнитного стержня (рисунок 4.4, а, б).

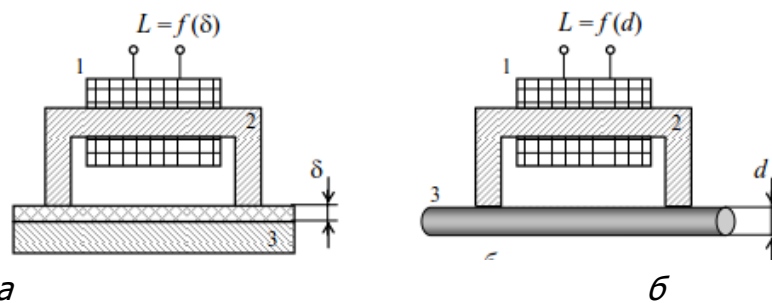


Рис. 4.4. Измерение толщины немагнитного покрытия ферромагнитной пластины (а) и диаметра ферромагнитного стержня (б): 1 – обмотка; 2 – магнитопровод; 3 – ферромагнитный объект [5]

4.2. Явление электромагнитной индукции

Это явление можно сформулировать следующим образом. Во всяком проводнике, который пересекает силовые линии магнитного поля или пересекается ими, появляется электродвижущая сила (ЭДС индукции)

$$\varepsilon = BLV \sin \alpha. \quad (4.13)$$

Здесь B – индукция магнитного поля, силовые линии которого пересекает проводник; l – длина проводника, V – линейная скорость движения проводника, α – угол, под которым он пересекает силовые линии. Это выражение позволяет определять ЭДС индукции в проводнике при любом его положении относительно силовых линий магнитного поля (рисунок 4.5).

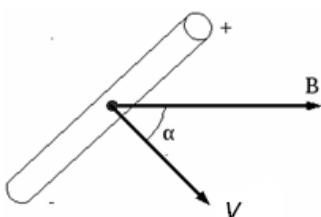


Рис. 4.5. Движущийся проводник в магнитном поле

Закон электромагнитной индукции, открытый [Фарадеем](#), применим не только к отдельным проводникам, но и к любому замкнутому контуру, образованному проводником. ЭДС индукции, возникающая в таком контуре, пронизываемом изменяющимся во времени магнитным потоком согласно [закону Фарадея](#) выражается в виде:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.14)$$

Здесь знак минус – правило [Ленца](#) – определяет направление индукционного тока.

При изменении магнитного потока сквозь многовитковый контур, в соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС наводится в каждом его витке. Суммарная ЭДС составит:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_w = - \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w). \quad (4.15)$$

Алгебраическая сумма потоков, сцепленных с отдельными витками, в правой части последнего равенства является [потокосцеплением](#):

$$\psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w. \quad (4.16)$$

Таким образом, суммарная ЭДС, наведённая в соответствии с законом электромагнитной индукции, в замкнутом электрическом контуре

$$\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt}. \quad (4.17)$$

Если каждый виток сцеплен с одинаковым магнитным потоком, то

$$\varepsilon = -W \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.18)$$

В общем случае магнитный поток определяется интегрированием скалярного произведения векторов магнитной индукции \vec{B} и площади $d\vec{S}$ элементарного участка поверхности, ограниченной контуром среднего витка, по всей площади поверхности S . Направление вектора элементарной площадки $d\vec{S}$ совпадает с нормалью \vec{n} к этой площадке (рисунок 4.6). Если принять магнитное поле в ограниченном пространстве, занимаемом контуром, однородным, то магнитный поток может быть вычислен по формуле:

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (4.19)$$

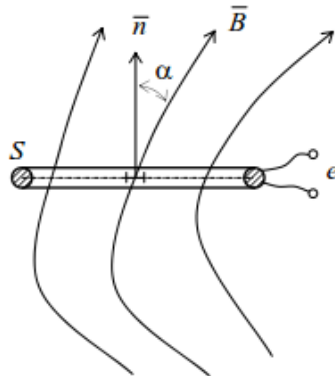


Рис. 4.6. Многовитковый контур в неоднородном магнитном поле [5]

Если принять магнитное поле в ограниченном пространстве, занимаемом контуром, однородным, то магнитный поток может быть вычислен по формуле:

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (4.20)$$

где α - угол между направлениями векторов индукции магнитного поля и нормали к плоскости среднего витка контура. Тогда

$$\varepsilon = -wS \frac{d(B \cos \alpha)}{dt}. \quad (4.21)$$

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся случаи электромагнитной индукции.

Неподвижная индукционная катушка в переменном гармоническом магнитном поле.

В этом случае $\alpha = \text{const}$ и $B = B_m \sin \omega t$.

Здесь B_m – амплитуда индукции магнитного поля; ω – циклическая частота.

Дифференцированием по времени получаем:

$$\varepsilon = -wS \cos \alpha B_m \omega \cos \omega t. \quad (4.22)$$

Анализ этого выражения показывает, что ЭДС индукции в случае гармонического магнитного поля также изменяется по гармоническому закону. Амплитуда ЭДС равна произведению $-wS \cos \alpha \cdot B_m \omega$ а фаза ЭДС отстаёт от фазы индукции на угол 90° . Зависимость амплитуды ЭДС индукции от параметров гармонического магнитного поля (амплитуды индукции, частоты, ориентации силовых линий относительно катушки) и фазы ЭДС от фазы индукции магнитного поля позволяет на основе измерения ЭДС получать измерительную информацию об этих параметрах.

1. Вращающийся многовитковый контур в постоянном магнитном поле. Для использования индукционного преобразования в постоянных магнитных полях рассматривается вращение многовиткового контура относительно оси симметрии.

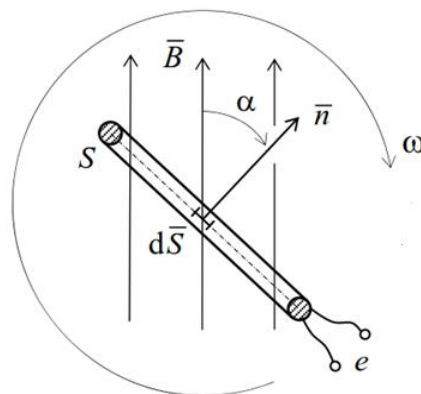


Рис. 4.7. Многовитковый контур, вращающийся в магнитном поле [5]

Здесь $B = B_m$ при $\alpha = 0$ и $\alpha = \omega t$, где ω – угловая скорость вращения.

Тогда

$$\Psi = wSB_m \cos \omega t, \quad (4.23)$$

и ЭДС индукции

$$\varepsilon = -wSB_m \omega \sin \omega t. \quad (4.24)$$

Таким образом, ЭДС, возникающая в многовитковом контуре, вращающемся в постоянном магнитном поле с угловой частотой ω , имеет гармонический

характер. Амплитуда ЭДС прямо пропорциональна индукции поля и частоте вращения, что дает возможность использовать рассмотренное явление для измерения индукции магнитного поля при известной частоте вращения, или частоты вращения при известной индукции. Это же явление используется в [генераторах переменного тока](#).

3. В результате пересечения проводника с током силовыми линиями переменного магнитного поля, созданного самим этим током, в проводнике наводится ЭДС, называемая [ЭДС самоиндукции](#). Её величина пропорциональна скорости изменения тока

$$\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt}, \quad (4.25)$$

где L – индуктивность проводника. Направление индукционного тока, определяемое правилом Ленца, демонстрируется временной зависимостью [токов замыкания и размыкания](#).

Поток через контур, созданный током самого этого контура, образует потокосцепление, называемое потокосцеплением самоиндукции ψ_k . При изменении этого потока в контуре индуцируется ЭДС самоиндукции,

$$\varepsilon_L = -L_k \frac{di}{dt}, \quad (4.26)$$

где L_k – коэффициент самоиндукции или собственная индуктивность контура:

$$L_k = \frac{\Psi_k}{I_k}. \quad (4.27)$$

4. ЭДС взаимной индукции. Если в непосредственной близости друг от друга расположить два контура, или иначе две катушки с токами I_1 и I_2 , то линии магнитного поля, созданного одной катушкой, будут пересекать площадь, ограниченную витками другой катушки. Поэтому при всяком изменении тока в одной катушке, в другой будет наводиться ЭДС. Эту ЭДС называют [ЭДС взаимной индукции](#).

Величина ЭДС взаимной индукции определяется формулой, которая мало отличается от аналогичной формулы для ЭДС самоиндукции. Для второй и первой катушки она имеет вид соответственно

$$\varepsilon_2 = -M_{12} \frac{dI_1}{dt} \quad \text{и} \quad \varepsilon_1 = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}. \quad (4.28)$$

Здесь $\frac{dI_1}{dt}$ и $\frac{dI_2}{dt}$ – скорости изменения токов в катушках, M_{12} и M_{21} – коэффициенты взаимной индукции.

Для случая, когда обе катушки (обмотки) имеют общий замкнутый ферромагнитный сердечник, можно считать, что магнитный поток, создаваемый током первой катушки, полностью проходит через витки обеих катушек, т. е. полностью сцеплен с витками обеих катушек. В этом случае коэффициенты взаимной индукции, M_{12} и M_{21} равны между собой и определяются формулой

$$M_{12} = M_{21} = M = \frac{w_1 \cdot w_2 \cdot S \cdot \mu \cdot \mu_0}{l_\pi} \quad (4.29)$$

где w_1 и w_2 – число витков катушек, S – площадь поперечного сечения сердечника, l_π – длина его периметра в направлении замыкания линий магнитного поля, μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника. Коэффициент взаимной индукции можно выразить также и через индуктивность каждой из катушек. При отсутствии магнитного рассеяния он составит

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (4.30)$$

где L_1 и L_2 – индуктивность первой и второй катушек. При наличии рассеяния формула дополняется коэффициентом связи K между катушками

$$M = K\sqrt{L_1 \cdot L_2}. \quad (4.31)$$

Этот коэффициент зависит от взаимного расположения катушек и может изменяться от нуля, когда магнитная связь между катушками отсутствует до единицы, как в рассмотренном случае соединения их общим ферромагнитным сердечником.

Взаимная индуктивность – величина, характеризующая магнитную связь двух или более электрических контуров (катушек). Численно взаимная индуктивность M_{12} двух катушек: одной с числом витков w_1 , в которой протекает электрический ток I_1 , и другой с числом витков w_2 , находящейся в магнитном поле электрического тока первой катушки

(рисунок 4.8), равна отношению потокосцепления Ψ_{12} магнитного поля электрического тока первой катушки со второй катушкой и силы тока первой катушки:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}. \quad (4.32)$$

Если электрический ток протекает по второй обмотке (рис. 39), то взаимная индуктивность M_{21} определяется выражением:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}, \quad (4.33)$$

где I_2 – ток второй обмотки; Ψ_{21} – потокосцепление магнитного поля электрического тока второй обмотки с первой обмоткой. Важно отметить, что $M_{21} = M_{12}$.

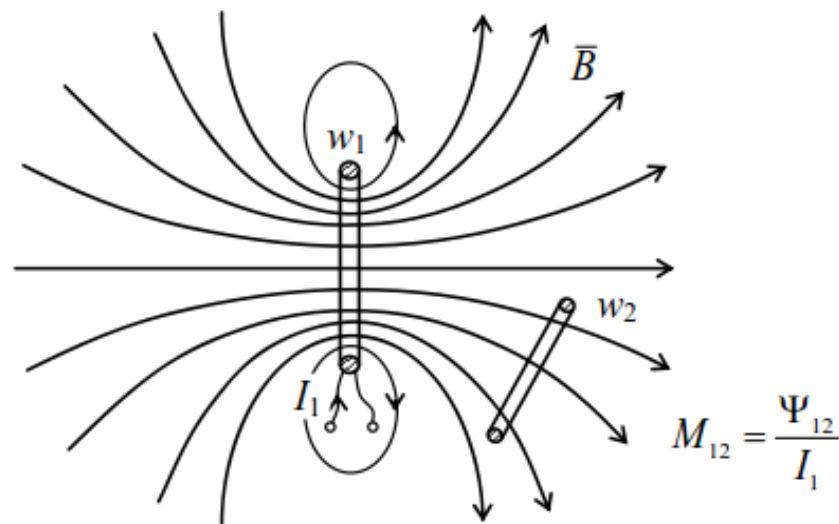


Рис. 4.8. Катушка с числом витков w_2 в магнитном поле электрического тока катушки с числом витков w_1 [5]

Очевидно, что взаимная индуктивность обмоток определяется не только интенсивностью и распределением в пространстве магнитного поля обмотки с током, но зависит от взаимного расположения обмоток (расстояния между обмотками и их ориентации в пространстве). Для случая замкнутого

магнитопровода постоянного сечения (рисунок 4.3) при наличии на магнитопроводе двух обмоток с числами витков w_1 и w_2 , их взаимная индуктивность будет равна:

$$M = w_1 w_2 \frac{S \mu_0 \mu}{l_{\text{ср}}}. \quad (4.34)$$

Датчики, принцип действия которых основан на явлении электромагнитной индукции, широко используются во многих системах автоматического управления двигателем (ЭСАУ-Д). Модель активного электромагнитного датчика частоты вращения и углового положения коленчатого вала ДВС представлена на рисунке 4.9, а – модель датчика, его конструкция – на рисунке 4.9, б, стандартная форма сигнала – рисунок 4.9, в.

