

Н.Г. ДРОЗДОВ
Н.В. НИКУЛИН

ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



ПРОФТЕХИЗДАТ • 1960

УЧЕБНИКИ

Китаев В. С. Электротехника, ц. 5 р. 05 к. (с 1/I—61 г. цена 51 коп.), 1960 г.

Петров В. К. Сборник задач по электротехнике, ц. 3 р. 35 к. (с 1/I—61 г. цена 34 коп.), 1960 г.

Блудов М. И. Преподавание физики, ц. 6 р. 30 к. (с 1/I—61 г. цена 63 коп.), 1960 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОСОБИЯ

Кузнецкий Г. И., Пушторский И. И. Практикум по электротехнике и монтажу сельских электроустановок, ц. 1 р. 75 к. (с 1/I—61 г. цена 18 коп.), 1959 г.

СЕРИЯ «НОВАЯ ТЕХНИКА И ПЕРЕДОВЫЕ МЕТОДЫ ТРУДА»

«БИБЛИОТЕКА МОЛОДОГО РАБОЧЕГО»

Брискин Л. Я. Монтаж и эксплуатация электрооборудования на строительстве, ц. 6 р. 25 к. (с 1/I—61 г. цена 63 коп.), 1958 г.

Быховский Я. Л. Телемеханика и ее применение, ц. 1 р. 70 к. (с 1/I—61 г. цена 17 коп.), 1956 г.

УЧЕБНЫЕ ПЛАКАТЫ

Китаев В. С. Электротехника, 25 пл., ц. 75 р. (с 1/I—61 г. цена 7 р. 50 к.), 1960 г.

Бакинов В. Н. Радиотехника, 20 пл., ц. 60 р. (с 1/I—61 г. цена 6 руб.), 1960 г.

Н. Г. ДРОЗДОВ, Н. В. НИ

ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Одобрено Ученым советом Государственного комитета Совета
Министров СССР по профессионально-техническому образованию
в качестве учебного пособия для профессионально-технических
учебных заведений*

ВСЕСОЮЗНОЕ УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПРОФТЕХИЗДАТ
Москва 1960

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

В книге в доступной форме рассматриваются электрические явления, протекающие в электротехнических материалах: проводниковых, полупроводниковых и электронизоляционных. На основании этого устанавливаются основные свойства и характеристики электротехнических материалов. Описываются способы определения электрических, механических и физико-химических характеристик диэлектриков. Наибольшее внимание уделяется новым материалам: синтетическим диэлектрикам — высокополимерным и керамическим, а также полупроводниковым и магнитным материалам, широко применяемым в электротехнике и радиотехнике.

Книга написана в соответствии с учебной программой для ремесленных и технических училищ по курсу «Электроматериаловедение» и предназначена в качестве учебного пособия для учащихся этих училищ. Она может быть также использована для подготовки электротехнических кадров в системе индивидуального и бригадного ученичества и для производственного обучения учащихся средних общеобразовательных школ.

Со всеми замечаниями и предложениями просим обращаться по адресу: Москва, Центр, Хохловский пер., 7, Профтехиздат.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая электрические машины, аппараты и различные электротехнические устройства, можно видеть, что основные их части выполнены из специальных электротехнических материалов, обладающих свойствами, отличными от свойств обычных конструкционных материалов.

Действительно, электроизоляционный лак, которым пропитаны обмотки электрической машины, и электротехническая сталь, из которой сделан сердечник машины, относятся к материалам электротехническим. В то же время лак, которым покрыт корпус машины, и сталь, из которой изготовлен вал машины, не являются электротехническими материалами, так как они не обладают свойствами, присущими этим материалам.