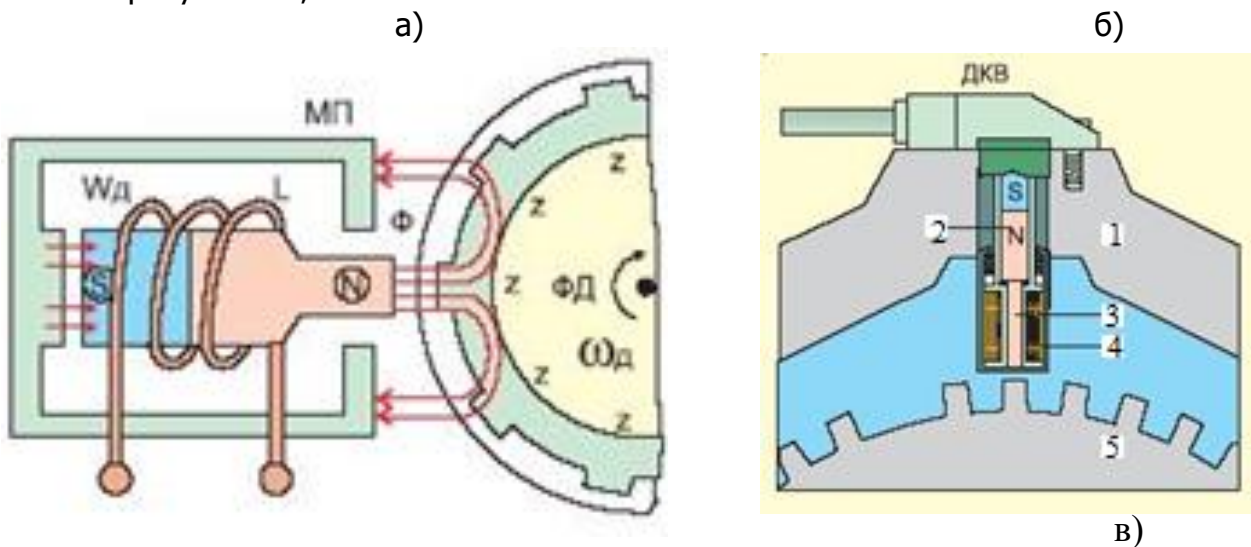


Рис.4.9. Электромагнитный датчик системы ЭСАУ-Д:

- а – модель датчика (обозначения в тексте);
- б – конструкция датчика: 1 – картер маховика ДВС;
- 2 – постоянный магнит; 3 – ферромагнитный сердечник;
- 4 – катушка; 5 – специальный зубчатый диск на коленвале;
- в – стандартная форма сигнала электромагнитного датчик;

Как видно из рисунка, основными составными частями такого датчика являются катушка индуктивности L с постоянным магнитом NS (преобразователь) и зубчатый диск ФД, зубцы Z которого выполнены из ферромагнитного материала, а сам диск располагается либо на переднем, либо на заднем торце коленвала ДВС. В соответствии с основным законом электромагнитной индукции изменение магнитного потока Φ через витки W_d катушки индуктивности L вызывает возникновение в них электродвижущей силы:

$$\varepsilon = -W \frac{d\Phi}{dt}$$

Согласно представленной модели (см. рис.4.9, а) для реализации описанного принципа в электромагнитном датчике в его катушке L находится магнитный сердечник NS . Один полюс магнита (например, северный N) направлен в сторону зубцов Z ферромагнитного диска ФД, а другой (южный S) присоединён к цилиндрическому магнитопроводу МП. Таким образом магнитопровод MP и сердечник вместе с зубцами Z ферромагнитного диска ФД образуют рабочий воздушный зазор датчика. При вращении диска ФД (коленвала ДВС) величина рабочего воздушного зазора постоянно изменяется от минимума, когда зубец находится напротив сердечника катушки (соответствует чертежу рисунка), до максимума, когда сердечник попадает на впадину между зубцами. Изменение ширины рабочего зазора вызывает изменение магнитного сопротивления магнитопровода, а значит и магнитного потока Φ через витки W_d катушки L . Это и приводит к появлению знакопеременной ЭДС, нулевое значение которой соответствует середине вершины (центру) зубца. Кроме частоты сигнала соответствующая электронная схема может легко зафиксировать и положение нулевой точки. Это позволяет достаточно точно определять угловое положение каждого зубца диска (а значит и коленвала) относительно точки начала отсчета. Стандартная форма сигнала индуктивного датчика показана на рисунке 4.9, в.

4.3. Вещество в магнитном поле

4.3.1. Классификация и основные свойства магнетиков

Сила взаимодействия проводников с током, которое осуществляется посредством магнитного поля, зависит от среды. Для характеристики магнитных свойств вещества усиливать или ослаблять это взаимодействие, используют величину относительной магнитной проницаемости вещества μ , а для описания магнитного поля проводника с током вне зависимости от среды применяют величину, называемую напряжённостью магнитного поля \vec{H} . Тогда магнитная индукция: $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, где μ_0 – магнитная постоянная.

Для характеристики способности вещества создавать собственное магнитное поле при воздействии на него внешнего магнитного поля \vec{H} вводится векторная величина $\vec{J} = \chi_m \vec{H}$, называемая намагниченностью, равная магнитному моменту единицы объема вещества. Здесь χ_m – магнитная восприимчивость: $\chi_m = \mu - 1$. Таким образом

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}). \quad (4.35)$$

В зависимости от модуля и знака восприимчивости χ_m все вещества делят на [диамагнетики](#), [парамагнетики](#) и ферромагнетики.

[Диамагнетики](#) имеют отрицательную магнитную восприимчивость порядка $10^{-7} \dots 10^{-5}$, т. е. [эти вещества намагничиваются во внешнем магнитном поле](#) в направлении, противоположном вектору напряженности внешнего поля. К диамагнетикам относятся Si, P, Bi, Zn, Cu , а также некоторые органические и неорганические соединения.

[Парамагнетики](#) имеют положительную магнитную восприимчивость порядка $10^{-5} \dots 10^{-1}$, т.е. [эти вещества намагничиваются во внешнем магнитном поле по направлению поля](#). К ним относятся, например: Al, Na, Ti, V, U , некоторые соли.

Магнитные свойства диамагнетиков и парамагнетиков в технике и средствах измерений использования не нашли. Напротив, широкое применение имеют свойства ферромагнитных веществ.

Ферромагнетики это вещества, в которых при температуре, меньшей некоторого определённого значения (точки Кюри), устанавливается состояние самопроизвольной намагниченности. Характерным признаком ферромагнетиков является высокое значение магнитной восприимчивости ($10^3 \dots 10^5$) и ее сильная и неоднозначная зависимость от напряженности магнитного поля. Ферромагнитными свойствами обладают *Fe, Co, Ni*, редкоземельные металлы *Gd, Tb, Dy*, Ho, а также различные сплавы и соединения указанных металлов.

Процесс установления намагниченности ферромагнетика при действии на него внешнего магнитного поля происходит следующим образом. В исходном состоянии полного размагничивания ферромагнитный образец состоит из большого числа областей – **доменов**, каждый из которых намагничен до насыщения, но при этом их векторы намагниченности \vec{J}_s направлены так, что суммарный магнитный момент образца $\vec{M} = \sum \vec{J}_{s_i} = 0$. **Размеры доменов** обычно составляют 0.01 мм. Намагничивание состоит в переориентации векторов намагниченности доменов в направлении приложенного поля главным образом за счет процессов смещения границ доменов и вращения векторов намагниченности.

Наличие в ферромагнетике областей спонтанной намагниченности обусловлено его кристаллическим строением из атомов с недостроенными внутренними электронными слоями, вследствие чего под действием сил обменного взаимодействия имеет место сильная ориентировка спиновых и орбитальных магнитных моментов электронных оболочек атомов. Разбиение же ферромагнетика на множество доменов с нулевым суммарным магнитным моментом образца происходит в соответствии со стремлением любой физической системы, в том числе и магнитной, к минимуму энергии.

Процесс смещения в многодоменном ферромагнетике заключается в перемещении границ между доменами таким образом, чтобы в результате объём доменов, векторы \vec{J}_s которых составляют наименьший угол с направлением напряженности магнитного поля, увеличивался за счет соседних доменов с энергетически менее выгодной ориентацией векторов \vec{J}_s . Если ферромагнетик, находящийся в исходном состоянии полного размагничивания

($J = 0$), намагничивать в монотонно и медленно возрастающем поле, то получающуюся зависимость $J(H)$ называют кривой первоначального намагничивания. Эту кривую обычно подразделяют на пять участков (рисунок 4.10).

Участок I – это область начального, или обратимого намагничивания, где протекают главным образом процессы упругого смещения границ доменов при постоянном значении начальной магнитной восприимчивости. Участок II (область Рэлея) характеризуется квадратичной зависимостью J от H , так как (в этой области χ_m линейно возрастает с ростом H).

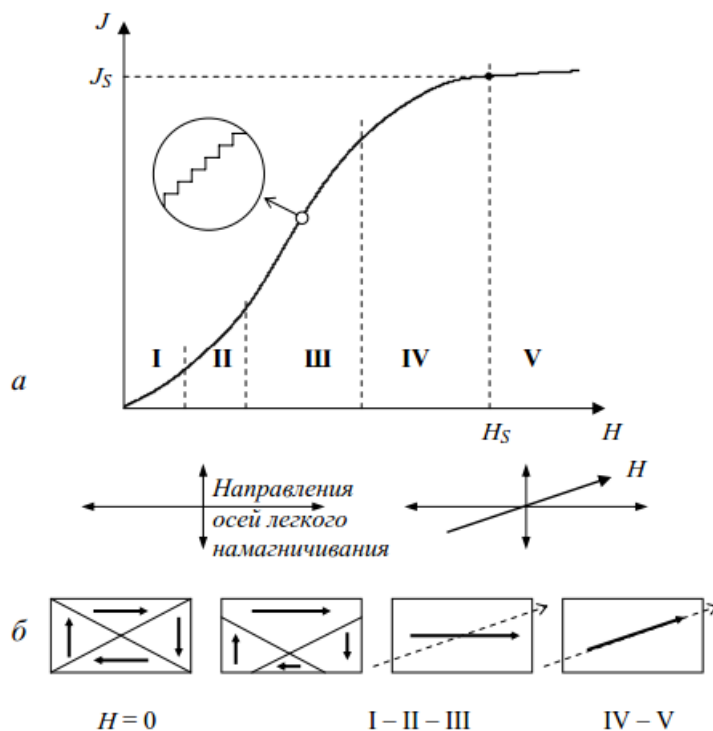


Рис. 4.10. Кривая первоначального намагничивания (а) и схематическое изображение процессов намагничивания в ферромагнетике (б). [5]

В области [Рэля](#) намагничивание осуществляется благодаря процессам смещения, как обратимым, так и необратимым, квадратично зависящим от H и J , связанным с необратимым смещением междоменных границ. На этом участке намагничивание происходит скачками (скачки [Баркгаузена](#)), что обусловлено задержками смещения границ доменов при встрече. Область наибольшей восприимчивости III характеризуется быстрым ростом с какими-либо неоднородностями структуры ферромагнетика (атомами примесей, дислокациями, микротрещинами и т.п.). В области приближения к насыщению основную роль играет процесс вращения магнитных моментов доменов. После достижения магнитного насыщения магнитные моменты всех доменов оказываются повернутыми в направлении вектора \vec{H} . Далее намагниченность ферромагнетика с ростом напряженности магнитного поля практически не меняется (область V).

Если после достижения состояния магнитного насыщения J_s в поле H_s начать уменьшать H , то будет уменьшаться и J , но по кривой, лежащей выше кривой первоначального намагничивания. (Данное явление, заключающееся в том, что физическая величина, характеризующая состояние объекта, неоднозначно зависит от другой физической величины, характеризующей внешние условия, называется гистерезисом). При уменьшении напряженности магнитного поля от H_s до нуля значение намагниченности будет уменьшаться за счет возникновения и роста доменов с магнитным моментом, направленным против поля (рисунок 4.11), что обусловлено стремлением магнитной системы к минимуму энергии.

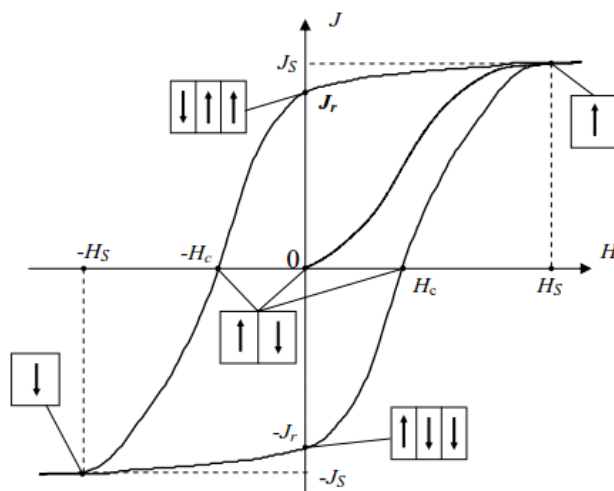


Рис. 4.11. Кривые намагничивания и размагничивания ферромагнетика (петля гистерезиса) [5]

Рост доменов сопровождается движением доменных стенок, которое может тормозиться наличием различного рода неоднородностей. Поэтому при уменьшении H до нуля у ферромагнетика сохраняется остаточная намагниченность J_r . Образец полностью размагничивается лишь в достаточно сильном поле противоположного направления, называемом коэрцитивным, с напряженностью H_c , называемой коэрцитивной силой. При дальнейшем увеличении магнитного поля обратного направления образец вновь намагничивается вдоль поля до насыщения и т.д.

Таким образом, при циклическом изменении поля кривая, характеризующая изменение намагниченности образца, образует [петлю магнитного гистерезиса](#).

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, теряемой в образце за один цикл изменения поля. Эта энергия идет, в конечном счете, на нагревание образца. Такие потери энергии называются гистерезисными.

С ростом частоты переменного магнитного поля (числа циклов перемагничивания в единицу времени) к гистерезисным потерям добавляются другие потери, связанные с вихревыми токами и явлением «магнитной вязкости», поэтому площадь петли гистерезиса при высоких частотах увеличивается. Такую петлю называют динамической, в отличие от описанной выше статической петли. Соответственно и остальные магнитные характеристики веществ разделяют на динамические и статические.

Основными статическими характеристиками предельной петли гистерезиса являются следующие: коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность J_r , намагниченность насыщения J_s , напряжённость поля насыщения, обеспечивающая магнитное насыщение H_s , а начальная и максимальная магнитные восприимчивости.

На практике для характеристики магнитных свойств ферромагнитных веществ чаще используют не намагниченность J , а индукцию B , которая в отличие от J может быть определена прямыми измерениями, а вместо магнитной восприимчивости используется относительная магнитная проницаемость.

В зависимости от значений статических магнитных характеристик магнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые. К магнитомягким

относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряжённостью $H \approx 10^1 \dots 10^3 \text{ А/м}$. Для этих материалов характерны высокие значения относительной магнитной проницаемости μ (начальной $10^2 \dots 10^5$ и максимальной $10^3 \dots 10^6$). Коэрцитивная сила H_c магнитомягких материалов составляет обычно от 1 до 10^2 А/м .

К магнитотвёрдым относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряжённостью $H \approx 10^3 \dots 10^5 \text{ А/м}$. Магнитотвёрдые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы ($10^3 \dots 10^5 \text{ А/м}$) и остаточной индукции (0,5...1,5 Тл).

4.3.2. Магнитоупругий эффект

Сущность магнитоупругого эффекта заключается в изменении магнитной проницаемости и других магнитных свойств ферромагнитного материала в результате механических упругих деформаций – эффект [Виллари](#) (Villari).

В качестве примера на рисунке 4.12 приведены гистерезисные кривые никеля и сплава «пермаллой» для различных механических напряжений растяжения σ .

Для никеля с увеличением механического напряжения наклон петли гистерезиса, а следовательно, и магнитная проницаемость уменьшаются. Кроме того, заметно уменьшается и остаточная индукция. Для пермаллоя с увеличением механического напряжения кривая гистерезиса приближается к прямоугольной.

Остаточная индукция и магнитная проницаемость существенно возрастают. При сжатии приращения магнитных параметров меняют свой знак. Магнитоупругий эффект объясняется тем, что при действии механических напряжений изменяется доменная структура ферромагнетика – происходит смещение границ доменов и изменение направлений их векторов намагниченности, т. е. те же процессы, что и при намагничивании ферромагнетика. При совпадении направленности упомянутых процессов, происходящих в результате механической деформации и намагничивания, имеет место возрастание магнитной проницаемости, в противном случае – ее уменьшение.

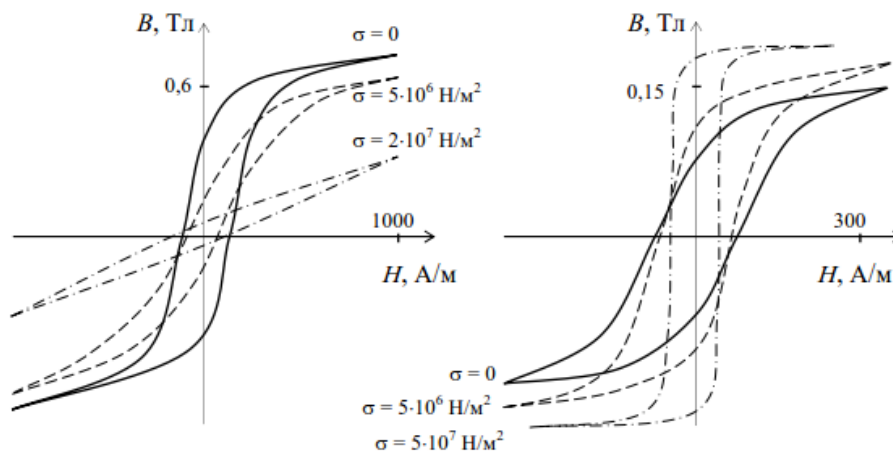


Рис. 4.12. Вид гистерезисных петель никеля (а) и пермаллоя (б) при механическом напряжении растяжения σ . [5]

Явление магнитной упругости является обратимым, его называют также обратным магнитострикционным эффектом.

Прямой магнитострикционный эффект заключается в механической деформации ферромагнетиков под действием магнитного поля. Объясняется наличием при намагничивании ферромагнетиков процессов смещения границ между доменами и поворота магнитных моментов доменов по полю, что приводит к изменению энергетического состояния кристаллической решетки и проявляется в изменении равновесных расстояний между ее узлами. В результате атомы смещаются, происходит деформация решетки. Относительное удлинение образцов из некоторых ферромагнетиков (*Fe, Ni, Co, Gd, Tb, Dy*, их сплавов) достигает порядка $10^{-5} - 10^{-2}$. Явление магнитострикции было открыто Дж. Джоулем в 1842 году.

На рис. 4.13 показано, что магнитное поле напряженностью H при $B > 0$ вызывает изменение размеров тела (длины стержня L_0) вследствие выравнивания магнитных моментов доменов.

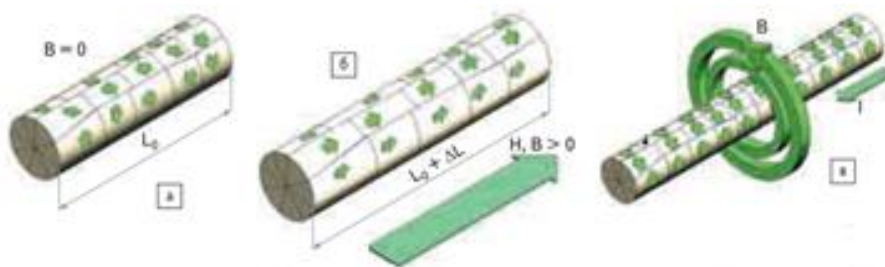


Рис. 4.13. Принцип действия магнитоупругих преобразователей: а – распределение магнитных моментов доменов в отсутствие поля; б – упорядочение магнитных моментов при намагничивании; в – положение магнитных моментов доменов под действием магнитного поля тока

Основной характеристикой материала с точки зрения его магнитоупругих свойств является коэффициент магнитоупругой чувствительности, определяемый как отношение относительного изменения магнитной проницаемости к относительной

деформации (k_μ), либо к механическому напряжению (k_σ):

$$k_\mu = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l}; \quad k_\sigma = \frac{\Delta\mu/\mu}{\sigma}. \quad (4.36)$$

Поскольку | величины $\Delta l/l$ и σ связаны между собой законом Гюка ($\sigma = E \Delta l/l$, где E – модуль Юнга), то $k_\mu = E k_\sigma$

Изменение магнитной проницаемости вещества под действием деформации при обратном магнитострикционном эффекте может быть преобразовано в электрический сигнал (рисунок 4.13, а и б).

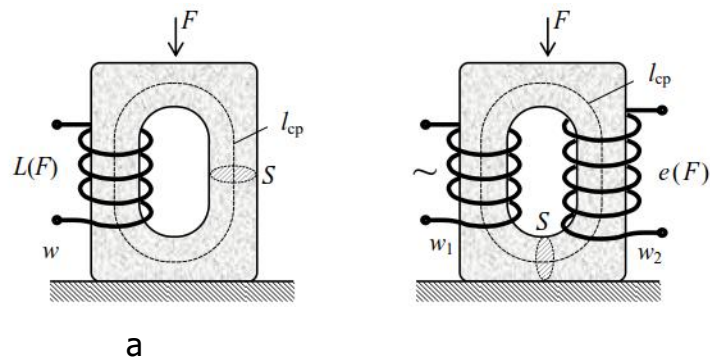


Рис. 4.14. Использование магнитоупругого эффекта в преобразователях индуктивного (а) и трансформаторного (б) типа[5]

Индуктивность катушки с замкнутым магнитопроводом (сердечником) постоянного сечения (рисунок 4.13, а) определяется выражением:

$$L = w^2 \frac{S\mu\mu_0}{l_{cp}}, \quad (4.37)$$

где w – число витков обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника; l_{cp} – длина средней силовой линии; μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника. В общем случае при деформации магнитопровода под действием силы F происходит не только изменение магнитной проницаемости ферромагнетика в результате проявления магнитоупругого эффекта, но и изменение его геометрических размеров. Для ферромагнитных сердечников можно принять, что $\Delta\mu/\mu \gg \Delta l/l$ и $\Delta\mu/\mu \gg \Delta S/S$, где ΔS – изменение площади поперечного сечения S магнитопровода; Δl_{cp} – изменение длины l_{cp} средней силовой линии; Δ – изменение магнитной проницаемости μ материала магнитопровода. С учетом этого:

$$\Delta L = L k_\sigma \sigma. \quad (4.38)$$

Здесь k_σ – коэффициент магнитоупругой чувствительности.

Ещё один вид магнитоупругого эффекта – эффект Видемана (Wiedemann) состоит в образовании деформации кручения под действием аксиального магнитного поля, приложенного к ферромагнитному стержню, по которому протекает электрический ток.

Известен также эффект, обратный эффекту Видемана. Он состоит в создании магнитного поля, когда стержень подвергают действию крутящего механического момента.

Таким образом, во всех случаях ферромагнитные материалы преобразуют магнитную энергию в механическую, и наоборот. Намагничивание вызывает механическое напряжение ферромагнитного материала, которое и приводит к изменению длины.

Магнитоупругие измерительные преобразователи применяются для преобразования (измерения) больших сил и давлений, механических напряжений и деформаций в машинах и сооружениях. Прямое магнитоупругое преобразование (магнитострикция) применяется для возбуждения акустических волн, создания линий задержки в акустике и электромеханических фильтров.

В автоэлектронике применяются как прямой магнитоупругий эффект, так и эффект Виллари, в частности для создания магнитострикционных датчиков положения.

Принцип действия и устройство магнитострикционного датчика линейного положения проиллюстрированы рисунком 4.15. Если к ферромагнитному стержню приложить импульс тока короткой длительности (1...2 мкс), то, вследствие взаимодействия магнитного поля магнита с полем тока в стержне возникнет деформация кручения в месте локализации внешнего аксиального магнитного поля, обычно создаваемого кольцевым постоянным магнитом. Поскольку к стержню прикладывается импульсный ток, то деформация распространяется в стержне, вызывая звуковую волну, для которой стержень является волноводом. Скорость распространения волны составляет приблизительно 3000 м/с.

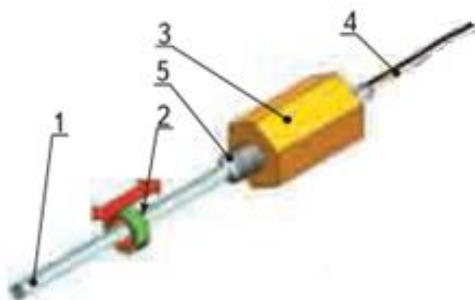


Рис. 4.15. Магнитострикционный датчик абсолютного линейного положения 1 – ферромагнитный волновод; 2 – постоянный магнит; 3 – электронный блок; 4 – терминалы датчика; 5 – элемент крепления

Аксиальное магнитное поле обеспечивается постоянным магнитом, связанным с детектируемым объектом, например, гидравлическим цилиндром. Положение магнита измеряется и определяется. Волновод представляет собой стационарную часть датчика, размещенную внутри корпуса защитной изоляционной трубки, изолирующей волновод (экранирующей) от внешней среды. Присутствие магнита определяется при первом приложении токового импульса к волноводу, поскольку благодаря возникающему в стержне эффекту Видемана отраженная волна достигает импульсного измерительного блока в концевой части волновода. Для точного измерения положения момент подачи токового импульса регистрируется микроконтроллером, который включает таймер до момента регистрации датчиком отраженного импульса. Зафиксированное таймером время распространения волны на известной скорости соответствует расстоянию между магнитом и датчиком, или абсолютному положению магнита. Для детектирования звуковой волны может быть использованы, например, пьезоэлектрический или пьезорезистивный датчик.

В качестве задач для линейных автомобильных датчиков можно назвать контроль подвески (положения кузова и колес), линейные датчики положения педалей акселератора и тормоза, сиденья, хода линейных двигателей рулевого управления и

переключения коробки передач. Еще одно применение линейных датчиков относится к области автомобильного тестирования — для контроля размеров, поверхностей и зазоров.