Все электротехнические материалы делятся на группы по какому-либо их главному свойству, например электропроводности. Так, материалы, из которых изготавливаются токоведущие части электрических машин, аппаратов и устройств (обмотки, контакты и др.), должны хорошо проводить электрический ток. Эту группу электротехнических материалов составляют проводниковые материалы (проводники), обладающие высокой электропроводностью. Другая, более обширная группа среди электротехнических материалов обладает свойством, противоположным свойству проводников. Это — группа электроизоляционных материалов, или диэлектриков, у которых наблюдается весьма малая электропроводность. Поэтому электроизоляционные материалы применяются для изоляции токоведущих частей установок (проводов, контактов и др.) одна от другой и от заземленных элементов электрооборудования. В электрических конденсаторах электроизоляционные материалы используются для создания электрической емкости. Отдельные виды диэлектриков — пьезоэлектрики находят применение в ультразвуковых установках в качестве пьезоэлементов, т. е. элементов, создающих ультразвуковые колебания.

Третью группу среди электротехнических материалов составляют полупроводниковые материалы (полупроводники). Эта группа материалов по своей способности проводить электрический ток занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Благодаря своим особым свойствам полупроводники применяются для изготовления выпрямителей, усилителей, фотоэлементов и нелинейных сопротивлений, широко используемых в различных областях электротехники и радиотехники.

Следует заметить, что разделение электротехнических материалов на три группы было произведено по их способности проводить электрический ток. Однако это свойство электротехнических материалов не является единственным. Среди электротехнических материалов есть еще одна группа, которая обладает комплексом магнитных свойств, отличающих ее от рассмотренных ранее трех групп материалов. Это группа магнитных материалов. Последние применяются для создания путей с малым магнитным сопротивлением (магнитопроводы), т. е. для концентрации магнитной энергии в электрических машинах, аппаратах и приборах. По отношению к электрическому току большинство магнитных материалов является проводниками (магнитные стали и сплавы), но некоторые из магнитных материалов — ферриты относятся к полупроводникам.

Из приведенной классификации электротехнических материалов видно большое разнообразие их свойств. Поэтому для создания современных экономичных и надежных в работе конструкций электрических машин, аппаратов и приборов необходим правильный выбор электротехнических материалов. Эту задачу можно выполнить, если хорошо знать свойства электротехнических материалов и особенности их поведения в электрических и магнитных полях. В процессе работы электротехнические материалы (электроизоляционные, магнитные, полупроводниковые) изменяют свои первоначальные характеристики. Это может привести к нарушению нормальной работы электротехнических устройств. Своевременная замена материалов в электрических машинах, аппаратах и приборах также возможна лишь при хороших знаниях свойств электротехнических материалов.

Разработка новых электротехнических материалов с улучшенными или новыми свойствами способствует развитию электротехники и радиотехники. Так, например, разработка новых нагревостойких, кремнийорганических диэлектриков позволила повысить перегрев электрических машин, а это привело к значительному увеличению мощности машин без изменения их габаритов и веса. То же можно сказать о применении новых сортов холоднокатаной электротехнической стали. Создание новых магнитных материалов — ферритов — позволило решить ряд важных проблем в области высококачественной техники и электроники.

Чтобы знать особенности поведения новых видов электротехнических материалов в электрических и магнитных полях и правильно определять их области применения, необходимо изучить основы современного электроматериаловедения. Курс «Электроматериаловедение» имеет своей целью познакомить учащихся с основными группами электротехнических материалов, нашедших наиболее широкое применение в электротехнике и радиотехнике. При прохождении курса «Электроматериаловедение» главное внимание должно быть уделено электрическим и физико-химическим свойствам материалов, а также основам их технологий.

Глава первая

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

§ 1. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Одним из электрических явлений, протекающих во всех электротехнических материалах, является электропроводность. Известно, что каждый из материалов, будь то проводник, полупроводник или диэлектрик, проводит электрический ток, т. е. в нем имеет место явление электропроводности.

Проводниковые материалы (серебро, медь, алюминий и др.) очень хорошо проводят электрический ток; полупроводники (германий, кремний и др.) проводят ток в меньшей мере, чем проводниковые материалы. В диэлектриках же наблюдаются очень малые токи, даже если приложить к ним высокие напряжения (от 1000 в и выше). Величина, с помощью которой количественно оценивается электропроводность материалов, называется удельным электрическим сопротивлением. Удельное электрическое сопротивление обозначается греческой буквой ρ (ро). Эта величина определяется согласно формуле, даваемой в электротехнике для подсчета общего сопротивления материала:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где R — электрическое сопротивление образца материала длиной l при площади поперечного сечения S ;

ρ — удельное электрическое сопротивление материала.

Из формулы (1) вытекает формула для непосредственного подсчета удельного электрического сопротивления данного материала:

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (2)$$

Если выбрать единицей геометрических размеров сантиметр, т. е. если длину l образца материала выразить в сантиметрах (см), а площадь поперечного сечения S образца — в см^2 (квадратный сантиметр), то удельное объемное сопротивление мате-

риала будет выражаться в омсантиметрах ($\text{ом} \cdot \text{см}$). Поскольку величина ρ характеризует способность материала пропускать электрический ток через свой объем, то она получила название удельного объемного сопротивления. Это отмечается индексом v , а сама величина удельного объемного сопротивления обозначается ρ_v . Удельное объемное сопротивление является одной из электрических характеристик материалов. Для всех электротехнических материалов ρ_v колеблется в широких пределах: от $10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ до $10^{20} \text{ ом} \cdot \text{см}$ и выше. Удельное объемное сопротивление может быть положено в основу распределения всех электротехнических материалов на три основные группы: проводники, полупроводники и диэлектрики.

У проводниковых материалов величина удельного объемного электрического сопротивления находится в пределах от 10^{-6} до $10^{-2} \text{ ом} \cdot \text{см}$, у полупроводников — от 10^{-2} до $10^{10} \text{ ом} \cdot \text{см}$, а у диэлектриков эта характеристика изменяется от 10^{10} до $10^{20} \text{ ом} \cdot \text{см}$ и выше.

Наряду с величиной ρ_v для диэлектриков существует вторая величина удельного сопротивления, которая количественно определяет электрическое сопротивление материала при протекании тока по его поверхности. Эта величина получила название удельного поверхностного сопротивления и обозначается той же буквой ρ , но с индексом s , т. е. ρ_s (измеряется в омах).

Для рассмотрения физических процессов, происходящих в электротехнических материалах под действием электрического напряжения, удобнее пользоваться не величиной удельного электрического сопротивления, а обратной ей величиной — удельной проводимостью, которая обозначается греческой буквой γ (гамма) и равна:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (3)$$

Аналогично удельным электрическим сопротивлениям различают величину удельных проводимостей: объемную (γ_v) и поверхностную (γ_s), причем размерность первой величины γ_v ($\text{ом} \cdot \text{см}$) $^{-1}$, а второй γ_s (ом) $^{-1}$. Физическая сущность этих величин состоит в том, что они показывают, насколько один материал лучше или хуже другого проводит электрический ток. Например, объемная проводимость меди $\gamma_v = 5,7 \cdot 10^5 (\text{ом} \cdot \text{см})^{-1}$, а парафина $\gamma_v = 4,2 \cdot 10^{-16} (\text{ом} \cdot \text{см})^{-1}$, т. е. проводимость меди велика, а проводимость парафина ничтожно мала.

Электрический ток есть результат направленного движения электрически заряженных частиц — электронов и ионов. Электроны имеют отрицательный заряд. Обычно они связаны электрическими силами с положительно заряженными ядрами атомов и не являются свободными. Однако будучи освобожденными от этой связи с атомами, они получают способность двигаться под влиянием внешнего электрического поля и создают ток. Атомы, которые потеряли некоторое количество электронов, становятся

положительно заряженными ионами с зарядом, равным сумме утерянных электронов. Отрицательными же ионами становятся те атомы, которые приобрели электроны у других атомов. Их заряд равен сумме приобретенных электронов. Эти положительные и отрицательные ионы могут оказаться свободными, т. е. получить способность перемещаться под действием сил электрического поля. Свободные электроны и ионы часто называются носителями электрического тока.

Чем больше свободных заряженных частиц в материале, тем большей проводимостью обладает данный материал, и наоборот. Так как проводимость у проводников большая $\gamma = 10^6 - 10^4$ (ом·см)⁻¹, а у диэлектриков малая $\gamma = 10^{-10}$ (ом·см)⁻¹ и ниже, то очевидно, что в проводниках значительно больше заряженных частиц, чем в диэлектриках.