Для многооборотных угловых систем разработаны также методы детектирования углового положения, как в диапазоне до 360° , так и свыше 360° . Помимо угловых и линейных перемещений магнитострикционные датчики способны детектировать и любые нелинейные траектории.

Еще одно актуальное и уникальное применение магнитострикционных преобразователей в автоэлектронике этого типа — измерение крутящего момента в системах рулевого управления и коробки передач.

4.3.3. Индуктивные датчики малых перемещений

Чувствительным элементом индуктивного измерительного преобразователя является соленоид с ферромагнитным сердечником, индуктивное сопротивление которого ωL зависит от положения сердечника относительно витков соленоида. Пусть соленоид и сердечник имеют приблизительно равный диаметр D и длину l . Если сердечник «погружен» в соленоид на расстояние X (рисунок 4.16), то его индуктивность выражается в виде:

$$L = L' + L'' = \mu_0 n^2 (l - X) \frac{\pi D^2}{4} + \mu \mu_0 n^2 X \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4.39)$$

где n — число витков провода на единицу длины соленоида, μ — магнитная проницаемость материала сердечника.

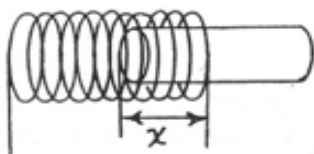


Рис. 4.16. Соленоид с погруженным в него сердечником.

В результате преобразований выражение (4.39) принимает вид:

$$L = L_0 + \frac{\mu_0(\mu-1)}{4} X, \quad (4.40)$$

где L_0 — индуктивность соленоида без сердечника. Таким образом, индуктивность соленоида будет линейной функцией X его и этот эффект может быть использован для создания измерителя малых перемещений с функцией преобразования $X \rightarrow L$. Выражение (4.39) для определения индуктивности L можно переписать в виде:

$$L = L_0 + S_L X, \quad (4.41)$$

где $S_L = \frac{dL}{dX} = \frac{\mu_0(\mu-1)}{4}$ — чувствительность индуктивного преобразователя.

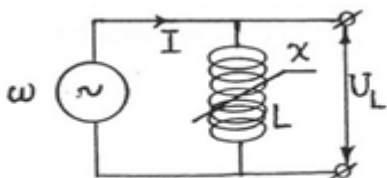


Рис. 4.17. Вариант использования индуктивного датчика для измерения малых перемещений.

Одним из вариантов использования индуктивного датчика для измерения малых линейных перемещений является его подключение к генератору электрических колебаний частотой ω (рисунок 4.17), работающему в режиме генератора тока. В этом случае напряжение на соленоиде:

$$U_L = IX_L = I\omega L. \quad (4.42)$$

Отсюда следует, что $U_L \sim L$. Это напряжение с высокой точностью может быть измерено, например, электронным вольтметром и будет являться выходным сигналом измерительного преобразователя. Таким образом, в результате двойного преобразования $X \rightarrow L \rightarrow U_L$ напряжение на соленоиде с магнитным сердечником, смещение которого относительно витков соленоида равно X , будет функцией этого смещения: $U_L = f(X)$.

4.4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность индукционного измерительного преобразования?
2. В чем заключается физическая сущность эффекта Холла?
3. В чем заключается физическая сущность преобразования в электрический сигнал параметров магнитного поля на основе эффекта Гаусса?
4. В чем заключается физический смысл индуктивности и взаимной индуктивности?
5. От каких физических параметров зависят индуктивность и взаимные индуктивности обмоток?
6. Каково влияние на индуктивность и взаимную индуктивность обмоток параметров магнитной цепи?
7. Каково влияние на взаимную индуктивность обмоток их взаимного расположения?
8. Для решения каких измерительных задач могут быть использованы индуктивное и взаимноиндуктивное измерительные преобразования?
9. В чем заключается физическая сущность магнитоупругого эффекта?
10. Какова функциональная зависимость магнитных характеристик ферромагнетиков от их механической деформации?

4.5. Тестовые задания [8, 9]

1. Положительный заряд попадает во взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля. Каково должно быть расположение трех векторов (\mathbf{B} , \mathbf{E} , \mathbf{v}) чтобы заряд не изменил скорость ни по величине, ни по направлению. Выберите правильный ответ из ниже приведенных вариантов на рисунке 4.18:

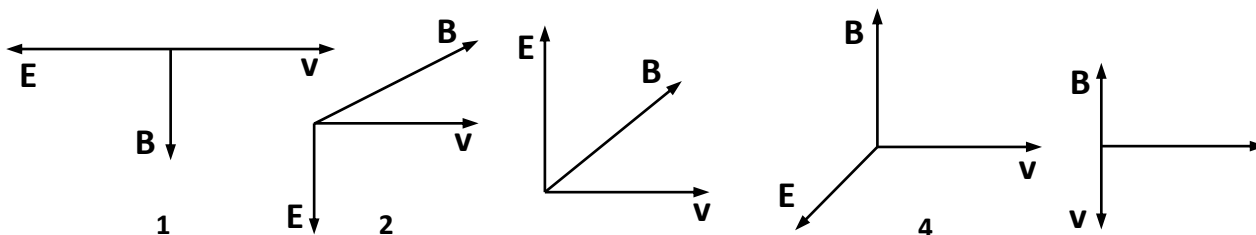
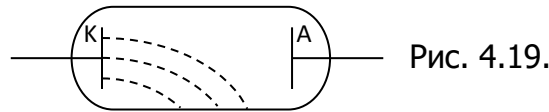


Рис. 4.18.

Варианты ответов: а) 1; **б) 2;** в) 3; г) 4; д) 5.

2. К катодной трубке, изображенной на рисунке 4.19, приблизили магнит. Катодные лучи отклонились в плоскости рисунка. Определите направление вектора магнитной индукции \mathbf{B} .



Варианты ответа: а) от нас; б) на нас; в) вверх; **г) вниз.**

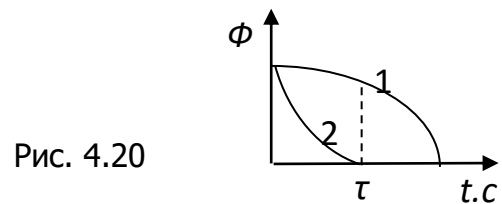
3. Определите индуктивность катушки L , в которой равномерное изменение силы тока на $\Delta I = 3 \text{ A}$ в течение $\Delta t = 0,6 \text{ c}$ возбуждает ЭДС самоиндукции, равную $\mathcal{E} = 12 \text{ B}$.

Варианты ответа: а) $L = 24 \text{ Гн};$ б) $L = 60 \text{ Гн};$ в) $L = 6 \text{ Гн};$ **г) $L = 2,4 \text{ Гн}.$**

4. Как нужно изменить индуктивность контура для того, чтобы при неизменном значении силы тока в нем энергия магнитного поля уменьшилась в 4 раза?

Варианты ответа: а) уменьшить в 4 раза; б) уменьшить в 2 раза;
в) уменьшить в 8 раз; г) уменьшить в 16 раз;
д) увеличить в 4 раза.

5. На рисунке 4.20 даны графики изменения магнитного потока, пронизывающие один и тот же проводящий контур. Сравните заряды, протекшие по контуру за время τ .



Варианты ответа:

а) $q_1 > q_2;$ **б) $q_1 < q_2;$** в) $q_1 = q_2;$ д) $q_1 = q_2 = 0.$

6. Магнитный поток Φ , возрастающий со временем, пронизывает проводящее кольцо. Как будет направлен индукционный ток в кольце K ?

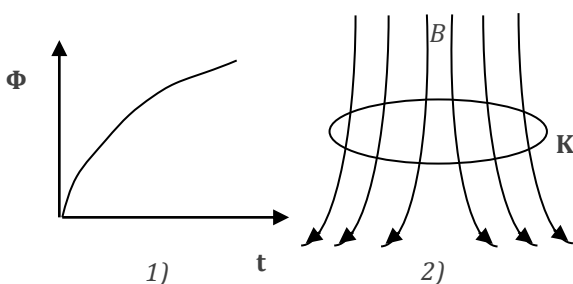


Рис. 4.21.

Варианты ответа: а) по часовой стрелке; **б) против часовой стрелки;**
в) ток в кольце не возникает.

7. Два контура расположены так, что их плоскости параллельны друг другу. По контуру 1 течет ток, направление которого показано стрелкой на рисунке 4.22.

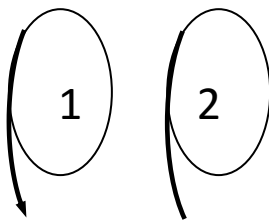


Рис. 4.22

Контур, сохраняя параллельность своих плоскостей, движется друг относительно друга. Как направлен индукционный ток в контуре 2, в случаях: I - контуры сближаются; II - контуры удаляются?

- Варианты ответа:** а) I - по часовой стрелке; II - против часовой стрелки;
 б) I - и II - по часовой стрелке; в) I - против часовой стрелки; II - по часовой стрелке;
 г) I - и II - против часовой стрелки; д) I - и II - ток не возникает.

8. Внутри соленоида, по которому течет ток, создаваемый источником с постоянной ЭДС, находится железный сердечник. Как изменится ток в контуре во время удаления сердечника?

- Варианты ответа:** а) увеличится; б) уменьшится; в) останется неизменным.

9. Два соленоида (индуктивность одного $L_1 = 0,36 \text{ Гн}$, второго $L_2 = 0,64 \text{ Гн}$) одинаковой длины и практически равного сечения вставлены один в другой. Определите взаимную индуктивность соленоидов.

- Варианты ответа:** а) 48 Гн ; б) 480 Гн ; в) $4,8 \text{ мГн}$; г) $0,48 \text{ Гн}$; д) $0,48 \text{ кГн}$.

10. На рисунке 4.23 представлены графики, отражающие характер зависимости величины намагниченности J вещества (по модулю) от напряженности магнитного поля H .

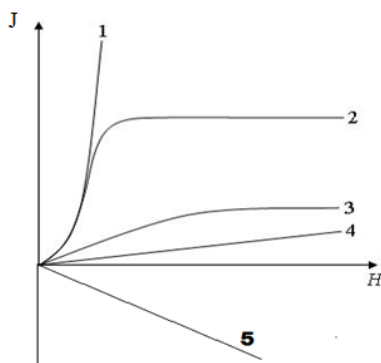


Рис. 4.23

Укажите зависимость, соответствующую диамагнетикам.

- Варианты ответов:**
 а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5.

11. На рисунке 4.23 представлены графики, отражающие характер зависимости величины намагниченности J вещества (по модулю) от напряженности магнитного поля H .

Укажите зависимость, соответствующую парамагнетикам.

Варианты ответов:

- а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5.

12. Образцы из пара- и диамагнетика, помещенные в неоднородное магнитное поле между полюсами электромагнита, ведут себя по-разному - они либо втягиваются в область сильного поля, либо - выталкиваются из нее. На рисунке 4.24 изображены:

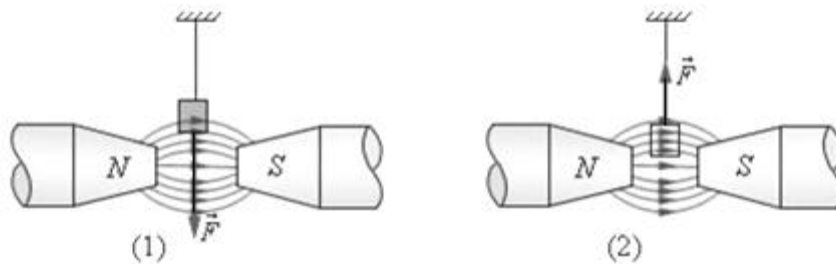


Рис. 4.24.

Варианты ответов:

- а) 1- парамагнетик, 2- диамагнетик; б) 1- диамагнетик, 2- парамагнетик;

в) нет ответа.

13. На рисунке 4.25 показана зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности внешнего магнитного поля H для:
1)любого магнетика; 2) парамагнетика;
3)ферромагнетика; 4)диамагнетика.

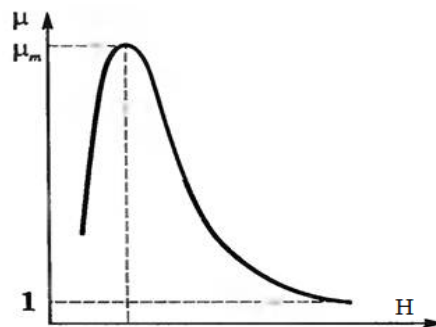


Рис. 4.25.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.

14. На рисунке 4.23 представлены графики, отражающие характер зависимости величины намагниченности J вещества (по модулю) от напряженности магнитного поля H .

Укажите зависимость, соответствующую ферромагнетикам.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; 5) 5.

15. На рисунке 4.26 показана зависимость проекции вектора индукции магнитного поля B в ферромагнетике от напряженности H внешнего магнитного поля. Участок ОС соответствует:

- 1) остаточной намагниченности ферромагнетика;
- 2) магнитной индукции насыщения ферромагнетика;
- 3) коэрцитивной силе ферромагнетика;
- 4) остаточной магнитной индукции ферромагнетика.