В зависимости от того, какие заряженные частицы — электроны или ионы — создают электрический ток, различают материалы с электронной электропроводностью и материалы с ионной электропроводностью.

§ 2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРОВОДНИКОВ

Проводниковые материалы (медь, алюминий, железо и др.) относятся к материалам кристаллического строения. Они имеют кристаллическую решетку, в узлах * которой расположены ионы. В случае кубической решетки расстояния между ионами по всем трем направлениям одинаковы. Валентные электроны положительно заряженных ионов становятся свободными и передвигаются в разных направлениях, распределяясь равномерно по всему объему кристалла. Таким образом, металлический проводник состоит из положительных ионов, которые лишь колеблются около своих узлов, и из хаотично движущихся электронов.

Если к концам металлического проводника приложить электрическое напряжение, то хаотическое движение электронов превратится в упорядоченное (направленное) движение с преимущественным направлением от конца проводника, приключенного к минусу источника тока, к концу проводника, приключенного к плюсу источника тока, т. е. создастся электрический ток. Так как количество свободных электронов велико, то электрический ток будет увеличиваться во столько раз, во сколько повысится напряжение. Это означает, что величина удельной проводимости γ или величина удельного электрического сопротивления ρ металлов при изменении напряжения остается постоянной, что является характерным свойством всех металлических проводников. Это свойство выражается линейной зависимостью тока от напряжения:

$$I = \frac{U}{R} = GU, \quad (4)$$

* Места, занимаемые ионами в кристаллической решетке, называются ее узлами.

где R — электрическое сопротивление проводника;
 G — проводимость проводника;
 U — величина приложенного напряжения.

На величину электрического удельного сопротивления любого металлического проводника оказывает влияние нагрев его, т. е. температура. С повышением температуры проводникового материала сопротивление его увеличивается, а с понижением температуры оно понижается. Нагрев проводника повышает энергию ионов, составляющих кристаллическую решетку металла, в результате чего колебания их в узлах решетки усиливаются. Это усиление колебаний затрудняет движение электронов, которые чаще сталкиваются с ионами и в меньшем количестве участвуют в создании электрического тока. Ток уменьшается, хотя напряжение остается неизменным. Это свидетельствует об увеличении сопротивления проводника. Если через R_0 обозначить величину электрического сопротивления проводника при температуре t_0 , а через R_t — сопротивление при температуре t , то это сопротивление выразится согласно формуле

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)], \quad (5)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления.

Формула для удельных электрических сопротивлений напишется совершенно тождественно:

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha (t - t_0)]. \quad (6)$$

На величину электрического сопротивления металлических проводников оказывают также влияние различные примеси. Проводниковые материалы, очищенные от примесей, обладают более низкими сопротивлениями, чем материалы, загрязненные примесями.

§ 3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводниковые материалы тоже обладают проводимостью. Проводимость полупроводниковых материалов значительно меньше, чем металлических проводников. Это объясняется тем, что в полупроводниках электроны связаны с атомами и становятся свободными лишь при определенных условиях. Освобождение их может произойти в результате нагрева полупроводников внешним источником тепла, что повышает энергию электронов. Этим самым электроны переводятся в другую энергетическую область, где они свободно движутся под действием приложенного напряжения.

Такая область повышенной энергии, где электроны создают электрический ток, называется областью или зоной проводимости. Для многих полупроводников достаточно невысокой температуры, например комнатной, чтобы перевести некоторое количество электронов в зону проводимости. Дальнейшее повышение

температуры усиливает процесс такого перехода, и проводимость полупроводника увеличивается. Электропроводность, обусловленная в полупроводниках электронами, называется электронной электропроводностью или электропроводностью n -типа, так как носителями тока являются электроны, имеющие отрицательный электрический заряд. В данном случае электроны, создающие ток, принадлежат атомам самого полупроводника, а не атомам примеси, поэтому такую электропроводность называют собственной.

У атомов, где электрон перешел в зону проводимости, образовался, таким образом, недостаток одного электрона. Атомы превратились в положительные ионы, которые, однако, закреплены на месте и не в состоянии двигаться и принимать участие в создании тока. Этот недостаток электрона в закрепленном атоме делает его подобным положительному заряду.

Место отсутствующего электрона может занять электрон с соседнего атома, у которого такого недостатка нет, но в результате перехода появится недостаток в электроне у другого атома. Подобный процесс может иметь место одновременно у многих атомов.

Если приложить электрическое напряжение, перескок электронов с одних атомов на другие (соседние) примет характер направленного перемещения их в одну сторону. Одновременно с этим образующиеся положительно заряженные атомы будут возникать в направлении, противоположном движению электронов. Это будет похоже на движущиеся положительные заряды, т. е. на ток, создаваемый положительными электрическими зарядами, которые движутся в направлении, противоположном движению электронов.

Такой недостаток в атоме электрона в результате перехода его в зону проводимости получил название дырки или вакансии (в атоме). Электрический же ток, образующийся в результате движения дырок, называют дырочным током. Электропроводность, обусловленная дырочным током, называется дырочной электропроводностью или электропроводностью p -типа, так как она создается положительными носителями тока. Таким образом, полупроводники обладают собственной электропроводностью n - и p -типов, которая проявляется при определенных температурных условиях. Понижение температуры, очевидно, будет уменьшать собственную электропроводность, и при низких температурах процесс перехода электронов в зону проводимости может стать очень слабым и даже совершенно прекратиться. При таких температурах полупроводники становятся диэлектриками.

Электронную или дырочную электропроводность в полупроводниках можно создать искусственно внесением в них атомов различных примесей. У одних атомов, вносимых в качестве примеси в полупроводник, валентные электроны по своему энергетическому состоянию могут приближаться к электронам в зоне про-

водимости. Такие электроны перейдут в зону проводимости уже при более низких температурах, чем это требуется в случае собственной проводимости. Атомы примеси, снабжающие полупроводник свободными электронами, называют донорными (доноры).

Другие атомы, употребляемые в качестве примесей в полупроводниках, обладают способностью присоединять к себе электроны сверх тех, которые они имеют. Такие атомы будут брать электроны у атомов самого полупроводника. В результате этого

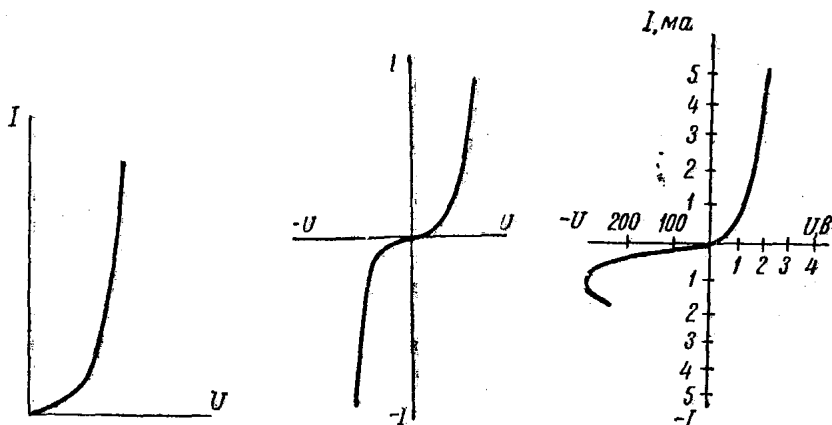


Рис. 1. Вольтамперная характеристика полупроводника

Рис. 2. Симметричная вольтамперная характеристика полупроводника

Рис. 3. Несимметричная вольтамперная характеристика полупроводника

в полупроводнике образуется недостаток электронов, или дырки. Атомы примеси, создающие в полупроводнике дырки, получили название акцепторов. Следовательно, смотря по тому, что вносится в качестве примеси в данный полупроводник, он может иметь электронную или дырочную электропроводность. Примесная, как и собственная электропроводность, может быть n - и p -типа. С повышением температуры проводимость полупроводников увеличивается, а при понижении температуры уменьшается.