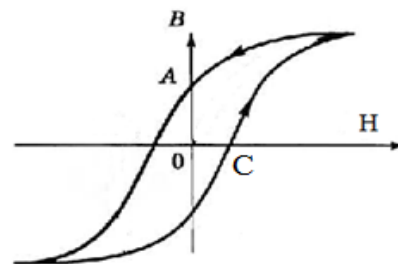


Рис. 4.26.

Варианты ответов: а) 1; б) 2; **в) 3;** г) 4.

16. На рисунке 4.26 показана зависимость проекции вектора индукции магнитного поля B в ферромагнетике от напряженности H внешнего магнитного поля.

- Участок ОА соответствует:
- 1) остаточной намагниченности ферромагнетика;
 - 2) магнитной индукции насыщения ферромагнетика;
 - 3) коэрцитивной силе ферромагнетика;
 - 4) остаточной магнитной индукции ферромагнетика.

Варианты ответов: **а) 1;** б) 2; г) 3; д) 4.

17. Температура Кюри – это температура,....

- 1) ниже которой ферромагнетик находится в парамагнитном состоянии;
- 2) выше которой ферромагнетик находится в парамагнитном состоянии;
- 3) при которой происходит поглощение или выделение теплоты;
- 4) соответствующая скачкообразному изменению теплоемкости ферромагнетика.

Варианты ответов: а) 1, 2; б) 1, 4; **в) 2, 4;** г) 1, 3.

18. Количество тепла, выделяющееся при перемагничивании....

- 1) пропорционально площади петли гистерезиса;
- 2) обратно пропорционально площади петли гистерезиса;
- 3) равно энергии внешнего магнитного поля, затраченной на перемагничивание ферромагнетика;
- 4) равно работе силы Ампера.

Варианты ответов: **а) 1 и 3;** б) 2 и 3; в) 1 и 4; г) 2 и 3.

5. ОПТИКА. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЕЩЕСТВА С ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ [1, 2, 4]

5.1. Оптическое излучение и его характеристики

Оптика – это учение о физических явлениях, связанных с излучением, распространением и взаимодействием с веществом электромагнитных волн оптического диапазона. Оптическое или световое излучение – это электромагнитные волны, длина волны которых лежит в диапазоне $10^{-3} \dots 10^3$ мкм.

В оптическом диапазоне различают три области:

инфракрасную ($0,78-10^3$ мкм), видимую (380–780 нм) и ультрафиолетовую (10–380 нм). Границы областей определяются способностью человеческого глаза

воспринимать световое излучение. Электромагнитные волны видимой области спектра дают зрительное и цветовое ощущение. Инфракрасное излучение лишь тепловое ощущение. Возникновение оптического излучения связано с движением электрически заряженных частиц (электронов, атомов, ионов, молекул), а также с дискретными переходами носителей зарядов с более высоких на более низкие уровни энергии.

Электромагнитной волной называют взаимосвязанные колебания электрического и магнитного полей, распространяющиеся в вакууме и в прозрачных диэлектрических средах. Образование электромагнитных волн следует из уравнений [Максвелла](#), согласно которым векторы \vec{E} и \vec{H} переменного электромагнитного поля удовлетворяют волновому уравнению, т.е.

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad \Delta \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (5.1)$$

В безграничном пространстве любое переменное электромагнитное поле представляется собой суперпозицию элементарных волн, называемых плоскими монохроматическими волнами. Электромагнитная волна называется монохроматической, если она зависит от времени по гармоническому закону и определяется только одной частотой. Волна называется плоской, если она зависит только от одной пространственной координаты. Напряженность электрического поля в плоской электромагнитной волне записывается в виде:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos \psi, \quad (5.2)$$

где $\psi = \omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha$, $\vec{k}\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$, \vec{E}_m – вектор амплитуды.

Величину ψ называют фазой колебаний, ω – круговой или циклической частотой, вектор \vec{k} – волновым вектором, его модуль k – волновым числом, α – начальной фазой. Волновое число k определяет длину электромагнитной волны: $\lambda = 2\pi/k$, как расстояние между ближайшими максимумами электрического (или магнитного) поля вдоль направления распространения волны.

Такое же уравнение, как рассмотренное выше для электрического поля, описывает магнитное поле:

$$\vec{H} = \vec{H}_m \cos \psi, \quad (5.3)$$

при этом $\vec{H}_m = \mu_0 \mu \omega \vec{k} \vec{E}_m$. Из уравнений Максвелла следует [поперечность электромагнитных волн](#), т.е. $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \perp \vec{E}$, т.е. векторы \vec{H} , \vec{E} , \vec{k} взаимно ортогональны (рисунок 5.1).

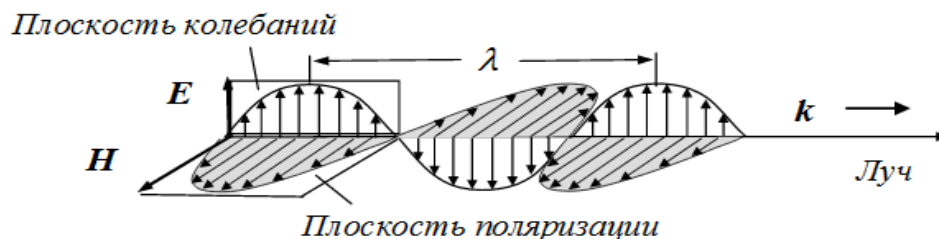


Рис. 5.1. Пространственная картина распределения напряженностей электрического и магнитного полей в плоской монохроматической волне

Направим ось Ox вдоль вектора \vec{k} . Тогда $\psi = \omega t - kx + a$. Поверхность постоянной фазы $\psi = const$ называется волновой поверхностью. Из определения следует, что на волновой поверхности E и H постоянны, координата x есть функция времени $x(t)$, а сама волновая поверхность движется со скоростью v в направлении волнового вектора. Таким образом, v – это фазовая скорость распространения электромагнитной волны в среде. В вакууме $\epsilon = \mu = 1$, поэтому $v = c = 1 / \epsilon_0 \mu_0 = 3 \times 10^8$ м/с. Величину $n = \epsilon \mu$ называют абсолютным показателем преломления среды. Так как показатель преломления $n > 1$, то скорость света в ней меньше скорости света в вакууме. Линия, вдоль которой распространяется световая энергия, называется лучом.

5.2. Прохождение оптического излучения через границу раздела двух сред

Рассмотрим явления, обусловленные отражением и преломлением света на границе раздела двух диэлектриков. Эти свойства являются следствием граничных условий: $E_{1\tau} = E_{2\tau}$, $H_{1\tau} = H_{2\tau}$, где нижний индекс τ указывает, что E_{τ} , H_{τ} – касательные составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} на поверхности раздела, а индексы 1, 2 обозначают значения модулей этих векторов в i -ой среде с показателем преломления n_i ($i = 1, 2$).

5.2.1. Законы отражения и преломления света

Пусть световой вектор \vec{E} направлен параллельно поверхности раздела, а падающий луч направлен под углом φ_1 к нормали. Направления падающего, отраженного и прошедшего лучей имеют вид, изображенный на рисунке 5.2.

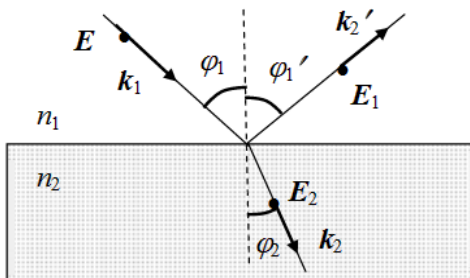


Рис. 5.2. Наклонное падение света на поверхность раздела при ориентации светового вектора параллельно поверхности раздела (перпендикулярно плоскости чертежа) [4].

Запишем выражения для электрических компонент падающей E , отраженной E_1 и прошедшей во вторую среду E_2 волн:

$$E = E_0 \cos(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r} + \alpha), E_1 = E_{10} \cos(\omega t - \vec{k}_1' \vec{r} + \alpha), E_2 = E_{20} \cos(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r} + \alpha) \quad (5.4)$$

При этом $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_1'| = k_1 = \omega/v_1$.

Из условия равенства фаз на поверхности раздела сред следует:

$$\vec{k}_1 \vec{r} = x \sin \varphi_1 \cdot \omega/v_1; \quad \vec{k}_2 \vec{r} = x \sin \varphi_2 \cdot \omega/v_2, \quad (5.5)$$

где φ_1 – угол падения, φ_1' – угол отражения, φ_2 – угол преломления. Из условия $E + E_1 = E_2$, следует, что фазы падающей, отраженной и прошедшей волн одинаковы. Таким образом:

$$\sin \varphi_1 = \sin \varphi_1', \quad \sin \varphi_1/v_1 = \sin \varphi_2/v_2. \quad (5.6)$$

Эти соотношения с учетом того, что $v_i = c/n_{ди}$ ($i = 1, 2$) формулируются в виде следующих законов:

- 1) угол отражения света равен углу падения $\varphi_1' = \varphi_1$;
- 2) угол падения φ_1 связан с углом преломления φ_2 уравнением Снеллиуса:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2.$$

(5.7)

5.2.2. Явление полного внутреннего отражения

Если $n_1 > n_2$, то согласно закону преломления $\varphi_2 > \varphi_1$ (рисунок 5.3, а) и, таким образом, с увеличением угла падения φ_1 возможно выполнение условия: $\sin \varphi_2 = 1$ (рисунок 5.3, б). Это означает, что $\varphi_2 = \pi / 2$, то есть преломленный луч направлен вдоль поверхности границы раздела сред. Таким образом, при углах падения $\varphi_1 > \varphi_{\text{пр}}$, $\sin \varphi_{\text{пр}} = n_2 / n_1$ свет полностью отражается от поверхности раздела и преломленной волны не существует. Это явление называется полным внутренним отражением света.

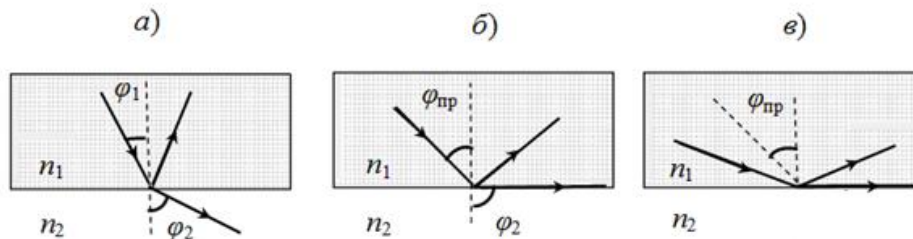


Рис. 5.3. К явлению полного отражения:

- а) $\varphi_1 < \varphi_{\text{пр}}$ и $\varphi_2 > \varphi_1$; б) $\varphi_2 = \pi/2$ и $\varphi_1 = \varphi_{\text{пр}}$; в) $\varphi_1 > \varphi_{\text{пр}}$,

Рассмотрим некоторые применения этого явления в оптических приборах и технических устройствах.

1. Рефрактометр полного отражения.

Рефракцией называется зависимость коэффициента преломления от плотности вещества. Это явление используется в приборах, называемых рефрактометрами. Рефрактометры служат для определения плотности вещества или концентрации растворенного компонента в чистом растворителе. Основным элементом рефрактометра являются две прямоугольные призмы, между которыми находится исследуемая жидкость (рисунок 5.4). Верхняя призма 1 является светорассеивающей (матовой), а призма 2 – тщательно отполированной. Призмы изготовлены из стекла с показателем преломления большим, чем показатели преломления исследуемых жидкостей.

Свет, проходя через матовую поверхность первой призмы, равномерно освещает жидкость. На границе полированной грани второй призмы из-за явления полного внутреннего отражения возникает конус лучей, угол при вершине которого определяется из условия: $\sin \varphi = n_{\text{ж}} / n_{\text{ст}}$. По этой причине в поле зрения окуляра появляются освещенная и неосвещенная области, разделённые резкой границей.

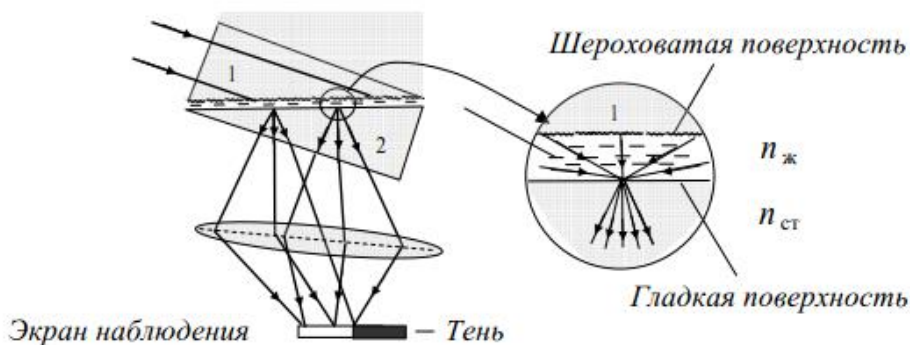


Рис. 5.4. Схема формирования границы между освещенной областью и затененной в рефрактометре [4]

Положение этой границы будет зависеть от угла φ , а тем самым от показателя преломления жидкости. [Рефрактометры](#) данного типа позволяют измерить показатели преломления в пределах $n = 1,33...1,78$ с относительной погрешностью 10^{-5} .