Если полупроводник подключить к источнику постоянного тока и измерять ток при разных напряжениях, начиная с малых их величин до высоких, то можно заметить, что прямой зависимости между током и напряжением, которая имеет место в проводниках, здесь нет. Ток при повышении напряжения возрастает значительно интенсивней по сравнению с приложенным напряжением U .

Это хорошо иллюстрируется так называемой вольтамперной характеристикой, представленной на рис. 1. Если при перемене напряжения на обратное ($-U$) изменение направления тока в полупроводнике происходит по такому же закону, но в обратном направлении, то полупроводник имеет симметричную вольтампер-

ную характеристику (рис. 2). Искусственно можно создать разные по величине электрические сопротивления полупроводника в двух направлениях, а именно: в одном направлении сопротивление полупроводника может быть меньше, а в противоположном — больше. Тогда в разных направлениях будет течь ток различной величины: больший в направлении с меньшим сопротивлением, меньший — в направлении с большим сопротивлением. В этом случае получится несимметричная вольтамперная характеристика, представленная на рис. 3. В таком полупроводнике различают прямой ток I , быстро возрастающий, и обратный ток ($-I$), нарастание которого очень мало даже при высоких напряжениях. Последнее направление часто называется запирающим.

§ 4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

У диэлектриков проводимость весьма мала. По своему характеру она может быть электронной и ионной. Многие диэлектрики, имеющие в своем составе ионные соединения, например стекло, фарфор и др., обладают ионной электропроводностью. В этих диэлектриках движущимися заряженными частицами, создающими электрический ток, являются положительно и отрицательно заряженные ионы. Такой вид электропроводности может встретиться и у жидких диэлектриков.

Под действием внешнего электрического напряжения ионы будут двигаться соответственно знаку своего заряда, т. е. положительные ионы к катоду, а отрицательные к аноду. Дойдя до электрода, ионы нейтрализуются и могут создать слой отложившегося вещества, как это имеет место при электролитических процессах. Аналогичный процесс наблюдается и у твердых диэлектриков, которые обладают ионной электропроводностью. По этому признаку, т. е. по наличию на поверхностях диэлектрика (обращенных к электродам) отложившегося вещества, устанавливают, что данный диэлектрик обладает ионной электропроводностью. Анализируя химически это вещество, можно определить, какие ионы создавали электрический ток.

Наряду с ионной диэлектрики могут иметь и электронную электропроводность, аналогично полупроводникам.

По видам электропроводности диэлектрики могут быть разбиты на две группы: одни обладают преимущественно электронной или соответственно дырочной электропроводностью, а другие — преимущественно ионной электропроводностью. Установлено, что диэлектрики с электронной электропроводностью, как и полупроводники, обладают симметричной вольтамперной характеристикой (рис. 4), однако в диэлектрике начальная часть вольтамперной характеристики (участок OA) соответствует характеристике полупроводника в запирающем направлении. При небольших напряжениях ток нарастает пропорционально напряжению, затем он почти не изменяется и наконец начинает сильно

возрастать (участок АБ). Возрастание тока в диэлектрике, следовательно, происходит в области весьма высоких напряженностей электрического поля*, т. е. когда к диэлектрику приложено высокое напряжение.

Описанная выше электропроводность является общим свойством всех электротехнических материалов независимо от их физической и химической сущности. Однако каждая из трех групп электротехнических материалов обладает еще присущими только ей характерными свойствами. Разберем дополнительные свойства диэлектриков, поскольку в них протекают сложные электрические явления.

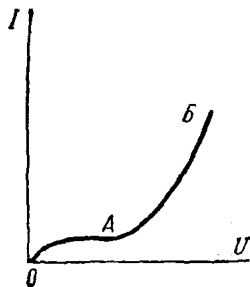


Рис. 4. Вольтамперная характеристика диэлектрика

Диэлектрики по своему физическому состоянию разделяются на газообразные, жидкие и твердые; по структуре — на кристаллические и аморфные и по своей химической природе — на органические и неорганические. Каждая из этих групп диэлектриков обладает своими, несколько отличными свойствами. Однако всем им присущи

следующие физические процессы. Все диэлектрики в электрическом поле поляризуются, что связано с упорядочением внутри диэлектрика связанных заряженных частиц. Во всех диэлектриках под действием переменного напряжения происходит рассеивание электрической энергии, переходящей в тепловую. В сильных электрических полях диэлектрики могут быть разрушены, пробиты. Место пробоя в диэлектрике обладает большой проводимостью.