2. Световоды и оптоволоконная связь

Светопроводящий кабель (световод, оптоволокно) представляет собой тонкое цилиндрическое тело, изготовленное из кварцевого стекла с примесью эрбия. [Световоды делают в виде одножильных \(рисунок 5.5, а\) и многожильных \(рисунок 5.5, б\) кабелей.](#)

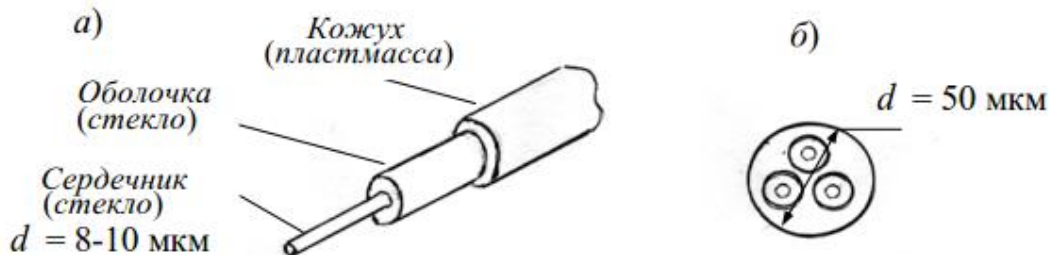


Рис. 5.5. Структура светопроводящих кабелей [4]

В линиях связи используют три инфракрасных диапазона оптического излучения: 0,85, 1,3 и 1,55 мкм, для которых поглощение световой энергии минимально. Потери в области длины волны 1,55 мкм составляют 5% на 1 км. На рисунке 5.6 представлен график зависимости интенсивности поглощения света в децибелах (Дб) в зависимости от длины волны излучения.

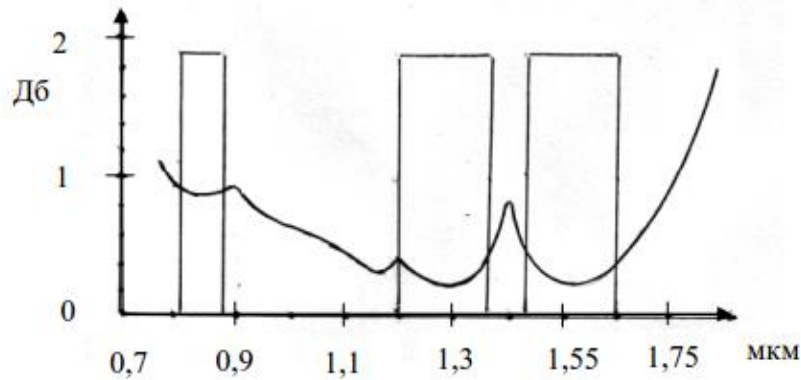


Рис. 5.6. Зависимость интенсивности поглощения от длины волны в оптическом волокне [4]

(Поглощение оптического излучения в децибелах (Дб) определяется из соотношения: $D = 10 \ln(I_0/I)$, где I_0 , I – значения интенсивности излучения, соответственно на входе и на выходе световода. Например, уменьшение интенсивности в два раза ($I/I_0 = 0,5$) соответствует $D = 3$ Дб). Соединение световодов осуществляется через оптический разъем (теряется 10-20 % мощности), сжатием муфтой (потери до 10%) и сваркой (минимальные потери). Генераторами излучения служат фотодиоды и полупроводниковые лазеры. Передача данных по оптоволокну составляет до 1 Гбит/с. С помощью стеклянного кабеля можно добиться передачи сигнала практически без потерь на расстояние до 100 км. Все три указанных выше диапазона длины волны имеют полосу пропускания от 25000 до 30000 ГГц. Схема типичной оптоволоконной линии связи представлена на рисунке 5.7. Принцип передачи сигнала заключается в следующем. Пучок излучения от ИК лазера 1 ($\lambda = 1,04$ мкм) проходит через модулятор 2, который преобразует непрерывный поток излучения в последовательность световых импульсов согласно частоте входного напряжения. Через корректирующую линзу 3 модулированный сигнал подается на оптическое волокно 4 и далее на приемник, который состоит из быстродействующего кремниевый $p-n$ фотодиода 5, операционного усилителя на полевых транзисторах 6 и порогового детектора 7, который восстанавливает начальные цифровые данные.

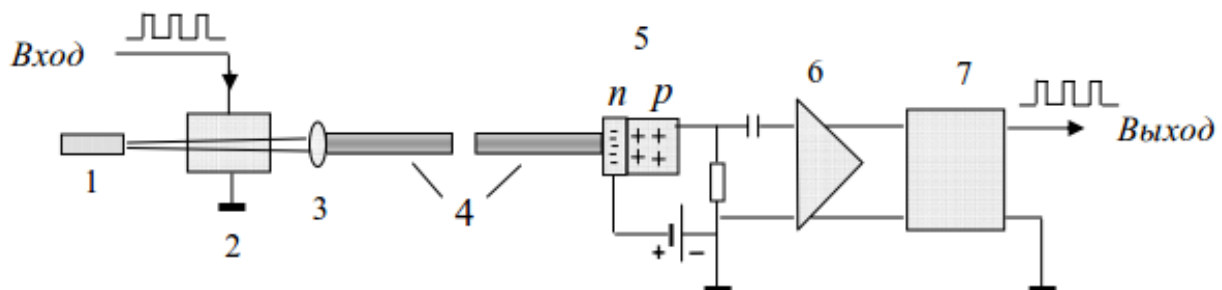


Рис. 5.7. Схема оптической оптоволоконной связи для передачи сигналов в двоичном коде [4]

Оптоволоконные линии связи между отдельными блоками, интеллектуальными датчиками и исполнительных механизмами в современной автоэлектронике

начинают использоваться для быстрой и надежной передачи больших массивов информации. Для этой цели была разработана оптическая система MOST (*Media Oriented System Transport*). В ней световые сигналы проходят по световодным линиям от одного прибора к другому. В каждом приборе принятые световые сигналы преобразуются в электрические, обрабатываются MOST-процессором и снова преобразуются в световые с помощью светодиодов (рисунок 5.8). Преимуществом современных оптических систем, кроме отсутствия помех, является также высокая скорость передачи данных, достигающая 21,2 Мбит/с, что позволяет передавать информацию в виде цифрового сигнала (http://jetta-club.org/uploads/ssp/ssp_rus/286_lin-most-bluetooth.pdf).



Рис. 5.8. Схема расположения блоков управления шиной MOST

5.2.3. Поляризация света при отражении

Рассмотрим случай падения света на границу раздела двух диэлектриков с произвольной ориентацией светового вектора. Разложим вектор \vec{E} на две составляющие: $\vec{E} = \vec{E}_{||} + \vec{E}_{\perp}$, где вектор $\vec{E}_{||}$ лежит в плоскости падения волны, а вектор \vec{E}_{\perp} , перпендикулярен плоскости падения (рисунок 5.8).

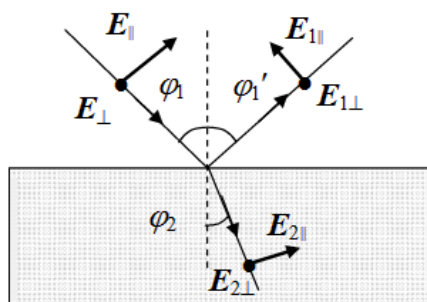


Рис. 5.8. Преломление и отражение волны с произвольной ориентацией светового вектора [4]

Используя граничные условия для амплитуд, получаем:

$$E_{||} \cos \varphi_1 - E_{1||} \cos \varphi_1 = E_{2||} \cos \varphi_2, \quad E_{\perp} + E_{1\perp} = E_{2\perp},$$

$$H_{\parallel} \cos \varphi_1 - H_{1\parallel} \cos \varphi_1 = H_{2\parallel} \cos \varphi_2, \quad H_{\perp} + H_{1\perp} = H_{2\perp}.$$

Решения этой системы уравнений имеют вид:

$$E_{1\parallel} = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)}{\operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2)} E_{\parallel}, \quad E_{2\parallel} = \frac{2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} E_{\parallel}, \quad (5.8)$$

$$E_{1\perp} = \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} E_{\perp}, \quad E_{2\perp} = \frac{2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} E_{\perp}. \quad (5.9)$$

Эти соотношения называются формулами [Френеля](#).

Проанализируем полученные выражения.

1. Из уравнения Снеллиуса следует, что $\varphi_1 \neq \varphi_2$, тогда получаем, что $E_{1\perp} \neq 0$. Таким образом, составляющая $E_{1\perp}$ светового вектора всегда отражается.
2. Если $\varphi_1 + \varphi_2 = \pi / 2$, то $E_{1\parallel} = 0$. Это означает, что при угле падения φ_1 , удовлетворяющему условию

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} = \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.10)$$

будет отражаться только компонента светового вектора с ориентацией параллельно поверхности границы раздела. Угол φ_1 , определяемый таким образом, называется углом [Брюстера](#). Из формул Френеля следует, что прошедший [свет, падающий под углом Брюстера](#), будет частично поляризован, а именно $E_{2\parallel} > E_{2\perp}$, т. е. будет преобладать составляющая электрического поля, лежащая в плоскости падения света.

5.3. Взаимодействие оптического излучения с оптически анизотропными средами

5.3.1. Двойное лучепреломление в одноосных кристаллах

Распространение света в одноосных кристаллах приводит к [явлению двойного лучепреломления](#), суть которого заключается в следующем. Если естественный свет падает на грань кристалла, расположенную под углом к оптической оси, то внутри кристалла падающий луч расщепляется на два плоскополяризованных луча (рисунок 5.9).

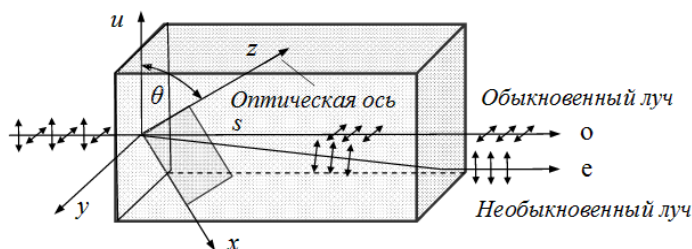


Рис. 5.9. Двойное лучепреломление в одноосных кристаллах

Падающий луч естественного света расщепляется на два луча: обыкновенный (o) и необыкновенный (e), [4].

Двойное лучепреломление обладает следующими свойствами.

- 1) Один из лучей подчиняется закону преломления, поэтому называется обыкновенным. Плоскость колебаний светового вектора перпендикулярна плоскости, проходящей через оптическую ось и направление падающей волны.
- 2) Второй луч не подчиняется закону преломления и называется необыкновенным. Колебания светового вектора происходят в этом луче в плоскости, проходящей через

оптическую ось и направление падающего луча. Необыкновенный луч преломляется даже при нормальном падении света на грань кристалла.

3) Плоскости колебаний светового вектора в обыкновенном и необыкновенном лучах взаимно ортогональны.

5.3.2. Поляризационные устройства. Закон Малюса.

Поляризацией называется выделение из естественного света, содержащего волны со всевозможными ориентациями в пространстве векторов напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей, волн с определенным направлением этих векторов. Приборы, преобразующих естественный свет в плоскополяризованный, называются поляризаторами. Рассмотрим типы некоторых поляризаторов.

1. При падении света на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера луч, отраженный будет полностью поляризован. Он будет состоять из волн, в которых вектор напряженности электрического поля будет ориентирован перпендикулярно плоскости падения. Луч, прошедший во вторую среду, будет частично поляризован, т. е. в нём будет преобладать составляющая электрического поля, лежащая в плоскости падения света. Так как коэффициент отражения света на границе раздела воздух – стекло значительно меньше единицы (около 0,15) можно получить преломленный свет, с высокой степенью поляризации путем ряда последовательных отражений и преломлений. Это осуществляют с помощью поляризатора (стопа) **Столетова**, состоящей из нескольких одинаковых и параллельных друг другу стеклянных пластинок, установленных под **углом Брюстера** к падающему свету (рисунок 5.10). При достаточно большом числе пластинок свет, прошедший через эту систему, будет практически полностью линейно поляризованным (достаточно 8–10 пластинок). Интенсивность прошедшего через такую стопу света (в отсутствии поглощения), будет равна половине интенсивности падающего на стопу естественного света.