§ 5. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электрическую поляризацию диэлектриков можно объяснить, представив диэлектрик 1 помещенным в электрический конденсатор между металлическими электродами-обкладками 2 (рис. 5). Если такой конденсатор подключить к источнику постоянного напряжения, то на обкладках конденсатора появятся электрические заряды, которые обусловят электрическое поле в диэлектрике. Под действием сил этого поля электроны в атомах диэлектрика сместятся относительно ядра и образуют с ним связанные положительные и отрицательные заряды. Эти упруго связанные заряды (рис. 6) называются диполями. Диполи внутри диэлектрика выстраиваются в цепочки и связывают противоположные заряды, находящиеся на электродах конденсатора.

Электрическая поляризация диэлектриков — сложный про-

* Напряженность $E = \frac{U}{d}$ [кв/мм], где U — напряжение, приложенное к материалу; d — толщина материала.

цесс, включающий несколько явлений, зависящих от физической и химической природы диэлектрика. В каждом диэлектрике могут не возникнуть все виды поляризации, но один из них обязателен для всех диэлектриков. Этим видом поляризации является упругое смещение электронов от своего положения равновесия относительно ядра. В результате каждый из атомов превра-

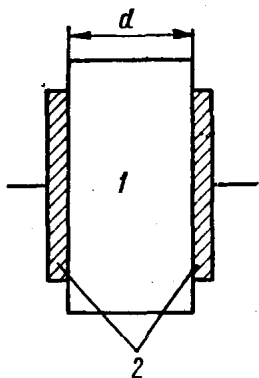


Рис. 5. Диэлектрик между обкладками конденсатора

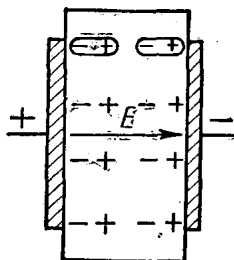


Рис. 6. Электронная поляризация в диэлектрике

щается в электрический диполь. Такие диполи, образованные под действием сил электрического поля, появляются в диэлектрике мгновенно, если приложить к нему напряжение, и также мгновенно исчезают, если напряжение снять. Поэтому они получили название упругих диполей, а сам процесс их образования называется электронной поляризацией. Следует отметить, что до того, как к диэлектрику приложили напряжение, в нем не было готовых диполей.

Молекулы диэлектрика могут еще содержать в своем составе положительные и отрицательные ионы, связанные электрическими силами взаимодействия. При этих условиях в молекуле образуется пара из ионов разных знаков, т. е. электрический диполь. На рис. 7 изображены два таких иона, образующих твердый диполь. Электрический момент (μ) этого диполя равен:

$$\mu = ql, \quad (7)$$

где q — электрический заряд одного иона;

l — расстояние между ионами.

Направление электрического момента принимается от отрицательного иона к положительному и обозначается стрелкой. Молекулы, не имеющие таких диполей, называются неполярными или нейтральными, а молекулы, у которых имеются такие диполи, — дипольными. Такие диполи называются твердыми в отличие от упругих диполей, образующихся только по приложению напряжения, т. е. под действием электрического поля (см. рис. 6).

Если подвергнуть воздействию электрического поля диэлектрик, имеющий дипольные молекулы, то эти твердые диполи повернутся под углом к направлению электрического поля и тем самым дополнительно к электронной поляризации создадут еще поляризацию дипольную. Рис. 8 иллюстрирует процесс дипольной поляризации. Большой стрелкой указано направление электрического поля напряженностью E . Малыми стрелками обозна-