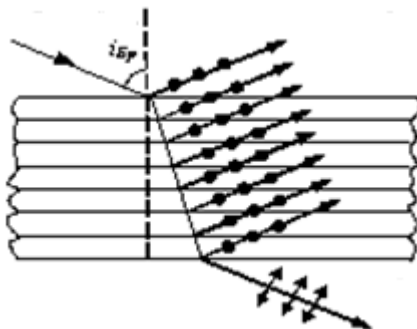


Рис. 5.10. Стопа Столетова

2. Поляризаторы на основе явления дихроизма (сильного поглощения одного из лучей при двойном лучепреломлении) представляют собой пластинки из дихроичного кристалла, вырезанные вдоль оптической оси (рисунок 5.11). При падении естественного света на пластинку перпендикулярно её боковой поверхности на выходе образуется частично поляризованный свет

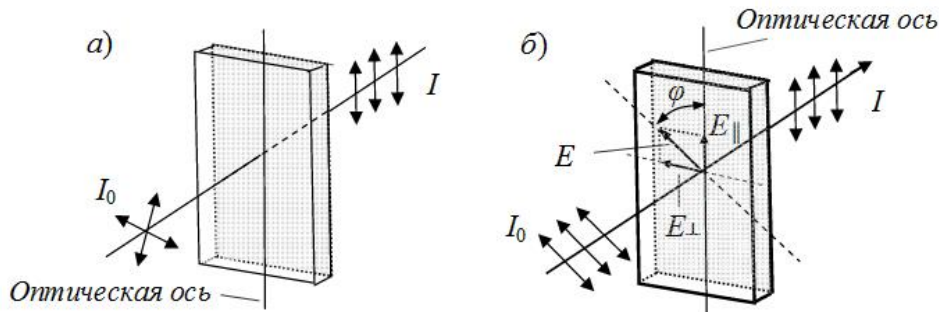


Рис. 5.11. Кристаллический поляризатор из дихроичного кристалла [4]

(рис.5.11, а), степень поляризации которого определяется коэффициентом поглощения необыкновенного луча. Если пластинка имеет достаточно большую толщину, то из неё будет выходить практически полностью плоскополяризованный свет с ориентацией светового вектора параллельно оптической оси кристалла. При этом интенсивность света I на выходе из пластинки связана с интенсивностью I_0 на входе соотношением:

$$I = I_0 / 2. \quad (5.11)$$

Если же на такой поляризатор падает плоскополяризованный свет (рис. 5.11, б), то составляющая светового вектора $E_{||}$, параллельная оптической оси кристалла, пройдет через кристалл без поглощения, а составляющая E_{\perp} поглотится. Как видно из рисунка, $E_{||} = E \cos \varphi$, где φ – угол между оптической осью и направлением светового вектора падающей волны. Тогда интенсивность света на выходе поляризатора $I = CE_{||}^2 = CE^2 \cos^2 \varphi$. Так как интенсивность на входе равна $I = CE^2$, то окончательно получаем соотношение, которое выражает [закон Малюса](#):

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (5.12)$$

Явление двулучепреломления используется в различных оптических устройствах, в частности, в пластинках, преобразующих плоскую монохроматическую волну в эллиптически поляризованную или с другой поляризацией (фазовые преобразователи).

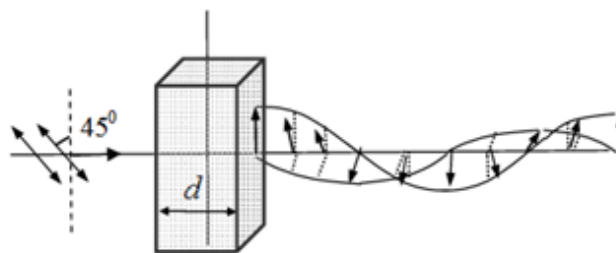


Рис. 5.12. Преобразование плоскополяризованного монохроматического света в эллиптически поляризованный свет [4]

Такие пластинки вырезаются параллельно оптической оси одноосного кристалла, который не обладает дихроизмом. При падении света нормально на пластину и так, чтобы угол между вектором \vec{E} и оптической осью в кристалле $\varphi \neq 0$, то между (о) – лучом и (е) – лучом на выходе образуется разность фаз, определяемая выражением $\delta\psi = (2\pi / \lambda_0) \Delta = (2\pi / \lambda_0) (n_z - n_y) d$. Если эта разность фаз будет равна $\delta\psi = (2m + 1)\pi/2$, где m – целое, то есть оптическая разность хода $\Delta = (n_z - n_y) d$ кратна $\lambda/4$, то после прохождения пластинки свет будет эллиптически поляризован. В

частности, если $\varphi = 45^\circ$, то на выходе свет будет иметь круговую поляризацию (рисунок 5.12).

5.3.3. Искусственное двойное лучепреломление

Некоторые оптически изотропные вещества под влиянием внешних факторов (механического напряжения или воздействия электрического поля) становятся оптически анизотропными, то есть приобретают свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлением воздействия внешней силы или направления вектора напряженности электрического поля. Это явление называют искусственной оптической анизотропией, а так как при этом наблюдается двойное лучепреломление, то его также называют искусственным двойным лучепреломлением. Мерой искусственной оптической анизотропии является разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном наведенной оптической оси: $n_o - n_e = k_1\sigma$ в случае деформации и $n_o - n_e = k_2/E$ при воздействии электрического поля. Здесь k_1 – постоянная фотоупругости, k_2 – постоянная Керра, σ – нормальное напряжение, E – напряженность внешнего электрического поля, l – длина ячейки, подвергающейся воздействию электрического поля.

В качестве примера наблюдения и использования искусственного двойного лучепреломления рассмотрим опыт по определению механических напряжений в пластинке, на которую действует сила \vec{F} (рисунок 5.13). Луч белого света, проходя через поляризатор P , выходит поляризованным под углом 45° к вертикали и попадает на пластину из оргстекла, находящуюся в напряженном состоянии под действием силы \vec{F} , действующей вертикально вдоль оси симметрии. В этом случае в пластине возникает искусственное двойное лучепреломление, причем в различных точках оптические оси будут иметь различные направления (например, оптические оси в точках, лежащих на оси симметрии, расположены на вертикальной линии).

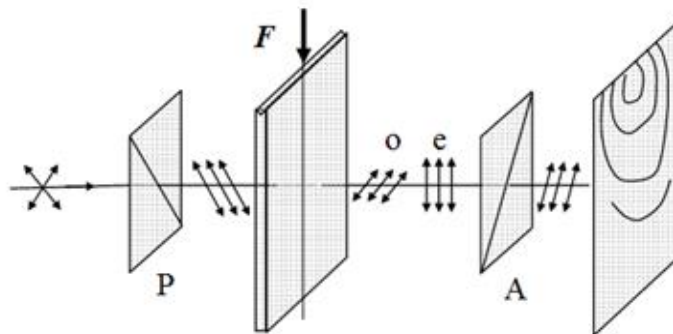


Рис. 5.13. Определение механических напряжений в прозрачной пластине, на которую действует сила \vec{F} [4]

В пластине поляризованный луч разделяется на два луча (о) и (е), которые на выходе из неё будут иметь оптическую разность хода равную $\Delta = n_o d - n_e d = (n_o - n_e)d$, где d – толщина пластины, причем $n_o - n_e = k_1\sigma$, то есть оптическая разность хода тем больше, чем больше напряжение в точке.

Однако эти лучи не будут интерферировать, так как они имеют различные положения плоскости поляризации. Чтобы лучи приобрели одинаковые поляризации, на их пути ставится второй поляризатор A , оптическая ось которого находится под углом 90° к оптической оси первого поляризатора P . Так как на выходе из

поляризатора А световые векторы колеблются в одной плоскости, то на экране будет наблюдаться интерференционная картина. Условие образования дифракционных максимумов в данном случае имеет вид: $(n_o - n_e)d = k_1 \sigma d = m\lambda$, где $m=1,2,\dots, m_{max}$. Для каждого номера дифракционных зон $m = 1, 2, \dots$ по этой формуле можно найти [линии равных напряжений](#)

$$\sigma_1 = \lambda / (k_1 d), \sigma_2 = \lambda / (2k_1 d) \text{ и т. д.}$$

(5.13)

Возникновение двойного лучепреломления под действием электрического поля называется эффектом [Керра](#). Оно наблюдается в полярных жидкостях, например, нитробензоле, а также в некоторых аморфных телах и газах). Схема эксперимента по наблюдению эффекта Керра изображена на рисунке 5.14. [Эффект Керра](#) объясняется ориентационной поляризуемостью молекул жидкости. Действительно, в отсутствие электрического поля молекулы жидкости, обладающие диэлектрическим моментом, ориентированы хаотическим образом. В электрическом поле диполи ориентируются вдоль

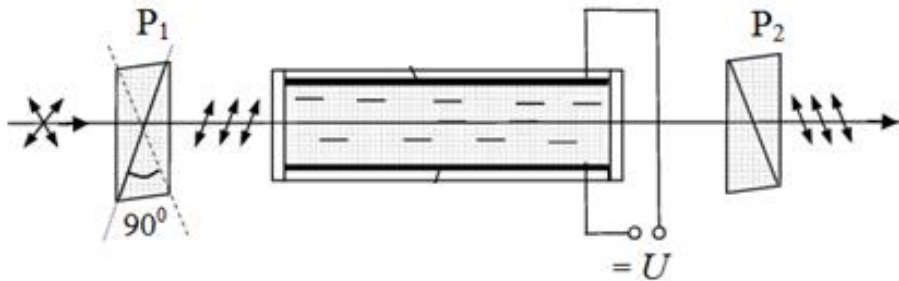


Рис. 5.14. Эффект Керра: P_1, P_2 – скрещенные поляризаторы [4]

электрического поля, что и приводит к оптической анизотропии жидкости. Время установления ориентации дипольных молекул чрезвычайно мало (порядка 10–10с), поэтому ячейка Керра, помещенная между скрещенными поляризаторами, является безинерционным световым затвором. В отсутствие электрического поля свет через оптическую систему не проходит, так как оптические оси поляризаторов P_1 и P_2 скрещены под углом 90° . При приложении напряжения к обкладкам ячейки Керра на её выходе появляются два луча, поляризованные вертикально и горизонтально, с разностью фаз δ , определяемой разностью их показателей преломления (в радианах):

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) = 2\pi B E^2. \quad (5.14)$$

Из ячейки Керра выйдет свет, в общем случае поляризованный эллиптически. Вместо жидкости можно использовать специальные электрооптические кристаллы, например, титанат бария ($BaTiO_3$), кварц (SiO_2) и т.д., и тогда схема будет изображать принцип действия модулятора светового излучения, которые широко используются в современных оптоволоконных линиях связи. Явление искусственной анизотропии используется [в работе LCD- дисплея](#).

5.3.4. Вращение плоскости поляризации

Некоторые вещества, называемые оптически активными, обладают способностью вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через них плоскополяризованного света. К числу таких веществ принадлежат кристаллические тела (кварц, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически

активных веществ в неактивном растворителе (водные растворы сахара, винной кислоты и др.).

Кристаллические вещества интенсивнее всего вращают плоскость поляризации тогда, когда свет распространяется вдоль оптической оси кристалла. Угол поворота плоскости поляризации выражается как $\varphi = \alpha l$, где l – длина пути, пройденного лучом; α – постоянная вращения, зависящая от длины волны света, природы вещества и температуры.

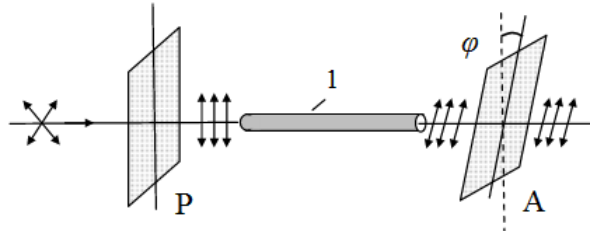


Рис. 5.15. Устройство сахариметра: P – поляризатор, A – анализатор, 1 – кювета с раствором сахара [4]

Для растворов угол поворота плоскости поляризации пропорционален пути света l в растворе и концентрации c активного вещества: $\varphi = [\alpha]cl$, где коэффициент $[\alpha]$ называется удельной постоянной вращения.

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации оптически активные среды подразделяются на правовращающие (вращение происходит по часовой стрелке, если смотреть по ходу луча) и левовращающие.

Оптически неактивные вещества приобретают способность [вращать плоскость поляризации под действием магнитного поля](#). Это явление называется эффектом [Фарадея](#). Оно наблюдается только при распространении света вдоль направления магнитного поля и объясняется прецессионным движением электронных орбит атомов вещества.

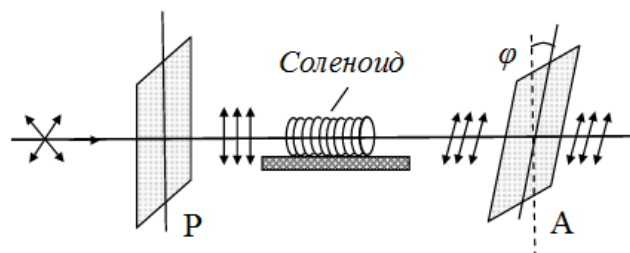


Рис. 5.16. Вращение плоскости поляризации в продольном магнитном поле [4]

Угол поворота плоскости поляризации подчиняется закону $\varphi = V l H$, где l – длина пути луча в среде, V – удельное магнитное вращение (постоянная [Верде](#)), H – напряженность магнитного поля. Направление вращения зависит от направления вектора напряженности магнитного поля.

Оптически активные вещества под действием магнитного поля приобретают дополнительную возможность вращать плоскость поляризации, которая складывается с их естественной способностью так, что результирующий угол будет равен сумме углов магнитного и естественного вращений. Используется в лазерных гироскопах, лазерной измерительной технике, лазерных передатчиках в системах связи как элемент защитного оптического изолятора. Кроме того, эффект

применяется при создании ферритовых СВЧ-устройств. В частности, эффект Фарадея лежит в основе работы циркуляторов СВЧ- и оптического диапазона.

5.4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение плоской монохроматической электромагнитной волны.
2. Какой свет называется естественным?
3. Какой свет называется поляризованным?
4. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
5. Объясните явление полного внутреннего отражения и сформулируйте условия, при которых оно выполняется.
6. При каком условии отраженный свет будет полностью поляризованным?
7. Объясните устройство и принцип работы поляризатора Столетова.
8. Дайте определение двойного лучепреломления и объясните ход лучей в одноосных кристаллах.
9. Объясните устройство и принципы действия поляризаторов.
10. Сформулируйте закон Малюса.
11. Приведите примеры использования искусственного двойного лучепреломления.
12. Какие среды называются оптически активными?

5.5 Тестовые задания [9-12]

1. Электромагнитное взаимодействие в вакууме распространяется со скоростью ... ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с)

Варианты ответов: а) меньше c ; в) больше c ; **в)** равна c .

2. Укажите ошибочный ответ. В электромагнитной волне ...

- 1) вектор \vec{E} колеблется, перпендикулярно \vec{B} и \vec{v} ;
- 2) вектор \vec{B} колеблется, перпендикулярно \vec{E} и \vec{v} ;
- 3) вектор \vec{E} колеблется параллельно \vec{B} и перпендикулярен \vec{v} .

Варианты ответов: а) 1; б) 2; **в)** 3; г) 1 и 2; д) 1 и 3.

3. Какие из следующих четырех утверждений, касающиеся свойств электромагнитной волны (ЭМВ), правильные:

- 1) ЭМВ — поперечная волна;
- 2) скорость ЭМВ в веществе меньше скорости света в вакууме;
- 3) заряд, движущийся прямолинейно равномерно, излучает ЭМВ;
- 4) электрическое и магнитное поля ЭМВ колеблются в противофазе.

Варианты ответов: а) 1, 4; б) 2, 3; **в)** 1, 2; г) 1, 4; д) 3, 4.

4. Параллельно какой координатной оси «бежит» плоская электромагнитная волна, если в некоторый момент времени в точке с координатами (x, y, z) напряжённость электрического поля = $(E, 0, 0)$, а индукция магнитного поля = $(0, 0, B)$?

Варианты ответов: а) $+x$; б) $-x$; **в)** $+y$; г) $-y$; д) $+z$; е) $-z$.

5. Рассмотрим два случая движения электрона:

- 1) электрон равномерно движется по окружности;
- 2) электрон совершает колебательные движения;

- 3) электрон движется равномерно и прямолинейно;
 4) электрон движется равноускорено и прямолинейно.

В каких случаях происходит излучение электромагнитных волн?

Варианты ответов: а) только в 1-м случае; б) только во 2-м случае;
 в) в случаях 1, 2, 4; г) в случаях 1, 2, 3;
 д) 2, 3, 4; д) во всех случаях.

6. Радиостанция работает на частоте 100 МГц. Считая, что скорость распространения электромагнитных волн в атмосфере равна скорости света в вакууме, найдите соответствующую длину волны.

Варианты ответов: а) 3м; б) 30 м; в) 1м; г) 10м.

7. На рисунке 5.17 показан световой луч, прошедший границу раздела двух прозрачных сред. Какие из следующих четырех утверждений правильные, а какие — неправильные. 1) Скорость света в среде 1 меньше, чем в среде 2;
 2) оптическая плотность среды 2 меньше, чем оптическая плотность среды 1;
 3) угол преломления луча больше 45° ; 4) относительный показатель преломления первой среды относительно второй больше 1,3.

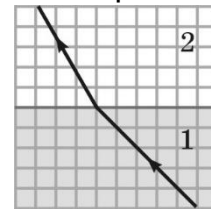


Рис. 5.17

Варианты ответов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 1 и 4;
 е) 1, 2, 3, 4. ж) нет правильного ответа.

8. Произойдет ли полное внутреннее отражение луча, входящего в линзу параллельно оптической оси на высоте 5 мм, если показатель преломления материала линзы $n = 1,5$. Радиусы кривизны поверхностей линзы равны $r_1 = \infty$, $r_2 = -10,0$.

Варианты ответов: а) не произойдет; б) произойдет; в) нельзя определить.

9. Плоскопараллельная пластинка толщиной 5 мм поставлена перпендикулярно оптической оси системы. На какой угол необходимо наклонить пластинку, чтобы луч сместился параллельно самому себе на 0.1 мм. Показатель преломления стекла пластины $n = 1,7$. Укажите правильный ответ.

Варианты ответов: а) $2,78^\circ$; б) $3,23^\circ$; в) $2,3^\circ$; д) $2,5^\circ$.

10. В прозрачной среде с показателем преломления 1.2 имеется сферическая воздушная полость диаметром $d=5$ см. В среде распространяется параллельный пучок света, диаметр которого больше d . Радиус светового пучка (см), проникшего в воздушную полость:

Варианты ответов: а) 1.33; б) 1.43; в) 1.25; г) 2.08.

11. Если торец изогнутого стеклянного стержня или нити впустить световой поток, то он почти без ослабления доходит до другого торца. Какое явление лежит в основе действия таких светопроводов?

Варианты ответов:

- а) полное отражение света на границе раздела стекло – воздух;
- б) рассеяние света; в) поглощение света на границе раздела стекло – воздух;
- г) интерференция световых волн; д) дифракция световых волн;

12. Какое явление показывает поперечность световых волн?

Варианты ответов:

- а) явление поляризации; б) явление дифракции; в) явление дисперсии;
- г) явление интерференции; д) явление рассеяния.

13. На диэлектрическое зеркало под углом Брюстера падает луч естественного света. Для отраженного и преломленного луча справедливы утверждения

- 1) отраженный луч полностью поляризован;
- 2) отраженный луч поляризован частично;
- 3) преломленный луч полностью поляризован;
- 4) оба луча не поляризованы; 5) преломленный луч частично поляризован.

Варианты ответов: а) 1 и 3; б) 1 и 5; в) 2 и 3; г) 4.

14. При падении света из воздуха на диэлектрик отражённый луч полностью поляризован. Угол преломления равен 30° . Тогда показатель преломления приблизительно равен:

Варианты ответов: а) 1,73; б) 2; в) 1,41; г) 1,5.

15. При падении света из воздуха на диэлектрик отраженный луч полностью поляризован при угле падения 60° . При этом угол преломления равен ...

Варианты ответов: а) 30° ; б) 45° ; в) 60° ; г) 90° .

16. На пути естественного света интенсивностью J_0 помещены две пластинки турмалина (рисунок 5.18). После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если J_1 и J_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, то согласно закону Малюса интенсивность света после второго поляризатора равна ...

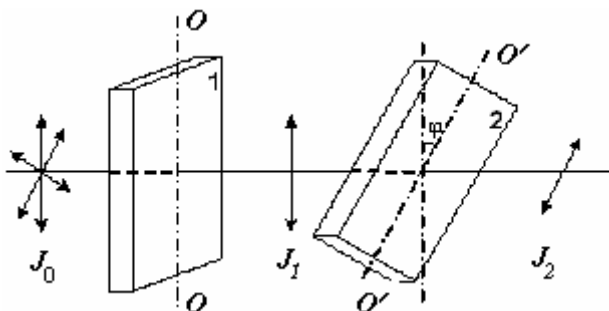


Рис. 5.18.

Варианты ответов: а) $J_2 = \frac{J_0}{2} \cos^2 \varphi$; б) $J_2 = J_0 \cos^2 \varphi$;

$$\begin{aligned} \text{в)} J_2 &= \frac{J_0}{2} \cos \varphi; & \text{г)} J_2 &= \frac{J_0}{2}; \\ \text{д)} J_2 &= J_0^2 \cos \varphi; & \text{е)} J_2 &= \frac{J_0^2}{2} \cos \varphi. \end{aligned}$$

17. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина (рисунок 5.18). После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если J_1 и J_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями OO и $O'O'$ $\varphi=45^\circ$, то J_1 и J_2 связаны соотношением ...

Варианты ответов:

$$\begin{aligned} \text{а)} J_2 &= \frac{J_1}{2}; & \text{б)} J_2 &= \frac{3}{4} J_1; \\ \text{в)} J_2 &= \frac{J_1}{4}; & \text{г)} J_2 &= J_1. \end{aligned}$$

18. На пути естественного света интенсивностью J_0 помещены две пластинки турмалина (рисунок 5.18). После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если J_1 и J_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и $J_2 = J_1$, тогда угол φ между направлениями OO и $O'O'$ равен ...

Варианты ответов: а) 0° ; б) 45° ; в) 30° ; г) 90° ; д) 60° .

19. Оптически активными называются вещества:

Варианты ответов:

- а) способные вращать плоскость поляризации в отсутствии внешних воздействий;
- б) при прохождении через которые естественный свет становится линейно поляризованным;
- в) способные поглощать один из лучей при двойном лучепреломлении;
- г) способные пропускать естественный свет без каких-либо изменений;
- д) способные вращать плоскость поляризации под действием магнитного поля.

20. Оптической осью кристалла называется:

Варианты ответов:

- а) направление, вдоль которого не происходит двойного лучепреломления;
- б) направление, вдоль которого свет идет не преломляясь;
- в) направление, вдоль которого происходит двойное лучепреломление;
- г) направление, вдоль которого свет через кристалл не проходит;
- д) направление, вдоль которого наблюдается максимальная поляризация.

21. Возникновение двойного лучепреломления в жидкостях и аморфных телах под воздействием электрического поля называется:

- а) эффектом Керра; б) эффектом Вавилова-Черенкова;
- в) эффектом Фарадея; г) фотоупругим эффектом; д) эффектом Холла.

22. Что такое плоско поляризованный луч?

Варианты ответов:

- а) световой луч, электрический вектор которого, совершает колебания в одной плоскости;

- б) световой луч, направление колебания электрического вектора которого, совпадает с направлением луча;
в) световой луч, конец электрического вектора которого, совершает вращение вокруг вектора направления;
г) световой луч, получаемый с помощью дифракционной решетки из белого света;
д) световой луч, направление колебания электрического вектора которого, не совпадает с направлением луча.

23. Луч естественного света при прохождении через кристалл исландского шпата, разделяется на обыкновенный и необыкновенный лучи. Каковы особенности этих лучей?

Варианты ответов:

- а) плоскости колебания перпендикулярны;
б) оба луча не поляризованы;
в) обыкновенный – поляризован, необыкновенный – не поляризован;
г) обыкновенный – не поляризован, необыкновенный – поляризован;
д) плоскости колебания параллельны.

24. Известно, что явление вращения плоскости поляризации заключается в повороте плоскости и поляризации световой волны на угол поворота φ при прохождении ею расстояния d в оптически активном веществе. Связь между углом поворота и d для твердых оптически активных тел имеет вид:

- а) $\varphi = \alpha * d$; б) $\varphi = \omega * t$; в) $\varphi = \alpha * d^2$; г) $\varphi = \frac{d}{\alpha}$;
д) $d = \varphi * \alpha$.

25. Угол поворота φ плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара равен 40° . Длина трубки $d = 35$ см. Удельное вращение сахара $[\alpha] = 0.67$ град*м³/мкг. Массовая концентрация раствора равна:

- Варианты ответов:** а) 246 кг/м³; б) 325 кг/м³; в) 171 кг/м³; г) 522 кг/м³.

6. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. [Савельев И.В.](#) Курс общей физики. В 4-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика [Текст]: учебник. Москва: КноРус, 2012. – 576 с.
2. [Трофимова Т.И.](#) Основы физики. Электродинамика [Текст]: учебное пособие. Москва: КноРус, 2015. – 272 с.
3. [Полунин В.М.](#) Физика. Электромагнитные явления [Текст]: конспект лекций. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2004. – 187 с.
4. [Жакин А.И.](#) Лекции по оптике [Текст]: учебное пособие. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2009. – 207 с.
5. [Гольдштейн А.Е.](#) Физические основы получения информации: учебник / А.Е. Гольдштейн. – Томск: Томск. политех. ун-т, 2010. – 292 с.
6. [Чуриков А.В.](#), Казаринов И.А. Электронный вариант курса лекций. «Современные химические источники тока» [Электронный ресурс]: Саратов, 2008.
7. [Полунин В.М.](#) Электростатика, постоянный электрический ток, электромагнитные явления. Тестовые задания по физике для проверки качества знаний [Текст]:

учебно-практическое пособие. /В.М. Полунин, А.Г. Беседин, Г.Т. Сычев. – Курск: Юго-западный гос. ун – т, 2010. – 180 с.

8. [Сомина](#) Л.А. Методические указания по курсу общей физики (Программированный контроль знаний теоретического материала в лабораторных работах). – / Л.А. Сомина, Л.А.Герман, Т.А.Шигорова, Е.И Басина., Т.О. Павлова. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. – 52 с.
9. Материал для тестовых заданий взят с сайта <https://infourok.ru/test-po-teme-elektromagnitnie-volni-1138669.html>.
10. Материал для тестовых заданий взят с сайта <https://docbase.org/2176-test-na-temu-elektromagnitnye-volny.html>
11. Материал для тестовых заданий взят с сайта <https://infourok.ru/testi-po-fizike-dlya-podgotovki-na-ent-po-optike-906889.html>