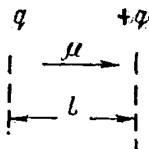


Рис. 7. Электрический диполь

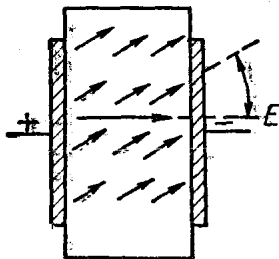


Рис. 8. Дипольная поляризация диэлектрика

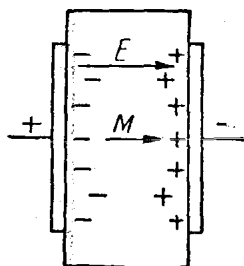


Рис. 9. Объемнозарядная поляризация диэлектрика

чены твердые диполи, которые ориентированы (повернуты) под одним и тем же углом к направлению электрического поля.

Во многих диэлектриках могут оказаться в качестве примесей ионы, слабо связанные силами взаимодействия с собственными молекулами или атомами диэлектрика. Под действием внешнего электрического поля эти ионы пройдут через весь диэлектрик и, остановившись вблизи его поверхности у электродов, образуют так называемый объемный заряд (рис. 9). Таким образом, на поверхностях диэлектрика, обращенных к электродам, с течением времени накопятся электрические заряды: у положительного электрода — отрицательные, а у отрицательного электрода — положительные. В результате такой поляризации образуются объемные заряды и она называется объемнозарядной.

На рис. 9 изображен общий (суммарный) момент M всех диполей, образованных объемными зарядами у поверхности диэлектрика. Он равен:

$$M = Qh, \quad (8)$$

где Q — электрический заряд (на поверхности диэлектрика у электрода);

h — толщина диэлектрика.

В некоторых керамических диэлектриках, например титанате бария (BaTiO_3), имеются электрические диполи, обусловленные кристаллической структурой диэлектрика. Эти диполи в отдельных областях диэлектрика могут быть направлены в разные стороны, например перпендикулярно (рис. 10, а) или противоположно (рис. 10, б) диполям соседней области. Такие области

называются доменами. Домены с одинаково направленными в них диполями существуют без какого-либо внешнего электрического воздействия. Действие же сил электрического поля в направлении диполей какого-либо домена обуславливает преимущество этого домена. Он начинает расти за счет своих соседей, и в конце концов весь диэлектрик становится поляризованным преимущественно в этом направлении. Такая поляризация диэлектрика называется самопроизвольной. На рис. 11 даны картины последовательного нарастания самопроизвольной поляризации под действием внешнего электрического поля напряженностью E .

Во всех диэлектриках в результате приложенного напряжения возникает электрическое поле. Под действием сил этого поля происходят процессы поляризации. Исследование показывает, что чем интенсивней поляризуется диэлектрик, тем больше емкость созданного из него конденсатора. Если взять плоский конденсатор (см. рис. 5), то его емкость определяется по известной формуле

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi h}, \quad (9)$$

где S — площадь одного из электродов конденсатора, см^2 ;
 h — толщина диэлектрика, см .

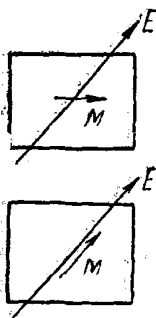


Рис. 11. Самопроизвольная поляризация в диэлектрике: M — электрический момент домена, E — направление внешнего электрического поля

Величина ϵ называется диэлектрической проницаемостью* диэлектрика. Эта величина у разных диэлектриков разная, и чем больше она, тем больше емкость конденсатора.

Диэлектрическая проницаемость вакуума принимается равной единице, у большинства же газов и паров она близка к единице**. Поэтому величину диэлектрической проницаемости можно выразить как отношение емкостей конденсаторов, у которых геометрические размеры (S и d) одинаковы, но в конденсаторе емкостью C_0 диэлектриком служит вакуум:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (10)$$

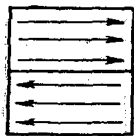
Величина диэлектрической проницаемости количественно определяет свойство диэлектриков поляризоваться и поэтому является тоже основной характеристикой электроизоляционных

* Диэлектрическая проницаемость материала обозначается греческой буквой ϵ (эпсилон).

** Несколько больше единицы (1,00037—1,00058).



а



б

Рис. 10. Домены в диэлектрике